



Kauno technologijos universitetas
Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

3D spausdintuvu išspausdintų kolonų prototipų daugiakriteris vertinimas

Baigiamasis magistro studijų projektas

Neringa Gedlovaitė-Kvietkuvienė
Projekto autorė

Dr. Donatas Aviža
Vadovas

Panevėžys, 2020



Kauno technologijos universitetas

Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

3D spausdintuvu išspausdintų kolonų prototipų daugiakriteris vertinimas

Baigiamasis magistro studijų projektas

Statybos valdymas (6211EX007)

Neringa Gedlovaitė-Kvietkuvienė

Projekto autorė

Dr. Donatas Aviža

Vadovas

Recenzentas / Recenzentė

Panevėžys, 2020



Kauno technologijos universitetas

Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

Neringa Gedlovaitė-Kvietkuvienė

3D spausdintuvu išspausdintų kolonų prototipų daugiakriteris vertinimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Neringos Gedlovaitės-Kvietkuvienės, baigiamasis projektas tema „3D spausdintuvu išspausdintų kolonų prototipų daugiakriteris vertinimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)



Kauno technologijos universitetas

Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

TVIRTINU

TVKC vadovė

Doc. dr. Nida Kvedaraitė

Baigiamojo magistro projekto užduotis

Diplomantui *Neringai Gedlovaitei-Kvietkuvieni*

Baigiamojo projekto tema (lietuvių kalba)	<i>3D spausdintuvu išspausdintų kolonų prototipų daugiakriteris vertinimas</i>
--	--

Baigiamojo projekto tema (anglų kalba)	<i>Multi-criteria Evaluation of 3D Printed Prototypes of Column Structures</i>
---	--

Patvirtinta 2020 m. lapkričio 9 d. dekanų potvarkiu Nr. V25-13-20.

Parengto baigiamojo projekto įkėlimo į Lietuvos akademinės elektroninės bibliotekos informacinės sistemos (eLABa) talpyklą ir Moodle aplinką terminas iki 2021 m. sausio 4 d.

Duomenys, reikalavimai ir sąlygos baigiamajam projektui

Pastato paskirtis – gyvenamoji.

Baigiamojo projekto užduotys / uždaviniai, kurie turi būti atskleisti projekte

-
- 1. Apžvelgti užsienio šalių pasiekimus 3D pastatų spausdinimo srityje.*

 - 2. Remiantis užsienio mokslininkų atliktais tyrimais, išanalizuoti 3D spausdinimo technologiją.*

 - 3. Atlikus mokslinės literatūros analizę, nustatyti pagrindinius automatizuotos statybos privalumus ir trūkumus.*

 - 4. Metodologinėje dalyje pateikti daugiakriterių vertinimo metodų klasifikaciją bei SAW metodo vertinimo algoritmą.*

 - 5. Tiriamojoje dalyje pateikti skirtingos formos 3D spausdintuvu išspausdintų kolonų prototipų vertinamąsias alternatyvas bei parinkti racionaliausią variantą SAW metodu. Nustatyti alternatyvų prioritetų eilutę, atsižvelgiant į spendimų matricos charakteristikas.*
-

Vadovas / Vadovė

dr. Donatas Aviža

(vadovo pareigos, vardas, pavardė)

Užduotį gavau

Neringa Gedlovaitė-Kvietkuvienė

(studento vardas, pavardė)

2020 m. lapkričio 27 d.

Gedlovaitė-Kvietkuvienė, Neringa. 3D spausdintuvu išspausdintų kolonų prototipų daugiakriteris vertinimas. Magistro studijų baigiamasis projektas / vadovas dr. Donatas Aviža; Kauno technologijos universitetas, Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų kryptių grupė): statybos inžinerija, technologijos mokslai (inžinerijos mokslai).

Reikšminiai žodžiai: 3D spausdinimas, betonas, prototipai, SAW.

Panevėžys, 2020. 71 p.

Santrauka

Statybų pramonės veikla daro didelę įtaką aplinkai. Viso pasaulyje sueikvojamo energijos kiekio, statybos sektoriuje sunaudojama net 40 %. Gaminant cementą išmetama 38 % visų šiltnamio efektą sukeliančių CO₂ dujų, viso pasaulyje geriamojo vandens sunaudojama 12 %, o kietųjų atliekų sudaroma 40 % [9, 6]. Didelį gyventojų prieaugį (apie 75 mln. per metus [61]), statybos inžinierių trūkumą, įvairią taršą, stichinių nelaimių padaromą žalą [63, 64], bei įvairius neramumus pasaulio šalyse sieja bendra problema – išaugęs gyvenamųjų būstų poreikis. Todėl kyla klausimas, kaip per trumpiausią laiką, naudojant mažiausiai resursų ir nedarant didelės įtakos aplinkai, statyti būstus. 3D spausdinimas gali padėti išspręsti šias problemas.

Pasaulyje per paskutinius penkerius metus vis plačiau kalbama apie technologines naujoves statybos sektoriuje. Viena iš tų naujovių yra 3D spausdinimas. Rusija, Vokietija, Jungtiniai Arabų Emyratai, Kinija, ir kitos šalys jau išbandė šiuos statybos metodus. Nors daugelyje šalių (taip pat ir Lietuvai) tai vis dar tolimes ateitis, jau pradedamas projektų skaitmeninimas, o tai tiesus kelias į 3D spausdinimą.

Magistro baigiamojo projekto teorinėje dalyje atlikta mokslinių šaltinių, informacijos šaltinių ir techninės literatūros analizė. Tyrimo metodikos dalyje trumpai aprašyta daugiakriterių vertinimo metodų klasifikacija ir plačiau panagrinėtas vienas pasirinktas vertinimo metodas (SAW) ir jo skaičiavimo algoritmas, taip pat pateiktas apklausos dalyvių nuomonių suderinamumo vertinimas bei pagrindinės konstrukcijų skaičiavimams reikalingos formulės reikalingos tiriamojoje dalyje. Tiriamojoje dalyje sumodeliuotos kolonų formos naudojantis programomis *SolidWorks*, *Fusion360*, *AutoCAD*. Kolonų prototipai išspausdinti naudojantis programa *Cura*. Kriterijų reikšmingumui nustatyti atlikta atestuotų specialistų apklausa. Pagal gautus kriterijų reikšmingumus atliktas empirinis tyrimas, naudojantis paprastuoju adityviuoju svertiniu metodu.

Tyrimo objektas – 3D spausdintuvu išspausdintos kolonų prototipų konstrukcijos.

Darbo tikslas – atlikti 3D spausdintuvu išspausdintų kolonų prototipų daugiakriterių vertinimą.

Darbo uždaviniai:

1. Apžvelgti užsienio šalių pasiekimus 3D pastatų spausdinimo srityje.
2. Remiantis užsienio mokslininkų atliktais tyrimais, išanalizuoti 3D spausdinimo technologiją.
3. Atlikus mokslinės literatūros analizę, nustatyti pagrindinius automatizuotos statybos privalumus ir trūkumus.
4. Metodologinėje dalyje pateikti daugiakriterių vertinimo metodų klasifikaciją bei SAW metodo vertinimo algoritmą.

5. Tiriamojoje dalyje pateikti skirtingos formos 3D spausdintuvu išspausdintų kolonų prototipų vertinamąsias alternatyvas bei parinkti racionaliausią variantą SAW metodu. Nustatyti alternatyvų prioritetų eilutę, atsižvelgiant į spindimų matricos charakteristikas.

Tyrimo metodai: mokslinės literatūros analizė, 3D modeliavimas, ekspertų apklausa, empirinis tyrimas SAW metodu.

Pagrindiniai tyrimo rezultatai ir išvados. Atlikus empirinį tyrimą SAW metodu, ištirtos šešios skirtingos kolonų formos pagal konstrukcijai sunaudotų medžiagų kainą, išspausdinimo laiką, kritinę kludymo jėgą, stiprio atsargą ir ašinį poslinkį. Gauta, kad kolonos forma Nr. 4 yra efektyviausia norint ją išspausdinti 3D spausdintuvu spausdinančiu betonu.

Magistro baigiamąjį projektą sudaro: santraukos lietuvių ir anglų kalbomis, įvadas, 3 skyriai, išvados, literatūros sąrašas, informacijos šaltinių sąrašas. Darbą sudaro 71 puslapis, kuriuose yra 13 lentelių, 37 paveikslėliai ir 7 priedai.

Gedlovaitė-Kvietkuvienė, Neringa. Multi-criteria Evaluation of 3D Printed Prototypes of Column Structures. Master's Final Degree Project / supervisor Dr. Donatas Aviža; Panevėžys Faculty of Technologies and Business, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Civil Engineering, Technology Sciences (Engineering Sciences).

Keywords: 3D printing, concrete, prototypes, SAW.

Panevėžys, 2020. 71 p.

Summary

Construction industry has a significant impact on the environment. Construction sector is responsible for as much as 40% of world's energy consumption. Cement production accounts for 38% of total greenhouse gas emissions, 12% of global drinking water consumption and 40% of solid waste [9, 6]. High population growth (around 75 million per year [61]), a shortage of civil engineers, various types of pollution, damage caused by natural disasters [63, 64], and general unrest in the world are linked by a common factor: increased demand for housing. The question therefore arises as to how to build housing with the least possible time and resources, without causing significant impact on the environment. 3D printing can be seen as a solution for these problems.

Over the last five years, there has been a growing global debate regarding technological innovation and its application in the construction sector. 3D printing is one of the innovations, with Russia, Germany, the United Arab Emirates, China, and other countries having already applied it to already existing construction methods. Although in many countries, including Lithuania, is seen as distant future, the digitalization of projects is already underway, opening the path to 3D printing application in construction.

The analysis of technical literature, scientific and public information sources was performed in the theoretical part of the final master's thesis. The research methodology section briefly describes the classification of multi-criteria assessment methods and extensively examines selected assessment method (SAW) and its calculation algorithm, as well as the assessment of the consistency of survey participants and the main formulas required for structural calculations in the research part. In the research part, the column shapes were modeled using programs SolidWorks, Fusion360, AutoCAD. Column prototypes were printed using the Cura program. A survey of certified specialists was conducted to determine the significance of the criteria. Based on the obtained significance of the criteria, an empirical study was performed using a simple additive weighted method.

The object of the research is the constructions of column prototypes printed with a 3D printer.

The aim of this work is to perform a multi-criteria evaluation of column prototypes printed with a 3D printer.

Work tasks:

1. To review the achievements of foreign countries in the field of 3D building printing.
2. Analyze 3D printing technology by reviewing research conducted by foreign scientists.
3. Identify the main advantages and disadvantages of automated construction based on current scientific literature.

4. Present the classification of multi-criteria evaluation methods and the evaluation algorithm of the SAW method in the methodological part.

5. Present the evaluation alternatives of the prototypes of the columns printed with a 3D printer of different shapes and to select the most rational variant by utilizing the SAW method. Identify an alternative priority row based on the characteristics of the decision matrix.

Research methods: analysis of scientific literature, 3D modeling, survey of expressions, empirical research by SAW method.

The main results and conclusions of the research. An empirical study by the SAW method investigated six different column shapes according to the cost of construction materials, printing time, critical tripping force, strength margin, and axial displacement. It was found that the column form no. 4 is most effective for printing it with a 3D printer printing concrete.

The master's final project consists of: summaries in Lithuanian and English, introduction, 3 chapters, conclusions, references, list of information sources. The work consists of 71 pages with 13 tables, 37 figures and 7 appendices.

Turinys

Lentelių sąrašas	10
Paveikslų sąrašas	11
Įvadas.....	13
1. Literatūros apžvalga	15
1.1. 3D betono spausdinimo pažanga ir pasiekimai užsienyje	15
1.2. 3D spausdintuvai ir programinė įranga	19
1.2.1. Prototipų spausdinimui naudojami 3D spausdintuvai	19
1.2.2. Betoninių konstrukcijų spausdinimui naudojami 3D spausdintuvai	21
1.3. Spausdinimo medžiagos	25
1.3.1. Medžiagos prototipų gamybai	25
1.3.2. Medžiagos betono konstrukcijų gamybai	26
1.4. Spausdinimo eiga ir spausdintuvo veikimas.....	29
1.5. Teisiniai dokumentai ir reikalavimai	30
1.6. 3D betono spausdinimo privalumai statyboje	32
1.7. 3D betono spausdinimo trūkumai statyboje	34
2. Tyrimo metodika	36
2.1. Daugiakriteris vertinimo metodas SAW	36
2.2. Ekspertų apklausos vertinimas	38
2.3. Konstrukcijų skaičiavimo kriterijai	39
3. Tiriamoji dalis.....	43
3.1. Sumodeliuoti kolonų prototipų modeliai.....	43
3.2. Ekspertų nuomonių suderinimo tikrinimas	44
3.3. Konstrukcijų išspausdinimo laiko ir kainos skaičiavimai	46
3.4. Sumodeliuotų formų mechaninio atsparumo skaičiavimai	49
3.5. Konstrukcijų lyginimas daugiakriteriu SAW metodu	53
Išvados	58
Literatūros sąrašas	58
Informacijos šaltinių sąrašas	61
Priedai.....	64
1 priedas. Namas Kalifornijoje ir jo perkėlimas [30]	64
2 priedas. „Mighty Buildings“ namo išplanavimas [31]	65
3 priedas. Italijos namo konstrukcijos [34].....	66
4 priedas. „CyBe“ veiklos apžvalga pasaulyje [42].....	68
5 priedas. „CyBe“ 3D spausdintuvo sudedamosios dalys [24].....	69
6 priedas. Apklausos anketa	70
7 priedas. Kokybės kriterijų skaičiavimai kolonų konstrukcijoms pagal sienelės storį	71

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Greitos gamybos procesų lentelė	20
2 lentelė. Trijų spausdinimo su atramomis būdų rezultatai (savikaina, sukibimo stiprumas, dizaino laisvė)	24
3 lentelė. Trijų spausdinimo su atramomis būdų rezultatai (griovimo sudėtingumas, medžiagų nuostoliai, įrangos sudėtingumas, darbo jėga)	24
4 lentelė. Daugiakriterių vertinimo metodų klasifikacija [16]	36
5 lentelė. Skaičiuojamojo betono C25/30 priimtose charakteristikos	43
6 lentelė. Kolonų skerspjūvio savybės	43
7 lentelė. Apklausos rezultatai ir tarpiniai skaičiavimai.....	45
8 lentelė. Spausdinimo parametrai visiems kolonų modeliams.....	46
9 lentelė. Sprendimų priėmimo matrica	53
10 lentelė. Normalizuota matrica, kai kriterijų reikšmingumas skirtingas.....	53
11 lentelė. Reikšmių matrica, kai kriterijų reikšmingumas skirtingas	55
12 lentelė. Normalizuota matrica, kai kriterijų reikšmingumas vienodas	56
13 lentelė. Reikšmių matrica, kai kriterijų reikšmingumas vienodas.....	56

Paveikslų sąrašas

1 pav. Pirmasis dviejų aukštų namas Belgijoje a) namas statybos metu; b) namo vidus; c) namo siena [26]	15
2 pav. Pirmasis vasarnamis išspausdintas Rusijoje [29]	16
3 pav. Prancūzijoje išspausdintas namas [33]	17
4 pav. Namai išspausdinti Italijoje [34]	18
5 pav. Namai Teksase [36].....	19
6 pav. 3D spausdintuvas <i>Aibecy M18 Pro</i> a) vaizdas iš priekio, b) vaizdas iš nugaros, c) vaizdas iš šono.....	21
7 pav. Didelio masto manipulatoriai betonui spausti: a) CyBe, b) Contour Crafting, c) Apis Cor, d) Hindcon, e) CONPrint3D [1]	23
8 pav. Spausdinimas naudojant tik pagrindinę medžiagą [2]	25
9 pav. Spausdinimo būdo naudojant pagalbinę medžiagą spausdinimui schema	25
10 pav. Prototipų gamimas frezuojant [15]	26
11 pav. Bandomasis 3D spausdintuvas [18].....	27
12 pav. Spausdinimo proceso schema	27
13 pav. Išspaudimo greičio (V1) ir spausdinimo greičio (V2) schema	28
14 pav. Išspaudžiamumo testas. (a) – iškreiptas sluoksnis, (b) – gerai išspausdintas sluoksnis [18] 28	
15 pav. 3D spausdinimo proceso etapai [1].....	30
16 pav. Spausdinimo eigoje tarpų spausdinimas ir jų panaudojimas: a) 6 mm tarpo įtaka konstrukcijai; b) 10 mm tarpas; c) 28 mm tarpas; d) spausdinimas su atramomis; e) prieš perdirbant; f) po apdirbimo [2]	33
17 pav. Statybos darbų eigos raida susijusi su statybos pramonės skaitmenizavimu: Sutartinis – dabartinė stuktūra, Skaitmeninimas – pereinamoji sandara ir Personalizavimas – galutinė numatoma statybos darbų sandara [6]	35
18 pav. Ekspertų apklausos suderinimo algoritmas [sukurta autoriaus]	38
19 pav. Ekspertų apklausos suderinimo algoritmas (19-o paveikslėlio tesinys) [sukurta autoriaus] 39	
20 pav. Kolonos koeficiento reikšmės pagal įtvirtinimo tipą.....	41
21 pav. Ašinio apkrovimo pavyzdys [58].....	42
22 pav. Sumodeliuotos formos 1-6 [sukurta autoriaus].....	43
23 pav. Kriterijų skaidymas [sukurta autoriaus].....	44
24 pav. Apklaustųjų pasiskirstymas pagal turimus kvalifikacijos atestatus.....	44
25 pav. Kriterijų reikšmės pagal apklausos rezultatus	46
26 pav. Nagrinėjami skirtingų formų kolonų prototipai išspausdinti 3D spausdintuvu [sukurta autoriaus]	47
27 pav. Medžiagos srauto ir purkštuko judėjimo greičio poveikis spausdinio kokybei.....	48
28 pav. Laiko priklausomybės nuo sienelės storio pagal formas 1-6.....	48
29 pav. Kainos priklausomybė nuo sienelės storio pagal formas 1-6	49
30 pav. Kolonos skaičiuojamasis modelis [sukurta autoriaus].....	50
31 pav. Kritinės jėgos priklausomybė nuo sienelės storio pagal formas 1-6	50
32 pav. Stiprio atsargos priklausomybė nuo sienelės storio pagal formas 1-6.....	51
33 pav. Ašinio poslinkio priklausomybė nuo sienelės storio pagal formas 1-6	51
34 pav. Deformuotos kolonos Nr. 1 epiūra [sukurta autoriaus]	52
35 pav. Kolonų konstrukcijų kriterijų pasiskirstymas procentais pagal gautas reikšmes	54
36 pav. Alternatyvų vertinimo efektyvumo balai, kai kriterijų reikšmingumas nevienodas.....	55

37 pav. Alternatyvų vertinimo efektyvumo balai, kai kriterijų reikšmingumas vienodas 57

Įvadas

Aktualumas. Statybų pramonės veikla daro didelę įtaką aplinkai. Viso pasaulyje sueikvojamo energijos kiekio, statybos sektoriuje sunaudojama net 40 %. Gaminant cementą išmetama 38 % visų šiltnamio efektą sukeliančių CO₂ dujų, viso pasaulyje geriamojo vandens sunaudojama 12 %, o kietųjų atliekų sudaroma 40 % [9, 6]. Didelį gyventojų prieaugį (apie 75 mln. per metus [61]), statybos inžinierių trūkumą, įvairią taršą, stichinių nelaimių padaromą žalą [63, 64], bei įvairius neramumus pasaulio šalyse sieja bendra problema – išaugęs gyvenamųjų būstų poreikis. Todėl kyla klausimas, kaip per trumpiausią laiką, naudojant mažiausiai resursų ir nedarant didelės įtakos aplinkai, statyti būstus. 3D spausdinimas gali padėti išspręsti šias problemas.

Pasaulyje per paskutinius penkerius metus vis plačiau kalbama apie technologines naujoves statybos sektoriuje. Viena iš tų naujovių yra 3D spausdinimas. Rusija, Vokietija, Jungtiniai Arabų Emyratai, Kinija, ir kitos šalys jau išbandė šiuos statybos metodus. Nors daugelyje šalių (taip pat ir Lietuvai) tai vis dar tolimesnė ateitis, jau pradamas projektų skaitmeninimas, o tai tiesus kelias į 3D spausdinimą.

Temos iširtumas. Užsienio šalių mokslininkų publikuotose moksliniuose šaltiniuose, apie 3D spausdinimą statybos srityje, galima rasti informacijos susijusios su spausdinimo įrangos naujovėmis, spausdinimo medžiagos tobulinimu, naujų bandinių tyrimais ir pan. Kolonų konstrukcijų formos iki šiol dar nebuvo tirtos. Lietuvoje tyrimų, susijusių su 3D betoninių konstrukcijų spausdinimu, taip pat nėra daug, daugiau tirtos spausdinimo medžiagos.

Naujumas. Kaip jau buvo minėta anksčiau, kolonų išspausdinimas 3D spausdintuvu yra mažai arba beveik nenagrinėtas įvairioje literatūroje. Šis magistro baigiamasis projektas skiriasi nuo jau nagrinėtų temų užsienyje ar Lietuvoje tuo, kad čia tiriamos kolonų formos, o ne sienų formos. Nors šiame magistro baigiamajame projekte tiriamos išoriškai tradicinės kolonų formos, tačiau vidinė kolonų rašto forma yra parinkta naujo tipo.

Tyrimo metodai. Magistro baigiamojo projekto teorinėje dalyje atlikta mokslinių šaltinių, informacijos šaltinių ir techninės literatūros analizė. Tyrimo metodikos dalyje trumpai aprašyta daugiakriterių vertinimo metodų klasifikacija ir plačiau panagrinėtas vienas pasirinktas vertinimo metodas (SAW) ir jo skaičiavimo algoritmas, taip pat pateiktas apklausos dalyvių nuomonių suderinamumo vertinimas bei pagrindinės konstrukcijų skaičiavimams reikalingos formulės reikalingos tiriamojoje dalyje. Tiriamojoje dalyje sumodeliuotos kolonų formos naudojantis programomis *SolidWorks*, *Fusion360*, *AutoCAD*. Kolonų prototipai išspausdinti naudojantis programa *Cura*. Kriterijų reikšmingumui nustatyti atlikta atestuotų specialistų apklausa. Pagal gautus kriterijų reikšmingumus atliktas empirinis tyrimas, naudojantis paprastuoju adityviuoju svertiniu metodu.

Tyrimo objektas – 3D spausdintuvu išspausdintos kolonų prototipų konstrukcijos.

Darbo tikslas – atlikti 3D spausdintuvu išspausdintų kolonų prototipų daugiakriterį vertinimą.

Darbo uždaviniai:

1. Apžvelgti užsienio šalių pasiekimus 3D pastatų spausdinimo srityje.
2. Remiantis užsienio mokslininkų atliktais tyrimais, išanalizuoti 3D spausdinimo technologiją.

3. Atlikus mokslinės literatūros analizę, nustatyti pagrindinius automatizuotos statybos privalumus ir trūkumus.
4. Metodologinėje dalyje pateikti daugiakriterių vertinimo metodų klasifikaciją bei SAW metodo vertinimo algoritmą
5. Tiriamojoje dalyje pateikti skirtingos formos 3D spausdintuvu išspausdintų kolonų prototipų vertinamąsias alternatyvas bei parinkti racionaliausią variantą SAW metodu. Nustatyti alternatyvų prioritetų eilutę, atsižvelgiant į spindimų matricos charakteristikas.

Autoriaus publikuotas straipsnis: Gedlovaitė-Kvietkuvienė N., Aviža D., Zacharovienė E. *3D spausdintuvu atspausdintų kolonų prototipų skirtingų formų daugiakriteris vertinimas*. Studentų mokslinių darbų konferencijoje „Technologijų ir verslo aktualijos 2020“ skaitytas pranešimas 2020 m. balandžio mėn. 24 d. Panevėžys.

Magistro baigiamąjį projektą sudaro: santraukos lietuvių ir anglų kalbomis, įvadas, 3 skyriai, išvados, literatūros sąrašas, informacijos šaltinių sąrašas. Darbą sudaro 71 puslapis, kuriuose yra 13 lentelių, 37 paveikslėliai ir 7 priedai.

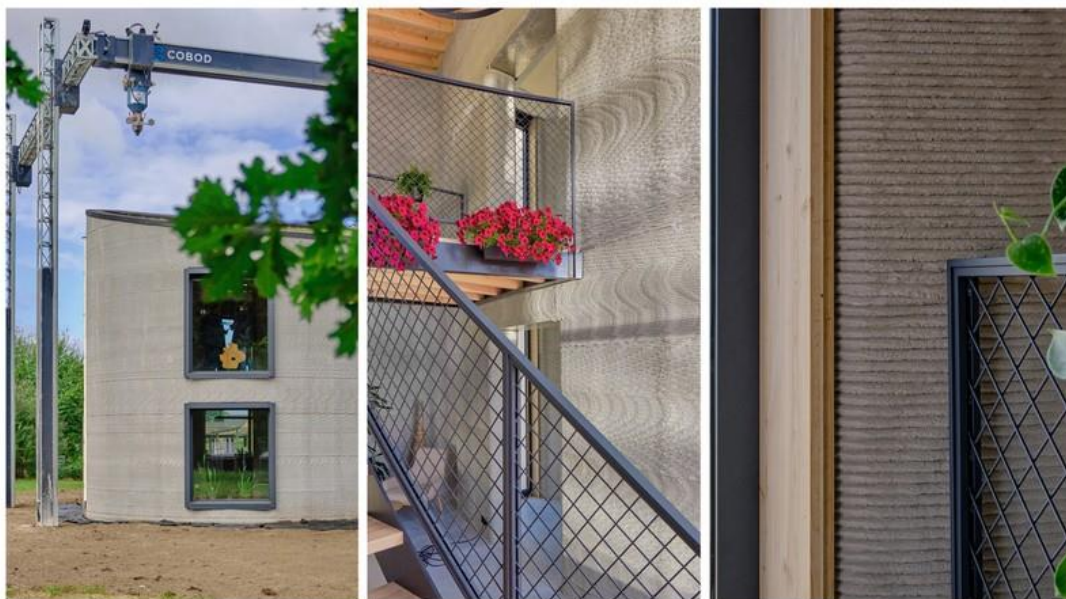
1. Literatūros apžvalga

Šiame skyriuje bus apžvelgti užsienio šalių pasiekimai statybos su 3D spausdintuvais srityje, aptarti 3D spausdintuvų modeliai ir programinė įranga, medžiagos, kurias galima spausdinti, spausdinimo eiga, 3D spausdintuvo veikimas, 3D betono spausdinimo privalumai ir trūkumai, bei apžvelgti pagrindiniai mūsų šalyje galiojantys teisės aktai.

1.1. 3D betono spausdinimo pažanga ir pasiekimai užsienyje

Belgija

Belgų kompanija „Kamp C“ su didžiausiu Europoje esančiu 3D spausdintuvu pastatė dviejų aukštų namą Vesterlo mieste, Belgijoje (žr. 1 pav., a, b, c). Namų plotas siekia 90 m². Anot „Kamp C“ projekto vadovo Marijke Aert'o, šis dviejų aukštų namas išspausdintas 3D spausdintuvu, yra tris kartus tvirtesnis, nei namas pastatytas iš statybinių blokų, t. y. gniuždymo jėga yra tris kartus didesnė nei blokų. Šiam namui išspausdinti nebuvo naudojami klijiniai, ir taip sutaupyta apie 60 % medžiagos, laiko ir pinigų. Siekiant paskatinti statybos pramonę diegti 3D betono spausdinimą šis namas buvo išspausdintas remiant Europos regioninės plėtros fondui pagal Europos C3PO projektą [26, 27].



1 pav. Pirmasis dviejų aukštų namas Belgijoje a) namas statybos metu; b) namo vidus; c) namo siena [26]

Rusija

Amerikos įmonė „Apis Cor“ Rusijoje išspausdino pirmąjį pasaulyje vasarnamį (žr. 2 pav.). Vos per 24 valandas, 38 kvadratinė metrų namo kaštai įskaitant visas konstrukcijas ir medžiagas: pamatus, stogą, vidinę ir išorinę apdailą, sienų izoliaciją, langus ir grindis, siekė tik 10 134 Eur.

Spausdinimui buvo naudojama mobilioji spausdinimo robotinė ranka su įmontuota automatizuota maišymo ir siurbimo sistema [29].



2 pav. Pirmasis vasarnamis išspausdintas Rusijoje [29]

Kalifornija

Namų spausdinimo technologiją sukūrusi startuolė „Mighty Buildings“ sandėlyje, 3D spausdintuvu, išspausdino namo apvalkalą – ne tik sienas ir grindis, bet ir lubas, stogą ir iškyšas per 24 valandas ir nugabeno į Oklendo miestą, Kalifornijoje (JAV) (žr. 1 priedą). Įmonės „Mighty Buildings“ atstovai teigia, kad automatizavus daugiau statybų proceso, namai gali tapti labiau prieinami. Palyginus su vidutiniu namu Kalifornijoje, šie nauji namai kainuoja net 45% mažiau. Tai ypač naudinga Kalifornijoje, kur statyba yra ypač brangi, o statybos pramonėje nėra pakankamai darbuotojų. 2016 m. McKinsey instituto ataskaitoje apskaičiuota, kad iki 2025 m. valstybei reikia pastatyti 3,5 mln. namų, kad patenkintų paklausą ir sumažintų būsto kainą. Šio namo kaina Kalifornijoje yra 115 000 USD arba 98 148 Eur, įskaitant leidimo mokesčius, pamatų darbus ir pristatymą, o pati statyba yra 80 % automatizuota [30]. Namų išplanavimas pateiktas 2 priede.

„Mighty Buildings“ sukūrė „Y Combinato“ technologinį greitintuvą ir sukūrė sintetinę, lengvą akmens medžiagą, panašią į „Corian“¹, medžiagą, kuri kartais naudojama stalviršiuose. Kai medžiaga spausdinama ir veikiama šviesos, vyksta reakcija, kuri ją iškart sukietina. Ji gali išlaikyti savo svorį, todėl galima spausdinti horizontaliai ore. [30]

Prancūzija

Įmonė „Batiprint3d“ įsikūrusi Prancūzijos mieste Nante, 3D spausdintuvu išspausdino namą (žr. 3 pav.), kuriame įsikūrė pirmoji pasaulyje penkių asmenų šeima. Namas buvo sukurtas Benoit‘o Furet‘o idėja ir pastatytas taip, kad kreivotūsi aplink sklype esančius 100 metų senumo saugomus medžius. Kreivė taip pat pagerina namo oro cirkuliaciją, sumažina galimą drėgmę ir pagerina šiluminę varžą. Kiekviena siena susideda iš dviejų izoliuotų poliuretano sluoksnių, tarp kurių yra tarpas, užpildytas cementu. Tai sukuria storą, izoliuotą, visiškai patvarią sieną. Tada sumontuoti langai, durys ir stogas. Nante esantis pastatas taip pat buvo suprojektuotas neįgaliesiems, todėl besinaudojantys neįgaliųjų

¹ Dirbtinis arba akrilinis akmuo, lietas marmuras ar granitas [32]

vežimėliais taip pat turi galimybę gyventi šiame moderniaame pastate ir net galimybę viską valdyti išmaniuoju telefonu [33].

Šis namas išspausdintas per 54 valandas, bet įmonės „Batiprint3d“ komanda tikisi, kad tą patį namą vėl galės išspausdinti tik per 33 valandas. Įmonės įkūrėjas B. Furet'as taip pat mano, kad per penkerius metus jie laikydamiesi statybos taisyklių, sumažins tokių namų statybos kainą 25 %, o per 10–15 metų ir 40 %.



3 pav. Prancūzijoje išspausdintas namas [33]

Italija

Italijos miestelyje Masa Lombarda, bendradarbiaujant įmonėms „WASP“ ir „RiceHouse“, 3D spausdintuvu „Crane WASP“ per 10 dienų išspausdino ekologišką 30 kv. m pastatą (žr. 4 pav.), kurio sienų medžiagų kaina siekė tik 900 Eur. Statybinės medžiagos buvo imamos iš statybos vietoje esančių žaliavų: žalio dirvožemio, šiaudų, ryžių lukštų ir kalkių [34]. Šis projektas pavadintas „Gaia“. Pavadinimas kilo dėl pagrindinio sudėtinio mišinio rišiklio, kuris buvo vietos dirva. Tai galima laikyti nauju ekologiniu ir tvariu architektūriniu modeliu, ypatingą dėmesį skiriant natūralių atliekų naudojimui, kilusiam iš ryžių gamybos grandinės ir orientuoto į ypač efektyvaus mūro statybą bioklimatiniu ir sveiku požiūriu [35].

Projekto „Gaia“ realizavimui įmonė „RiceHouse“ tiekė augalinius pluoštus, per kuriuos įmonės „WASP“ inžinieriai sukūrė junginį, sudarytą iš 25 % dirvožemio, paimto iš vietos (30 % molio, 40 % dumblo ir 30 % smėlio), 40 % iš šiaudų ir kapotų ryžių, 25 % ryžių lukštų ir 10 % hidraulinių kalkių. Mišinys buvo sumaišytas ir padarytas homogeniškas, kad būtų tinkamas naudoti. Projektas „Gaia“ yra ekologiškas tiek energijos suvartojimo klausimu, tiek sveikatos požiūriu ir beveik neturi jokio poveikio aplinkai. Dėl naudojamų minėtų medžiagų, jam nereikia šildymo ar oro kondicionavimo sistemos, nes tiek žiemą, tiek vasarą viduje palaikoma komfortiška temperatūra. Šis namas pasiekė A4 energetinę klasę [34]. Namų išplanavimas ir konstrukcijos pateiktos 3 priede.



4 pav. Namas išspausdintas Italijoje [34]

Teksasas

Ostino mieste, Teksase statybų bendrovė „Icon“ 3D spausdintuvu pastatė 74,32 kvadratinių metrų namą (žr. 5 pav.). Baigus spausdinimo etapą, komanda sumontavo elektros laidus, santechniką, medinį stogą ir langus. Nuo pradžios iki pabaigos visas procesas užtruko mažiau nei dieną. „ICON“ tikisi, kad artimiausiu metu galės sukurti robotus, galinčius montuoti langus, ir sukurti specialų instrukcijų rinkinį dronams, kurie galėtų dažyti išorines sienas. Šio namo kaina siekia 8550 Eur, tačiau kompanija siekia dar sumažinti kaštus iki 4270 Eur. [36]. Taip pat ši statybų bendrovė iki 2020 metų pabaigos planuoja Meksikoje išspausdinti visą gyvenamųjų namų kvartalą nepasiturintiems žmonėms šioje seisminėje zonoje [37].

Čekija

Statybų draugija „Stavebni sporitelna Ceske sporitelny“, naudojant 3D spausdinimo technologiją, Čekijoje per 22 valandas išspausdino pirmąjį namą plūduriuojantį ant vandens. Draugija teigia, kad tokiu statybos metodu buvo išskiriama 20 % mažiau CO₂ dujų. Naudotas 3D spausdintuvas spausdino 15 cm/s greičiu, o spausdinimo medžiagos mišinys buvo praturtintas nano-polipropileno pluoštais ir plastifikatoriais, kurie pagerina plastiškumą ir sukuria geresnes organines formas bei pagreitindavo kietėjimą, t. y. po 24 valandų betonasis pasiekdavo 25 MPa stiprumą, o po 28 dienų – 65 MPa. Namas suprojektuotas tarnauti mažiausiai šimtą metų bet kurioje aplinkoje. [38]



5 pav. Namas Teksase [36]

Jau daug šalių naudodamos skirtingus 3D spausdintuvus išspausdino pirmuosius namus ir jau spėjo įsitikinti šios technologijos nauda.

1.2. 3D spausdintuvai ir programinė įranga

Pirmasis 3D spausdintuvas 1986 m. buvo sukurtas Chuck'o Hull'o. Jis sugalvojo sukietinti dažus naudojant ultravioletinius spindulius, kuriuos tepdavo ant žurnalinio staliuko. Naudodamasis šia patirtimi kaip įkvėpimu, Chuck'as sugalvojo procesą – 3D spausdintų objektų gamybą. Pasinaudojant sutelktu ultravioletinių spindulių pluoštu, nuosekliai kietinti ploną dervos kiekį. Šį procesą jis pavadino stereolitografija ir tai šiandien yra pagrindinė 3D spausdinimo technologija. Chuck'as taip pat išrado daugybę kitų svarbių 3D spausdinimo aspektų, įskaitant STL failą, kuris yra dominuojantis failo formatas beveik visiems 3D spausdintuvams. Apie STL failą plačiau bus aprašyta šiame skyriuje. Jis taip pat įkūrė vieną iš pirmaujančių pasaulyje 3D spausdinimo kompanijų „3D Systems“. Nuo aštuntojo dešimtmečio vidurio atsirado daugybė kitų 3D spausdinimo technologijų, kurios iš esmės pakeitė masinę gamybą ir net po truputį skverbiasi į statybos sferą.

Šiame poskyryje bus pristatomos bendros spausdintuvų rūšys, dažniausiai sutinkami failų tipai, tyrimo metu naudojamas 3D spausdintuvas prototipų spausdinimui ir smulkiau aprašomi 3D spausdintuvai, kurie spausdinimui naudoja betoną.

1.2.1. Prototipų spausdinimui naudojami 3D spausdintuvai

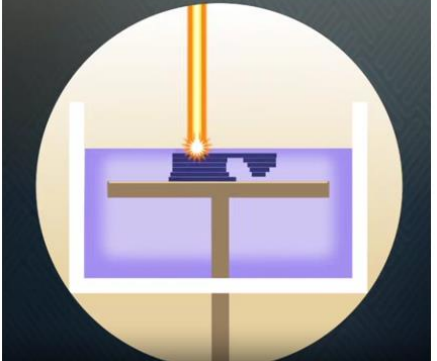
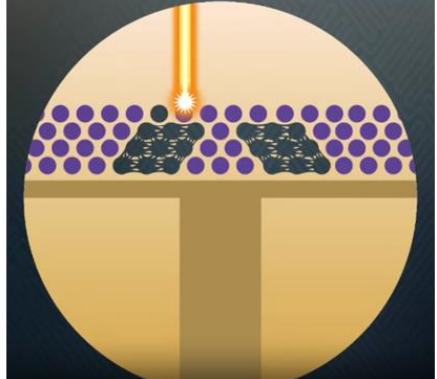
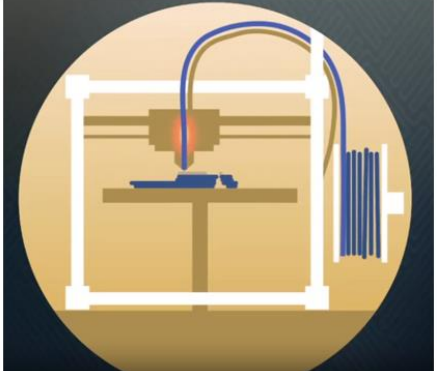
3D spausdintuvų rūšių, kurie tiktų prototipų spausdinimui yra daug, tačiau visi jie klasifikuojasi į tris pagrindinius tipus, kurie bus aprašomi žemiau.

SLA (angl. *Stereo Lithography*) – pirmoji 3D spausdinimo technologija, kuri gali pagaminti itin mažus daiktus dideliu tikslumu, t. y. iki 25 μ tikslumu, nors taip spausdintas objektas nėra labai stiprus ar kietas.

SLS (angl. *Selective Laser Sintering*) – šis 3D spausdinimo būdas panašus į SLA, tačiau šiuo atveju lazeris sujungia šalia esančių miltelių (arba metalo, plastiko) daleles ryšiais. Šis procesas taip pat labai tikslus, pasiekia iki 10 μ tikslumą, bet taip pat yra ir labai stiprus.

FDM (angl. *Fused Deposition Modeling*) – viena iš labiausiai naudojamų 3D spausdinimo technologijų. Ji turi kaitinimo elementą, kuris kaitina giją ir per mažą antgalį sluoksnis po sluoksnio trimis kryptimis lipdo spausdinamą objektą. Šis spausdinimo būdas nėra labai tikslus, t. y. iki 100 μ , ir tinka tuomet, kai išspausdintas objektas turi būti stiprus ar kietas, tačiau neturi atrodyti labai tikslus. Tai aktualu prototipų gamybai. Trumpas šių procesų aprašymas ir vizualizavimas pateiktas 1 lentelėje.

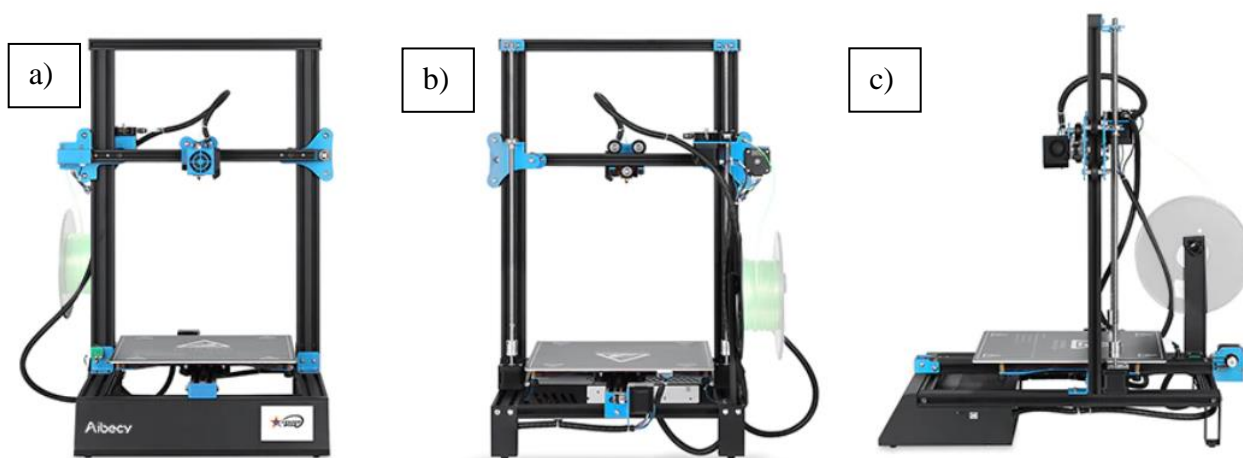
1 lentelė. Greitos gamybos procesų lentelė

Proceso vizualizacija [15]	Procesas	Aprašymas
	Stereolitografija (SLA)	3D spausdinimo technologija, kuri gamina daiktus, naudojant didelio intensyvumo šviesą arba lazerį tam kad sukietintų plastikinę dervą [15,23]
	Selektryvus lazerinis sukepinimas (SLS)	3D spausdinimo technologija, naudojanti didelio intensyvumo šviesą miltelių pavidalo medžiagai sukepinti [15,23]
	Sulydyto nusėdimo modeliavimas (FDM)	3D spausdinimo technologija, sukurianti objektus lydant giją ir išspaudžiant ją per mažą antgalį, kuris juda trimis matmenimis [15,23]

Visų šių procesų tipų plėtiniai žymimi *.stl*, kitaip dar tiesiog vadinami STL failais. Tai reiškia, kad tą patį modelį galima išspausdinti skirtingais spausdintuvais ir esant skirtingoms technologijoms. STL failas yra kaip 3D spausdinimo PDF. Tokios programos kaip *Tinker CAD* arba *Google Sketch Up* modeliuoja STL failus, išskyrus *Fusion 360*, nors buvo sukurtas galvojant apie 3D spausdintuvus, tačiau ši programa kuria 2D vaizdus, kurie nėra paruošti faktiniam trijų matmenų spausdinimui. Iš esmės jiems trūksta komandų instrukcijos, nurodančios, kur spausdinimo galvutei eiti.

Kiekvienas 3D spausdintuvas yra su savo „pjaustymo“ programine įranga, taip pat ir *Aibecy M18 Pro* (apie kurį bus plačiau pakalbėta) naudoja programinę įrangą, vadinamą *Cura*. „Pjaustymas“ yra esminis žingsnis tarp sukurto 3D modelio failo ir 3D spausdinimo failo. Jis užima modelio failą ir sukarpo į daugybę sluoksnių, o sluoksnius į ilgus skirtingus kelius, kuriais eis manipulatoriaus galvutė. Šis STL failas tinka ir prototipų gamybai skirtingais spausdintuvų tipais, ir betoninėms konstrukcijoms spausdinti.

3D spausdinimui pasirinktas modelis yra *Aibecy M18 Pro* (žr. 6 pav.). Šis spausdintuvas pasirinktas todėl, kad jis gali išspausdinti didesnių matmenų modelius nei daugelis kitų, t. y. $300 \times 300 \times 400$ mm dydžio. Šis spausdintuvo modelis pagamintas 2019-07-06. *Aibecy M18 Pro* naudoja 24 V maitinimo šaltinį, jį saugiau ir greičiau šildyti. Spausdintuvas plačiai naudojamas žaislų, architektūros, baldų, švietimo, medicinos, kasdienio naudojimo reikmėms ir kitose srityse. Šis spausdintuvas turi X ir Y ašių diržus ir dvigubą Z ašies variklį, o spausdintuvo surinkimas reikalauja tik apie 10 min. 3D spausdintuvas palaiko įvairius 1,75 mm skersmens siūlus, tokius kaip ABS, PLA ir kt. (plastiko medžiagos bus aptartos kitame skyriuje).



6 pav. 3D spausdintuvas *Aibecy M18 Pro* a) vaizdas iš priekio, b) vaizdas iš nugaros, c) vaizdas iš šono

Iš gamintojo specifikacijos yra žinoma, kad antgalio skersmuo yra $0,4 \text{ mm}$, spausdinimo paklaida tik $\pm 0,1 \text{ mm}$, sluoksnio storis $0,1 - 0,3 \text{ mm}$, turi 3,5 colių spalvotą jutiklinį ekraną, spausdinimo greitis yra $10 - 120 \text{ mm/s}$, išspaudimo galvutė įkaista iki $260 \text{ }^\circ\text{C}$, spausdinimo padas įkaista iki $110 \text{ }^\circ\text{C}$, XY padėties nustatymo tikslumas apie $0,012 \text{ mm}$, Z padėties nustatymo tikslumas $0,004 \text{ mm}$, palaikoma spausdinimo medžiaga: ABS, PLA, TPU ir kt., gijų skersmuo $1,75 \text{ mm}$, programinė įranga: *Repetier-Host*, *Cura*, palaikymų failų formatai: STL, OBJ, G-Code, operacinė sistema: *Windows*, *Linux*, darbo aplinkos temperatūra turi būti $10 - 30 \text{ }^\circ\text{C}$, drėgmė $20 - 50 \%$, mašinos svoris $9,4 \text{ kg}$. Šio spausdintuvo kaina įvairiuose interneto puslapiuose svyruoja $299 - 329 \text{ Eur}$.

1.2.2. Betoninių konstrukcijų spausdinimui naudojami 3D spausdintuvai

Kaip ir visus ekstruzijos pagrindu pagamintus 3D spausdintuvus, betono spausdintuvus sudaro spausdinimo galvutė, išleidžianti spausdinimo medžiagą, ir padėties nustatymo sistema (manipulatorius), nešiojanti spausdinimo galvutę ir tiksliai judanti spausdinimo keliais. Be pagrindinės spausdinimo galvutės judėjimo funkcijos, manipulatorius taip pat turi užduotį užtikrinti betono tiekimą į spausdinimo galvutę per žarnas ar vamzdžius.

Dažniausiai spausdinimo galvutei keliami tokie reikalavimai [1]:

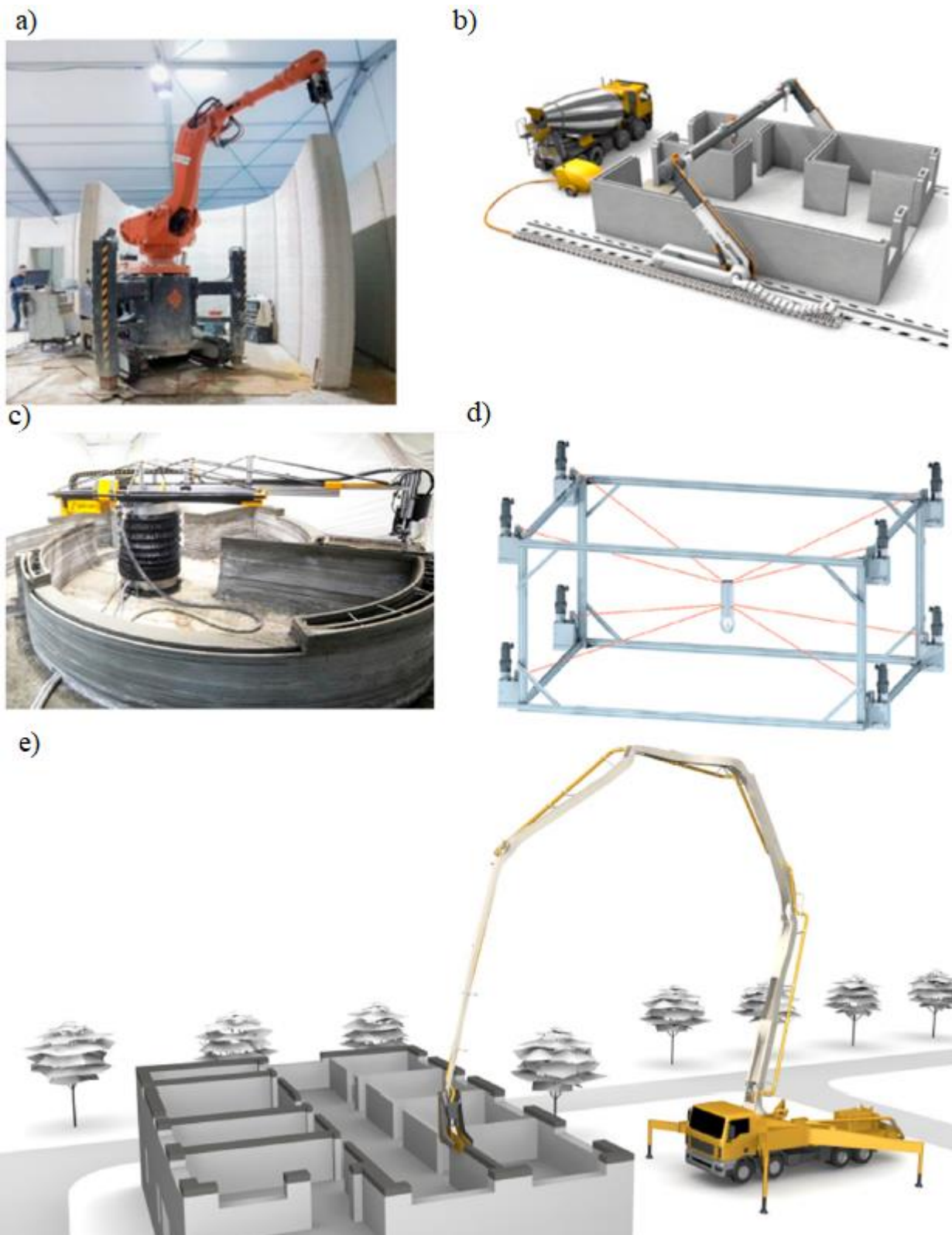
- didelė betono išeiga užtikrinant ekonomišką spausdinimo greitį;
- aukštas automatizavimo lygis;
- aukštas moduliškumo lygis;
- kintamas sienų skerspjūvis ir lygus sienų paviršius;
- minimalus svoris;
- lengvas valymas ir tvarkymas.

Olandijos kompanija „CyBe“ naudoja šešių ašių pramoninį robotą su vikšrine trasa. Taigi, teoriškai 3,2 m roboto judėjimo nuotolis gali būti padidintas iki neribotos darbo srities (žr. 7 pav., a). Ši mobilųjį robotą-spausdintuvą sudaro holonominė mobili platforma, 6 ašių manipulatorius, stereofoninė kamera ir siurblys, parodytas 5 priede. Robotinė ranka su joje įmontuota spausdinimo galvute yra sumontuota ant holominės² mobilios platformos. Holonominėje mobilioje platformoje yra jutikliai lokalizacijai ir odometrijai (padėčiai) nustatyti, įskaitant ratų kodavimo įrenginius, inercinio matavimo vienetą ir lazerinį skaitytuvą. Lokalizavimas atliekamas naudojant jutiklius, kamerą ir kai kuriuos „ArUco“ (ArUco yra panašus kaip QR kodas) žymenis, esančius ant platformos. Siurblio sistema yra atsakinga pristatyti cemento medžiagą į spausdinimo antgalį selektyviam betono nusodinimui, kad būtų sukurta galutinio atspaudu struktūra [24]. Reikalavimai vietovės aplinkai yra dideli.

Yra specialūs reikalavimai, keliami montavimo vietai, kad būtų galima pasiekti reikiamą tikslumą. JAV korporacija „Contour Crafting“ ir Kinijos bendrovė „WinSun“ sukūrė robotą, apimančią visą spausdinimo plotą (žr. 7 pav., b). Išilginis judėjimas pasiekiamas bėgio pavara, o kėlimo judesys skersine sija pasiekiamas sulenkus šonines kolonas. Ši technologija reikalauja papildomų išlaidų elementų transportavimui ir surinkimui, o tai gali turėti neigiamą poveikį viso proceso ekonominiam efektyvumui [1].

Rusų kompanija „Apis Cor“ sukūrė besisukančią robotinę ranką, kuri yra spausdinamojo objekto centre ir turi reguliuojamą paslankumą vertikaliai iki 8,5 m, skirtą spausdinimo galvutei perkelti (žr. 7 pav., c). Savo darbo plote jis sugeba spausdinti objektus, kurių plotas iki 130 m². Spausdinimo metu robotinė ranka auga kartu su spausdinamu objektu, tačiau šis aukštis yra ribotas. Jei norima spausdinti daugiau nei vieno aukšto pastatus, spausdinimo robotas turėtų būti perkeltas į kitą aukštą. Atitinkamai pastato architektūroje turi būti pakankamai vietos pozicionavimui ir roboto surinkimui [1].

² Halo efektas – magnetiniame lauke esančiame laidininke, kuriuo teka elektros srovė, susidaręs potencialų skirtumas. Šis potencialų skirtumas susidaro tarp sienelių, lygiagrečių srovės tekėjimo kryptims. Šį reiškinį 1879 m. atrado Edvinas Holas [43].



7 pav. Didelio masto manipulatoriai betonui spausdinti: a) CyBe, b) Contour Crafting, c) Apis Cor, d) Hindcon, e) CONPrint3D [1]

Europos mokslinių tyrimų projekto „Hindcon“ tikslas yra naudoti kabelinį robotą kaip spausdinimo galvutės manipuliatorių sistemą. Šiuo tikslu spausdinimo galvutės laikiklio platforma yra nukreipta iš kelių lygiagrečių kabelių kinematinio judesio sistema. Pakoregavę tam tikras kabelio ilgio konfigūracijas, laikiklio platformos padėtis ir orientacija gali būti labai lengvai keičiama, kad

spausdinimo galvutę būtų galima perkelti bet kurioje padėtyje laisvoje darbo vietoje (žr. 7 pav., d). Šios koncepcijos pranašumas yra didelė sistemos dinamika ir palyginti paprastas dizainas [1].

„CONPrint3D“ procesas siekia naudoti sunkvežimyje sumontuotą betoninį siurblių kaip didelio masto manipuliatorių spausdinimo galvutei (žr. 7 pav., e) [1].

Nepalankios sąlygos 3D pastatams spausti [1]:

- šiurkšti aplinka, nešvarumai, orų sąlygos;
- nepertraukiamas veikimas;
- dažnas surinkimas ir išmontavimas;
- lengvo valymo ir priežiūros būtinumas;
- reikalingas mašinos mobilumas norint greitai pakeisti konstrukciją;
- dažnai neapmokomi darbuotojai ir dėl to trūksta priežiūros jautrių technologijų tvarkymui;
- konservatyvus statybų pramonės požiūris į šiuolaikines technologijas.

Konstrukcijų spausdinimas gali vykti ne tik naudojant pagrindinę medžiagą, t. y. betoną (žr. 8 pav.). Betonas būna spausdinamas kartu su atramomis (žr. 9 pav.). Yra įvertinti trys skirtingi spausdinimo būdai:

1. Spausdinimas ant esamo paviršiaus;
2. Spausdinimas naudojant pagalbines medžiagas;
3. Spausdinimas tik pagrindinę medžiagą.

Buvo atliktas bandymas [2] su šiais ką tik minėtais būdais spausdinant su atramomis. Rezultatai pateikti 2–3 lentelėse. Buvo išskirti septyni pagrindiniai veiksniai, kurie buvo vertinami pagal tris skirtingas klasifikacijas. Kaip parodyta 2 lentelėje, spausdinimas naudojant tik pagrindinę medžiagą yra naudingesnis nei kiti du.

2 lentelė. Trijų spausdinimo su atramomis būdų rezultatai (savikaina, sukibimo stiprumas, dizaino laisvė)

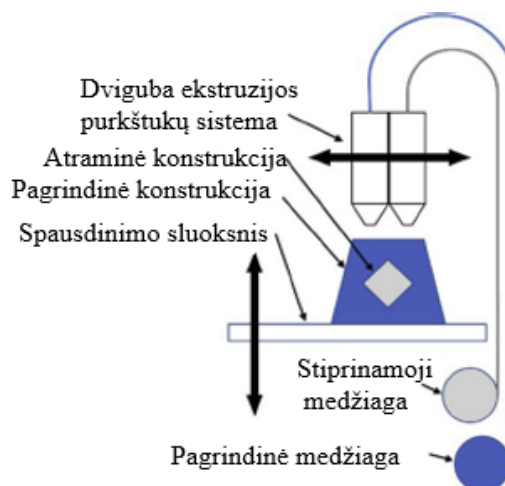
	Savikaina	Sukibimo stiprumas	Dizaino laisvė
Spausdinimas ant esamo paviršiaus	Vidutinė	Aukštas	Vidutiniška
Spausdinimas naudojant pagalbines medžiagas (žr. 9 pav.)	Aukšta	Vidutiniškas	Aukšta
Spausdinimas naudojant tik pagrindinę medžiagą (žr. 8 pav.)	Žema	Aukštas	Aukšta

3 lentelė. Trijų spausdinimo su atramomis būdų rezultatai (griovimo sudėtingumas, medžiagų nuostoliai, įrangos sudėtingumas, darbo jėga)

	Griovimo sudėtingumas	Medžiagų nuostoliai	Įrangos sudėtingumas	Darbo jėga
Spausdinimas ant esamo paviršiaus	Vidutiniškas	Maži	Vidutiniškas	Vidutiniška
Spausdinimas naudojant pagalbines medžiagas (žr. 9 pav.)	Vidutiniškas	Dideli	Aukštas	Žema
Spausdinimas naudojant tik pagrindinę medžiagą (žr. 8 pav.)	Žemas	Dideli	Žemas	Vidutiniška



8 pav. Spausdinimas naudojant tik pagrindinę medžiagą [2]



9 pav. Spausdinimo būdo naudojant pagalbinę medžiagą spausdinimui schema

Šiame tyrime buvo pademonstruota galimybė pritaikyti spausdinimo parametrus taip, kad būtų galima išspausdinti pagrindinę medžiagą ir atraminę, naudojant tokias pat statybines medžiagas.

1.3. Spausdinimo medžiagos

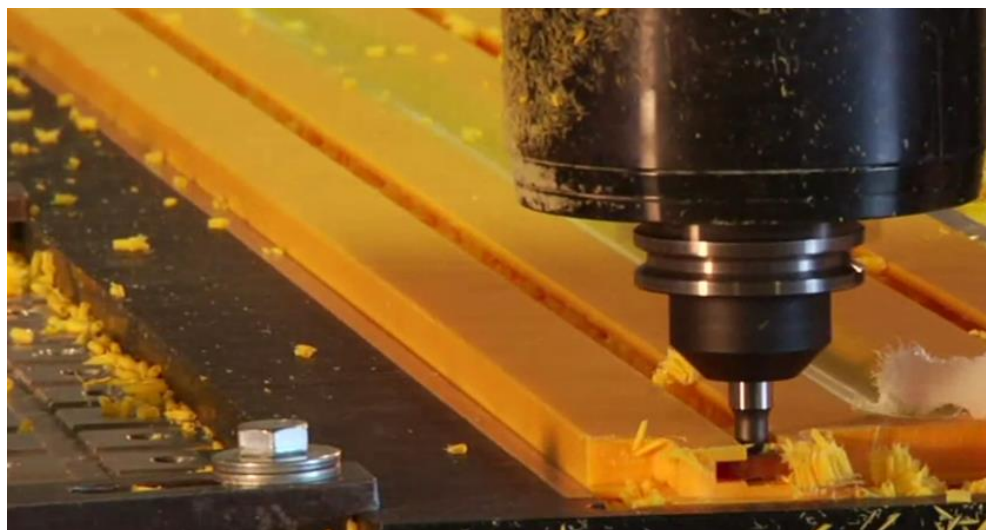
Šiame skyrelyje bus aprašomos spausdinimo medžiagos prototipų gamybai ir betoninių konstrukcijų gamybai.

1.3.1. Medžiagos prototipų gamybai

Kol nebuvo 3D spausdintuvų, prototipai buvo frezuojami ir taip susidarydavo dideli medžiagų nuostoliai (žr. 10 pav.). 3D spausdinimas atvėrė naujas galimybes nesudarant medžiagų švaistymo, nes medžiaga spausdinama tiksliai tiek, kiek to reikalauja detalės ar konstrukcijos forma. Taip pat tai suteikia neribotą modelio geometrinio sudėtingumo laisvę.

Yra daug 3D spausdintuvų tipų ir rūšių, tačiau spausdinimo medžiagą naudoja beveik visi vieną iš dviejų objektų spausdinimui. Jie arba ima minkštą medžiagą ir ją kietina, arba ima kietą medžiagą ir

ją skystina, todėl beveik bet kokią medžiagą, kurią galima sukietinti ar suminkštinti galima išspausdinti 3D formatu, įskaitant plastiką, metalą, anglies puošą. Taigi, kaip minėta anksčiau yra dvi pagrindinės termoplastikų rūšys.



10 pav. Prototipų gaminimas frezuojant [15]

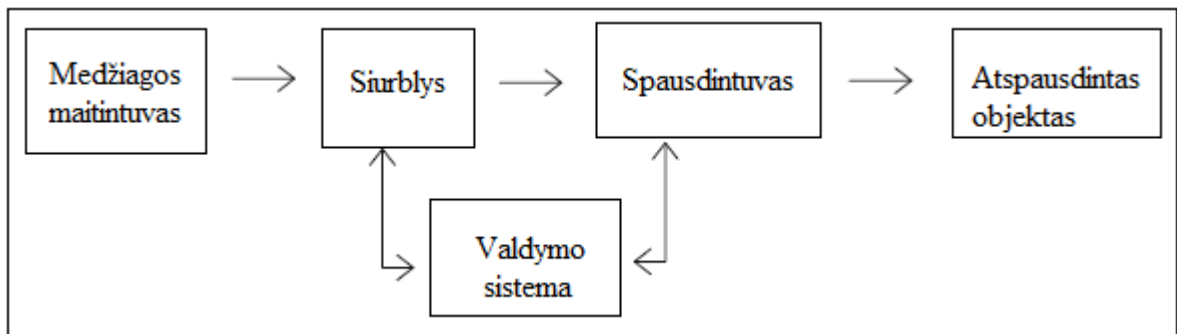
Pirmasis termoplastikas vadinamas akrilnitrilo, stireno ir polibutadieno kopolimeras ir sutrumpintai žymimas trimis raidėmis ABS (angl. *Acrylonitrile butadiene styrene*) yra pagamintas iš naftos, t. y. ABS gaminamas polimerizuojant stireną ir akrilonitrilą su polibutadienu. Medžiagų proporcijos gali kisti tarp 15–35 % akrilonitrilo, 5–30 % butadieno ir 40–60 % stireno, todėl gaunamo kopolimero savybės taip pat skiriasi. Nuo ABS sudėties skiriasi tirpumas acetone ir mechaninės savybės. Šis plastikas neturi specifinio kvapo, atsparus smūgiams, netoksiškas, lengvai dažomas ir apdirbamas mechaniškai. Šio plastiko tvirtumą būtų galima lyginti su pušimi. Išspausdinti objektai yra ilgaamžiai ir tinkami naudoti nuo -40 iki 80 °C, tačiau ABS plastikas bijo tiesioginės saulės šviesos. Šiuo plastikumu yra sunkiau spausdinti nei PLA, nes išspausdinus vėsdamas neišlaiko savo formos (šiluminio plėtimosi coef. apie 0,8–1,2 %). Kitas termoplastikas vadinamas polilaktidu ir sutrumpintai žymimas PLA (angl. *Polylactic acid*) yra gaminamas iš kukurūzų arba cukrinių runkelių atliekų. 3D spausdinimui šis plastikas yra pats ekologiškiausias. PLA yra tvirtesnis už ABS ir atsparus dilimui bet trapus, spausdinant detales jos nesideformuoja ir taip pat neturi specifinio kvapo, todėl juo lengva spausdinti. Nors ši medžiaga yra ekologiška, tačiau ji turi savo kainą. PLA yra neilgaamžis, veikiant saulės šviesai ir drėgmei maždaug per du metus palapsniui ji suyra. Tiek ABS, tiek PLA yra labai stiprios ir turi daugybę savybių. Pavyzdžiui, jų lydymosi temperatūra yra panaši (ABS 210 – 250 °C, PLA 175 – 210 °C) ir jų yra įvairių spalvų [41] PLA plastiko siūlo kaina už kilogramą svyruoja nuo 10 iki 25 Eur.

1.3.2. Medžiagos betono konstrukcijų gamybai

3D spausdinimo technologija yra paremta priedų gamyba, kurios struktūra yra pastatyta sluoksnis po sluoksnio pagal iš anksto apibrėžtą trijų dimensijų modelį. Kai sluoksnis išspaudžiamas, turi būti pakankamas šlyties stipris, kad forma išlaikytų savo matmenis, atsispirtų deformacijoms dėl savo paties svorio ir virš jo išspausdintų sluoksnių svorio. Santhanam Manu Rahul'as [18] atliko tyrimą, kurio tikslas buvo rasti tokias medžiagos savybes, kad būtų patenkinamas stiprumas, tvirtumas ir išspaudžiamumas. Bandymui buvo pasitelktas bandymų 3D spausdintuvas, kurio spausdinimo sritis 400 × 300 mm (žr. 11 pav.), o 12 pav. pavaizduota schema, rodanti spausdinimo proceso veiksmus.



11 pav. Bandomasis 3D spausdintuvas [18]



12 pav. Spausdinimo proceso schema

Išspausšto elemento skerspjūvis

Jei $V1$ – greitis, kuriuo medžiaga išeina iš purkštuko (žr. 13 pav.), o $A1$ – purkštuko skerspjūvio plotas, tai siurblio išleidimo greitis Q yra:

$$Q = V1 \cdot A1. \quad (1)$$

Jei $A2$ – išspausšto sluoksnio plotas, tuomet spausdinimo greitis $V2$ yra:

$$V2 = \frac{Q}{A2}. \quad (2)$$

Sujungus šias dvi lygtis gaunama:

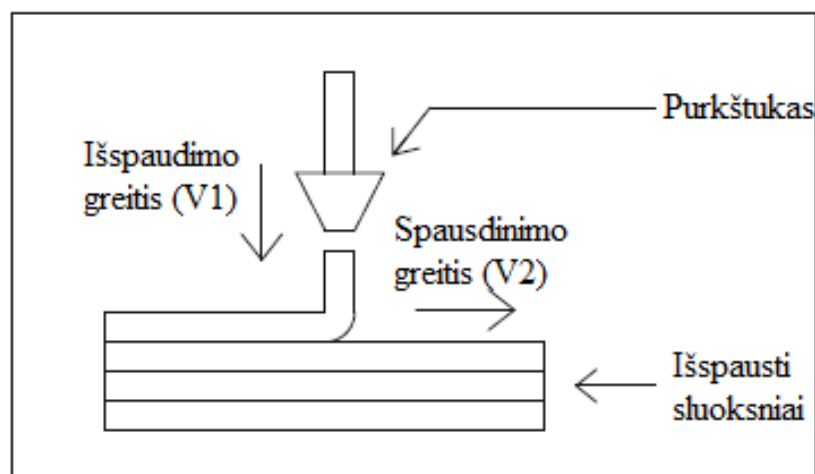
$$V2 = V1 \left(\frac{A1}{A2} \right). \quad (3)$$

Jei priimame, kad išspausšto elemento forma yra stabili, tuomet išspausšto elemento skerspjūvis bus toks pat:

$$V2 = V1. \quad (4)$$

Pagrindinės šio tyrimo išvados [18]:

1. Sluoksniškas statymas yra įmanomas tik tada, kai gaunamos medžiagos įtempis yra tam tikrame intervale. Dėl žemos išeigos įtampių vertės sluoksniai suyra, užkertant kelią tolesnei sluoksnių statybai. Kita vertus, jei debito įtempis yra per didelis, medžiaga yra per kieta, kad būtų galimas išspaudžiamumas. Buvo nustatyta, kad darbiniai mišinių išeigos įtempis yra 1,5–2,5 kPa.



13 pav. Išspaudimo greičio (V_1) ir spausdinimo greičio (V_2) schema

2. Preliminariam etaloniniam mišiniui buvo naudojamas rišiklis - portlandcemenčio ir lakiųjų pelenų derinys. Superplastikatoriaus dozė buvo nustatoma atlikus stiprio ir išspaudžiamumo testus. Mišinys neturėjo stabilumo ir tvirtumo. Be to, jis buvo spausdinamas tik 15 minučių.

3. Pridėjus nanokloto³, pagerėjo mišinio tvirtumas.

Tyrimo metu gauta svarbi išvada [18]. Medžiagos išeigos įtempiui esant žemiau 1,5–2,5kPa diapazono, medžiagai trūksta pakankamo stiprio, kad būtų pasiektas formos stabilumas, o virš šio diapazono atsiranda sunkus medžiagos ekstruziškumas. Tinkamiausias spausdinimo siūlo skersmuo gautas 30mm (purkštuko dydis 30 × 20 mm), kuomet jis išspausdintas vienodai ir be įtrūkimų (žr. 14 pav.).



14 pav. Išspaudžiamumo testas. (a) – iškreiptas sluoksnis, (b) – gerai išspausdintas sluoksnis [18]

Reologiniu⁴ požiūriu į spausdinamąją medžiagą naudinga pridėti lakiųjų pelenų ir kalcinuoto molio. Į medžiagą įmaišius lakiųjų pelenų padidėjo takumas, tačiau tai sumažino šviežio betono mišinio formos stabilumą. Į šį mišinį pridėjus kalcuoto molio pagerėjo formos stabilumas, tačiau tai sukėlė

³ Nanoklotą, iš esmės sudaro sluoksniuoti silikatai. Jie buvo plačiai siūlomi kaip ekonomiškai efektyvūs priedai, siekiant pagerinti mechanines, šilumines ir barjerines polimerų sistemų savybes [21]

⁴ Reologija - (gr. *rheos* - srovė, tekėjimas + *logos* - mokslas; sk. reologija) - mechanikos mokslo šaka, tirianti klampiųjų medžiagų deformaciją ir takumą. Nagrinėja procesus, susijusius su negrįžtama liekamąja deformacija, įtampių relaksacija, įvairių klampiųjų ir plastiškųjų medžiagų tekėjimu [40]

nedidelį ar vidutinį tĕkmĕs sumažĕjimą (atsiŕvelgiant į naudojamo kalcinuoto molio tipą). Taigi, į spausdinimo medŕiagą pridĕjus lakiųjų pelenų ir kalcinuoto molio buvo įrodyta, kad reologiniu poŕiūriu ŕios medŕiagos yra naudingos, iš jų susidarĕ geras takumas ir reikiamas formos stabilumas.

Literatūros apie klampumo pokyčių poveikį yra nedaug. Į betono mišinį pridĕjus polisacharidų polimerų, buvo padidinta savaimĕ tankinančio betono tiksotropija⁵. Tai, įvertinĕs tiksotropiją, įrodĕ J. Assaad'as [19]. Naudodamas betoninĕ reometrą atliko bandymą su betonu, sukant jį pastoviu sukimosi greičiu. Taigi, į spausdinamą medŕiagą naudinga pridĕti polisacharidų polimerų.

Tyrĕjai pasiūlĕ skirtingus parametrus, kuriuos galima naudoti įvertinant ŕvieŕiai spausdinamo betono savybes. Pavyzdŕiui, T.T. Le [20] įvardijo keturis pagrindinius parametrus išspausdintam betonui: išspaudŕiamumą, darbingumą, darbo laiką ir statybumą. Išspaudŕiamumas – galimybĕ išspausti per 9 mm skersmens antgalį. Tokio skersmens antgalis buvo įvertintas išspaudŕiant 300 mm ilgio siūlą tikrinant, ar nėra uŕsikimŕimų ar lūŕių. Darbingumas – buvo įvertintas nustatant ŕlyties miŕinio stiprumą naudojant mentĕs ŕlyties aparatą. Laiko tarpas, per kurį betonas buvo pakankamai darbingas, buvo apibūdintas kaip darbo laikas, o medŕiagos gebĕjimas išlaikyti formą, kai jis yra išspaudŕiamas pavadintas statybumu.

1.4. Spausdinimo eiga ir spausdintuvo veikimas

Paprastai norint 3D spausdintuvu išspausdinti prototipą ar konstrukciją viskas prasideda nuo idĕjos. Kai jau ŕinoma, ką reikĕs spausdinti, reikia idĕją perkelti į kompiuterio programas, t. y. atvaizduoti 2D vaizdu. Projektavimui gali bŕti pasitelkiamos tokios programos kaip *AutoCAD*, *Fusion360*, *SolidWorks* ar interneto svetainĕs kaip *Tinkercad* ir t.t. Taip pat galima parsisiųsti jau sumodeliuotą spausdinį iš internetinĕs svetainĕs, pvz. *Thingiverse.com* ar kitos. ŕie failai turi bŕti išsaugoti *.stl* plĕtinio pavadinimu. Kai turime jau 2D modelį, reikia jį sukarpyti į 3D sluoksnius. Tam galima pasitelkti programą *Cura 14.07*, į kurią įkeliamas *.stl* failas. Pasirenkami parametrai: kokybĕ, uŕpildymas, greitis ir temperatūra, plastiko siūlo parametrai ir 3D spausdintuvo galvutĕs judĕjimas. Pagal ŕiuos parametrus jau galima pamatyti, per kiek laiko pagal ŕiuos kriterijus bus išspausdintas objektas. Paruoŕtas failas įrašomas į laikmeną ir įdedamas į spausdintuvą. Ir tuomet patikrinus ar sukalibruotas įrenginys, įdĕta spausdinimo medŕiaga, galima pradĕti spausdinti.

3D spausdinimas moksliniuose straipsniuose [1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9] daŕnai vadinamas priedų gamyba. 3D spausdintuvu spausdinamas betonas ir betoninĕs konstrukcijos. ŕinomi ŕie priedų gamybos būdai [1]:

- selektyvus⁶ nusodinimas ekstruzijos⁷ būdu;
- purŕkimas;
- riŕimas;
- prisitaikantys stumdomi klojiniai;
- armatūros tinklelis kaip integruotas klojinys.

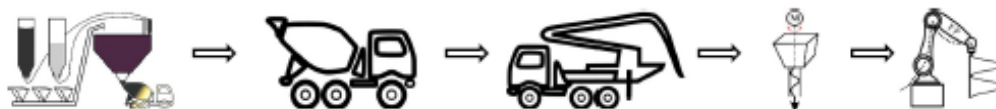
⁵ Tiksotropija - (gr. *thixis* - prisilietimas + *trope* - apsisukimas) - gelių ir drebučių skystĕjimas dĕl mech. poveikio ir grĕŕimas į pradinę būseną [39]

⁶ selektyvūs [lot. *selectus* – išrinktas, atrinktas], pagrĕjstas atranka, atskirasis, išrenkamasis; gebantis išrinkti, atskirti, išskirti [39]

⁷ ekstruzija [angl. *extrusion* < lot. *extrudo* — išstumiu, išspaudŕiu], išspaudimas, ištryŕkimas, išsiliejimas [39]

Statybos bendrovė „CONPrint3D“ išskyrė savo 3D spausdinimo etapus (žr. 15 pav.):

- betono gamyba vietoje;
- transportavimas;
- siurbimas;
- ekstruzija;
- sluoksnių nusodinimas;
- kokybės kontrolė (šviežio ir sukietėjusio betono).



15 pav. 3D spausdinimo proceso etapai [1]

Pagrindiniai koncepcijos „CONPrint3D“ bruožai, išskiriantys ją iš kitų, yra:

- betono 3D spausdinimo pritaikymas šiuolaikinei architektūrai ir konstrukcinis dizainas (aštrūs kampai, tiesios geometrijos, platus monolitiniai skerspjūviai);
- įprastose statybinėse mašinosse įmontuojami betono siurbiai;
- spausdinimo galvutė, kuri leidžia užtikrinti paviršiaus kokybę ir tikslumą.

Šiame magistriniame darbe naudojamo 3D spausdintuvo *Aibecy M18 Pro* veikimas pagrįstas kaitinimo sistema. Naudojamas plastikas PLA manipuliavimo galvutėje įkaitinamas iki 175 – 210 °C ir dar plonesniu siūleliu atkartojant kandiklio formą judinamas pagal koordinates pasirinkus objekto formą. Išliejus visą formą manipulatoriaus galvutė grįžta į savo koordinačių pradžią, o kaitinamas padas pradeda vėsti.

1.5. Teisiniai dokumentai ir reikalavimai

Kadangi 3D pastatų spausdinimui Lietuvoje dar nėra išleistų įstatymų, šiuo metu reikėtų vadovautis dabar Lietuvoje galiojančiais įstatymais ir statybos techniniais reglamentais. Pagrindiniai jų išdėstyti žemiau.

Statybos techninis reglamentas STR 1.12.06:2002 „Statinio naudojimo paskirtis ir gyvavimo trukmė“. Šis statybos techninis reglamentas nustato pastatyto statinio gyvavimo trukmę, atsižvelgiant į statybos produktus, iš kurių jis pastatytas, klimato sąlygas ir naudojimo paskirtį [44].

Statybos techninis reglamentas STR 2.01.01(1):2005 „Esminis statinio reikalavimas „Mechaninis atsparumas ir pastovumas“. Šis techninis reglamentas nustato vieną iš šešių esminių statinio reikalavimų – statinio mechaninio atsparumo ir pastovumo reikalavimus [45].

Statybos techninių reikalavimų reglamentas STR 2.01.01(2):1999 „Esminiai statinio reikalavimai. Gaisrinė sauga“. Šis reglamentas nustato vieną iš šešių esminių statinio reikalavimų – statinio gaisrinės saugos reikalavimus [46].

Statybos techninis reglamentas STR 2.01.01(3):1999 „Esminiai statinio reikalavimai. Higiena, sveikata, aplinkos apsauga“. Šis techninių reikalavimų Reglamentas nustato vieną iš šešių esminių statinio reikalavimų – statinio higienos, sveikatos, aplinkos apsaugos reikalavimus [47].

Statybos techninis reglamentas STR 2.01.01(4):2008 „Esminis statinio reikalavimas „Naudojimo sauga“. Šis statybos techninis reglamentas nustato vieną iš šešių esminių statinio reikalavimų – statinio naudojimo saugos reikalavimus [48].

Statybos techninis reglamentas STR 2.01.01(5):2008 „Esminis statinio reikalavimas „Apsauga nuo triukšmo“. Šis reglamentas nustato vieną iš šešių esminių statinio reikalavimų – apsaugos nuo triukšmo reikalavimus [49].

Statybos techninis reglamentas STR 2.01.01(6):2008 „Esminis statinio reikalavimas „Energijos taupymas ir šilumos išsaugojimas“. Šis techninis reglamentas nustato vieną iš šešių esminių statinio reikalavimų – statinio energijos taupymo ir šilumos išsaugojimo reikalavimus [50].

Statybos techninis reglamentas STR 2.01.02:2016 „Pastatų energinio naudingumo projektavimas ir sertifikavimas“. Šis statybos techninis reglamentas taikomas projektuojant šildomų gyvenamųjų ir negyvenamųjų pastatų (jų dalių) energinį naudingumą, atliekant pastatų energinio naudingumo sertifikavimą, skaičiuojant pastatų (jų dalių) šildymo sistemos šilumos šaltinio projektinę galią [51].

Statybos techninis reglamentas STR 2.01.06:2009 „Statinių apsauga nuo žaibo. Išorinė statinių apsauga nuo žaibo“. Šis statybos techninis reglamentas nustato išorinės statinių apsaugos nuo žaibo projektavimo, įrengimo ir naudojimo reikalavimus Lietuvos Respublikos teritorijoje [52].

Statybos techninis reglamentas STR 2.01.07:2003 „Pastatų vidaus ir išorės aplinkos apsauga nuo triukšmo“. Šio reglamento tikslas – nustatyti pastatų vidaus ir išorės aplinkos apsaugos nuo triukšmo kokybės reikalavimus, pastato atitvarų ir jo dalių akustinių rodiklių vertes, kad pastatuose ir šalia jų girdimas triukšmo lygis nekeltų grėsmės žmonių sveikatai ir atitiktų darbui, poilsiui bei miegui būtino akustinio komforto kokybę [53].

Statybos techninis reglamentas STR 2.05.05:2005 „Betoninių ir gelžbetonių konstrukcijų projektavimas“. Šis statybos techninis reglamentas nustato privalomuosius techninius statinių iš betono, gelžbetonio ir iš anksto įtemptojo gelžbetonio konstrukcijų, pagamintų iš sunkiojo, lengvojo ir smulkiagrūdžio betono, kurio tankis ne mažesnis kaip 2000 ir ne didesnis kaip 2800 kg/m³, ir naudojamų esant ne aukštesnei kaip +50 °C ir ne žemesnei kaip – 40 °C temperatūrai, projektavimo reikalavimus [54].

Statybos techninis reglamentas STR 2.05.04:2003 „Poveikiai ir apkrovos“. Šis statybos techninis reglamentas nustato poveikius ir apkrovas, veikiančius statinių laikančiąsias konstrukcijas [55].

Statybos techninis reglamentas STR 2.09.02:2005 „Šildymas, vėdinimas ir oro kondicionavimas“. Šis statybos techninis reglamentas taikomas projektuojant ir įrengiant pastatų ir inžinerinių statinių patalpų šildymo, vėdinimo ir oro kondicionavimo sistemas [56].

Lietuvos Respublikos statybos įstatymas Nr. I-1240, paskelbtas 1996 m. kovo 19 d. Šis įstatymas nustato visų Lietuvos Respublikos teritorijoje, jos išskirtinėje ekonominėje zonoje ir kontinentiniame šelfe statomų, rekonstruojamų ir remontuojamų statinių esminius architektūros reikalavimus, trečiųjų asmenų interesų apsaugos reikalavimus, statybos techninio normavimo, statybinių tyrimų, statinių projektavimo, statinių projektų ir statinių ekspertizės, statybos, statybos užbaigimo, statinių naudojimo ir priežiūros, griovimo tvarką, statybos dalyvių, viešojo administravimo subjektų, statinių savininkų (ar naudotojų) ir kitų juridinių ir fizinių asmenų veiklos šioje srityje principus ir atsakomybę [57].

1.6. 3D betono spausdinimo privalumai statyboje

Statybos trukmė

Pirmasis 3D spausdinimo technologijos panaudojimo statyboje proveržis įvyko 2014 m. Įmonė „WinSun“ (Kinija) tuo metu per 24 h išspausdino 10 namų. Buvo panaudotas 150 m ilgio, 10 m pločio ir 6 m gylio 3D spausdintuvas, kuris naudojo betono ir stiklo pluošto medžiagas [3].

Ta pati kompanija „WinSun“ 2016 m. pastatė pirmąjį 250 m² biurą. Pastatą išspausdino mobilus spausdintuvas su robotine ranka [3].

Statybos trukmę mažina tam tikri statybos aspektai, kurie bus aptarti kituose poskyriuose.

Statybos kaštai

Pirmojo 38 m² pastato išspausdinto 3D spausdintuvu Rusijoje kaina siekė tik 10 134 Eur. Kainą sudarė visos konstrukcijos ir medžiagos: pamatai, stogas, instaliacija, vidinė ir išorinė apdaila, sienų izoliacija, langai ir grindys [26].

Nereikia atramų

Spausdinant pastatą iškyla problema kaip automatizuotai ir be žmogaus įsikišimo tęsti darbą virš angokraščių. Keičiant spausdinimo galvutės ėjimo greitį ir medžiagos išspaudimo kiekį susidaro tarpai (žr. 16 pav., *a, b, c*) [2, 7].

Tokiu būdu spausdinimas nesustoja. Betonui sukietėjus, kelių valandų bėgyje angokraščiai lengvai pašalinami plaktuku (žr. 16 pav., *d, e, f*).

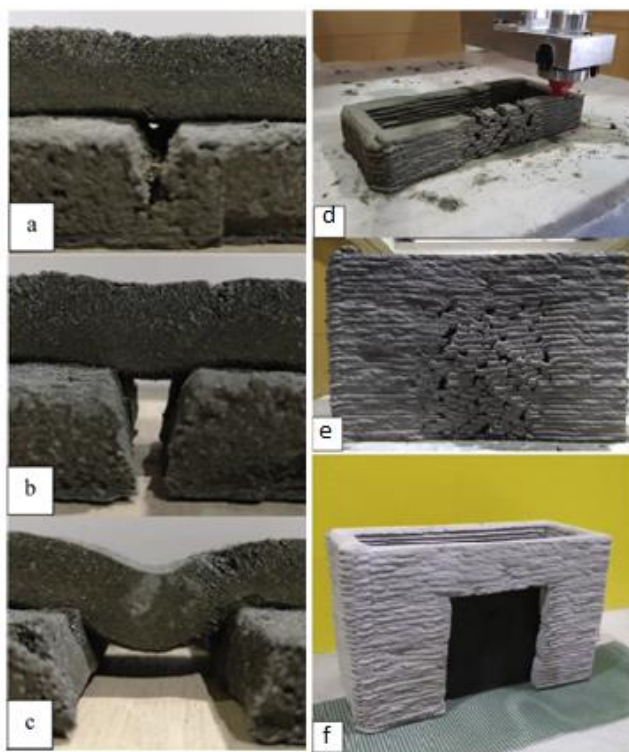
Nereikia klojinių

Jau keletą dešimtmečių statyba neapsieina be klojinių statybos. Tai daug laiko, darbo jėgos, medžiagų ir išlaidų (nuo 28 iki 50 proc. visos betono struktūros kainos) reikalaujanti statybos dalis, kurioje yra sumontuojama pastato ar jo dalies forma betonavimui.

Iššūkis yra pertvarkyti aukštos kokybės cementines medžiagas taip, kad jos atitiktų spausdinimui keliamus reikalavimus ir atsirastų galimybė pereiti nuo klojinių technologijos prie labiau automatizuotų priedų gamybos būdų. 3D spausdintuvas gali sumažinti išlaidas. Cementinė medžiaga naudojama spausdintuve gali išlaikyti savo formą be jokių klojinių [7, 4].

Statybinių medžiagų taupymas

Šiuo metu statant pastatą reikia numatyti pastato šiltinimą, o tai mažina pastato tūrį, ilgina darbų laiką ir kaštus. Taip pat naudojama armatūra pastatui sutvirtinti ir pan. Naujoviška statybinė medžiaga turėtų pakeisti įprastą šilumos izoliaciją. Taigi, laikančioji konstrukcija ir izoliacinė medžiaga galėtų būti sujungtos į vieną struktūrą, viename gamybos etape. Tai sumažintų statybos sąnaudas ir padarytų statybų procesą ekologiškai tvaresnį [5].



16 pav. Spausdinimo eigoje tarpų spausdinimas ir jų panaudojimas: a) 6 mm tarpo įtaka konstrukcijai; b) 10 mm tarpas; c) 28 mm tarpas; d) spausdinimas su atramomis; e) prieš perdirbant; f) po apdirbimo [2]

Darbo sauga

Statybvietėse žūsta ir susižaloja daugybė žmonių, dėl darbo saugos neužtikrinimo ar nesilaikymo. Nauja 3D pastatų spausdinimo technologija, kai viskas yra automatizuota leidžia dirbti saugesnėje aplinkoje. Spausdinimo procesui aptarnauti yra reikalingi du darbuotojai: specialiai apmokytas mašinų operatorius ir profesionalus kvalifikuotas darbuotojas, todėl tikimybė susižaloti labai maža.

Poveikis aplinkai

Visuomenėje didėjantis susirūpinimas tvarumu skatina novatoriškų statybos procesų atsiradimą. Statybų pramonės poveikis aplinkai yra gana aukštas (40 proc. sudaro viso energijos suvartojimo, 38 proc. išmetama viso šiltnamio efektą sukeliančių dujų, 12 proc. viso geriamojo vandens suvartojimo ir 40 proc. kietųjų atliekų, taip pat ir CO₂ išmetimo dėl cemento gamybos). 3D spausdinti pastatai turi ekologinį poveikį ir taupo šiuos išteklius [9, 6].

Konstrukcijų tikslumas

Spausdinant selektyvaus nusodinimo ekstruzijos metodu yra iš anksto sumaišomas šviežias betonas ir per ištisinio pavidalo spausdinimo galvutę išspaudžiamas ištisiniu siūlu pagal skaitmeninio planavimo duomenis – pateiktas koordinatas ir spausdintuvo veikimo greitį bei kinematiką. Ekstruzija šiame kontekste reiškia per spausdinimo galvutės purkštuką išspaudžiamos medžiagos srautą, kuri kontroliuojama spausdinimo algoritmas mechaniniu įtaisu.

Labai standžios konsistencijos betonas idealiai atkartoja ekstruderio kandiklio formą. Kaip ir kiekvienas ekstruzijos pagrindu pagamintas 3D spausdintuvas, pagrindinės šio spausdintuvo dalys yra spausdinimo galvutė, iš kurios išpilama medžiaga ir padėties nustatymo sistema

(manipulatorius), nešanti spausdinimo galvutę pagal koordinates. Kadangi manipulatorius juda pagal tikslias koordinates, spausdinimo tikslumas yra arti 100 %, dėl šios priežasties galima spausdinti ypatingai sudėtingas konstrukcijas. Manipulatorius taip pat turi užtikrinti betono tiekimą į spausdinimo galvutę per žarnas arba vamzdžiu [10].

1.7. 3D betono spausdinimo trūkumai statyboje

Netinkami dabartiniai bandinių bandymo metodai

Klasikinė kubo ar cilindro bandymo koncepcija nebeatitinka reikalavimų. Suformuoti kubo pavyzdžiai negali būti paruošti tradiciniu būdu, be to, bandymuose naudojamas betoninis cilindrinis kubas nebūtų 3D spausdinto betono atstovas. Stiprumo testui įvykdyti reikia iš naujo atlikti tokius metodus kaip oro pralaidumo bandymus, skirtu padengti 3D spausdinto elemento paviršių dėl jo sluoksniuotos struktūros.

Apibendrinant galima pasakyti, kad 3D spausdinto betono atveju remiantis priedų gamyba, dabartiniai konstrukcijų ir patvarumo projektavimo kodai turi būti peržiūrėti, atsižvelgiant į anizotropinį⁸ elgesį. Trumpalaikėje perspektyvoje trūkstami tinkamų dizaino taisyklių ir efektyvumo bandymų protokolai kliudys skaitmeninės gamybos proveržiui betono pramonėje [6, 5].

Dabartinė statybos technologija turi daugybę įstatymų, reglamentų, taisyklių kaip statyti ir kokios medžiagos turi būti, kaip organizuoti statybas. Tačiau dar nėra taisyklių ir įstatymų pritaikytų 3D betono spausdinimui ir tenka taikytis prie esamų.

Personalo pokyčiai

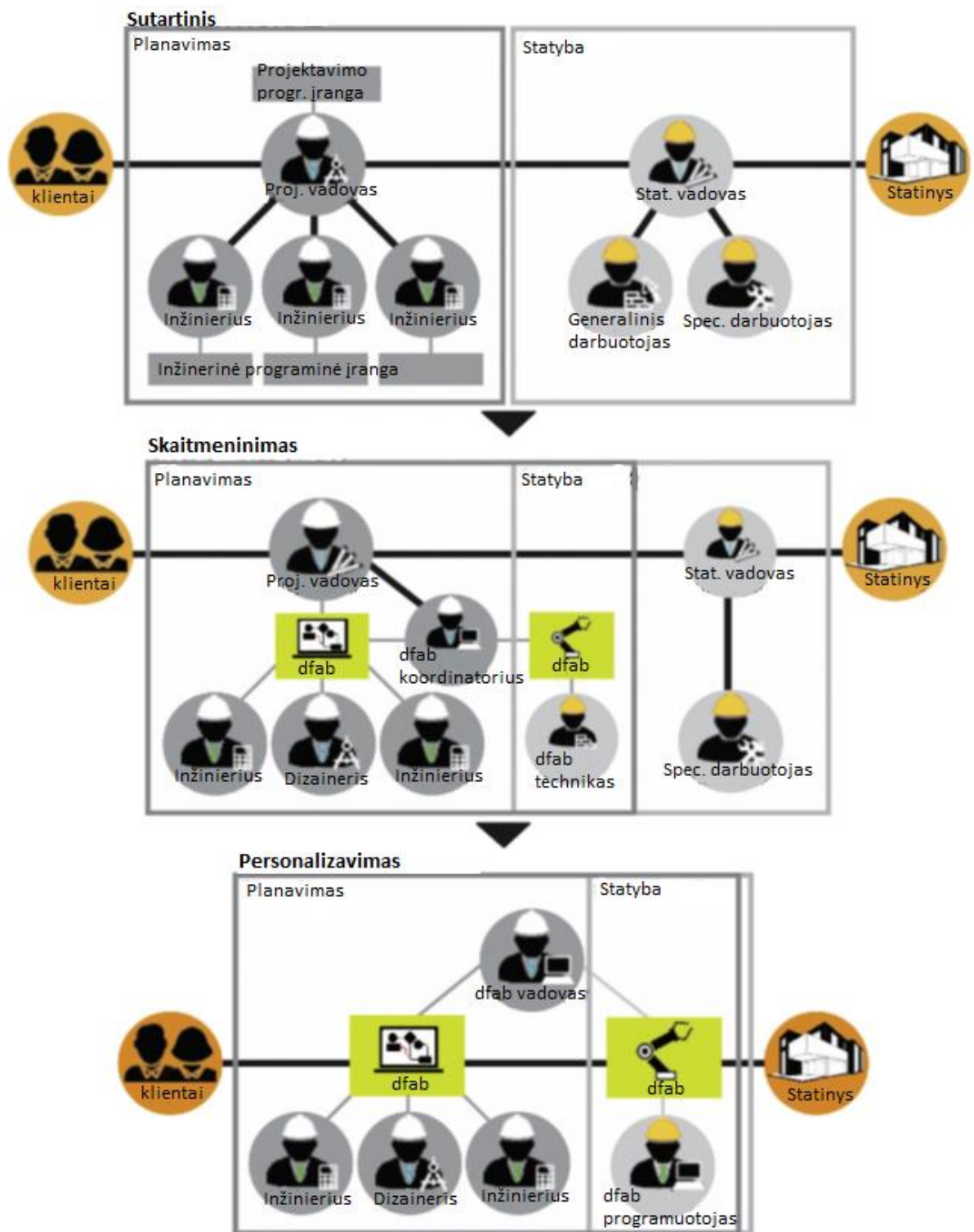
Atsiranda neišvengiami personalo pokyčiai (žr. 17 pav.). Gali būti automatizuojami mažiau kvalifikuoti darbai (ypač darbo vietoje). Naujausi tyrimai rodo [6], kad tokios technologijos sumažins užimtumą ir automatizuotas darbas pakeis žmogaus darbo pobūdį, kuris taps labiau specializuotas.

Žemos kvalifikacijos darbuotojų skaičius sumažės didėjant aukštos kvalifikacijos specialistų skaičiui. Rezultatas – aukštos kvalifikacijos robotikos, programavimo ir technologijų ekspertai užims svarbią vietą statybos pramonėje [6].

Produktyvumas

Šiais laikais 3D spausdinimas sulaukia vis didesnio dėmesio. Kai kuriose pramonės šakose priedų gamyba ir greitas prototipų kūrimas jau yra kasdienė realybė. Tačiau statybos pramonėje kasdienybė yra kitokia. Mažesnės šalys neinvestuoja į naujas technologijas dėl konservatyvaus požiūrio į šiuolaikines technologijas. Statybų pramonė yra rizikinga, turinti nemažai techninių, ekonominių ir socialinių iššūkių, o tai ir lemia kodėl ne visos šalys į tai noriai investuoja [6].

⁸ Anizotropija – medžiagos fizikinių savybių nevienodumas skirtingomis kryptimis



17 pav. Statybos darbų eigos raida susijusi su statybos pramonės skaitmenizavimu: Sutartinis – dabartinė struktūra, Skaitmeninimas – pereinamoji sandara ir Personalizavimas – galutinė numatoma statybos darbų sandara [6]

Konservatyvi statybos pramonė mažai investuoja į mokslinius tyrimus ir plėtrą. Tai galioja ir ekonomiškai išsivysčiusioms šalims. Būtent dėl to statybos procesai beveik nepasikeitė per pastaruosius dešimtmečius.

2. Tyrimo metodika

2.1. Daugiakriteris vertinimo metodas SAW

Pasaulyje yra sukurta dešimtys daugiakriterių vertinimo metodų (žr. 4 lentelę) [14], tačiau dažniausiai naudojami SAW, COPRAS ir TOPSIS metodai.

4 lentelė. Daugiakriterių vertinimo metodų klasifikacija [16]

Metodų klasė	Informacija, gauta iš sprendimą priimančio asmens, apie rodiklius	Metodai ir jų klasės
Metodai pagrįsti daugiakriterine naudingumo teorija	Kiekybiniai matavimai	SAW, TOPSIS, TOPSIS-G, COPRAS, COPRAS-G, ARAS, MOORA, VIKOR, MultiMOORA
Analitinės hierarchijos ir neapibrėžtų aibių metodai	Kokybiniais matavimams suteikiamas kiekybinis pavidasas	Analitinis hierarchijos procesas (AHP) Metodai naudojantys neapibrėžtas aibes (Fuzzy) (Fuzzy TOPSIS), (Fuzzy AHP)
Verbalinės analizės sprendimų metodai	Kokybiniai matavimai, nepereinama prie kiekybinių matavimų	Verbaliniai metodai: ZAPROS, PARK, ORKCLASS, CLARA, DIFLASS, CIKL
Lyginamosios preferencijos metodai	Kiekybiniai ir kokybiniai matavimai	ELECTRE metodai, PROMETHEE metodai, MELCHIOR, UTA, MAUT, TACTIC metodai ir kt.

Paprastasis svertinis metodas – SAW (angl. *Simple Addative Weighting*) yra pat seniausias (1968 m.) ir plačiausiai naudojamas kiekybinis daugiakriteris vertinimo metodas apibūdinantis tam tikrą procesą ir jo reikšmingumą [12, 17]. Jis gali būti naudojamas visose srityse – medicinoje, statyboje, filosofijoje ir kitose. Tam tikriems kriterijams yra svarbi didžiausia vertė, kuri yra geriausia, o kitiems geriausia – mažiausia vertė. Kriterijų matavimo vienetai taip pat skiriasi. Daugybė daugiakriterių vertinimo metodų pagrįsti skirtingais loginiais principais ir turinčiais skirtingą sudėtingumo lygį ir bruožus. Nėra „geriausio“ vertinimo metodo. Todėl reikia naudoti kelis daugiakriterius vertinimo metodus. Iš gautų įverčių išvesti vidurkį ir taip įvertinti daugialypius sudėtingus procesus ir objektus [22].

SAW naudoja tik maksimalius vertinimo kriterijus, tuo tarpu minimizuojantys vertinimo kriterijai turėtų būti pakeisti į maksimalius atitinkamomis formulėmis. Šis apribojimo nėra COPRAS metode (sudėtingas proporcingas įvertinimas).

SAW metodo žingsniai

1. Sudaroma $[m \times n]$ palyginimo matrica X (5) iš m alternatyvų ir n kriterijų:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

2. Nustatoma, kuri kiekvieno rodiklio reikšmė yra naudingiausia – kai ji yra minimali ar maksimali.
3. Apskaičiuojama normalizuota matrica \bar{X} . Jei kriterijus yra geresnis kuo didesnis, tuomet kiekvienas palyginimo matricos narys x_{mn} yra dalijamas iš maksimalios rodiklio reikšmės

x_n^{max} (6), o jei kriterijus yra geresnis kuo mažesnis, tuomet minimali rodiklio reikšmė x_n^{min} (7) yra dalijama iš kiekvieno palyginimo matricos nario:

$$\bar{x}_{mn} = \frac{x_{mn}}{x_n^{max}}; \quad (6)$$

$$x_{mn} = \frac{x_n^{min}}{x_{mn}}. \quad (7)$$

Gautos reikšmės surašomos į normalizuotą matricą (8):

$$\bar{X} = \begin{bmatrix} \bar{x}_{11} & \bar{x}_{12} & \cdots & \bar{x}_{1n} \\ \bar{x}_{21} & \bar{x}_{22} & \cdots & \bar{x}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{x}_{m1} & \bar{x}_{m2} & \cdots & \bar{x}_{mn} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

4. Nustatomas kiekvieno kriterijaus reikšmingumas q_n , kuris turi tenkinti sąlygas (9,10):

$$q_1 + q_2 + \cdots + q_n = 1; \quad (9)$$

$$0 < q_n < 1. \quad (10)$$

Sudaroma reikšmingumo matrica Q (11):

$$Q = \begin{bmatrix} q_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & q_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & q_n \end{bmatrix}. \quad (11)$$

5. Gaunama reikšmių matrica A (12):

$$A = \bar{X} \times Q = \begin{bmatrix} \bar{x}_{11} & \bar{x}_{12} & \cdots & \bar{x}_{1n} \\ \bar{x}_{21} & \bar{x}_{22} & \cdots & \bar{x}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{x}_{m1} & \bar{x}_{m2} & \cdots & \bar{x}_{mn} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} q_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & q_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix}. \quad (12)$$

6. Apskaičiuojama rodiklių verčių suma A_m (13). Iš reikšmių matricos gauname rodiklių vertes:

$$A_m = a_{m1} + a_{m2} + \cdots + a_{mn}. \quad (13)$$

7. Sudaroma prioritėtų eilutė. Gautos kiekvienos alternatyvos kriterijų verčių sumos sunumeruojamos nuo didžiausio iki mažiausio, kur didžiausias yra geriausias ir atvirkščiai.

SAW metodo privalumai

- SAW metodo kriterijus A atspindi pagrindinę sąvoką, kuria grindžiami kiekybiniai daugiakriteriniai vertinimo metodai, susidedantys iš kriterijų integravimo vertės ir reikšmingumo į vieną dydį [11, 17].
- Metodo skaičiavimo algoritmas nėra sudėtingas, įgyvendinama be kompiuterio pagalbos arba pritaikant labai paprastas kompiuterines programas [11, 17].
- Įvertintos SAW kriterijaus normalizuotos vertės A padeda vizualiai nustatyti alternatyvų skirtumus ir juos palyginti [11, 17].

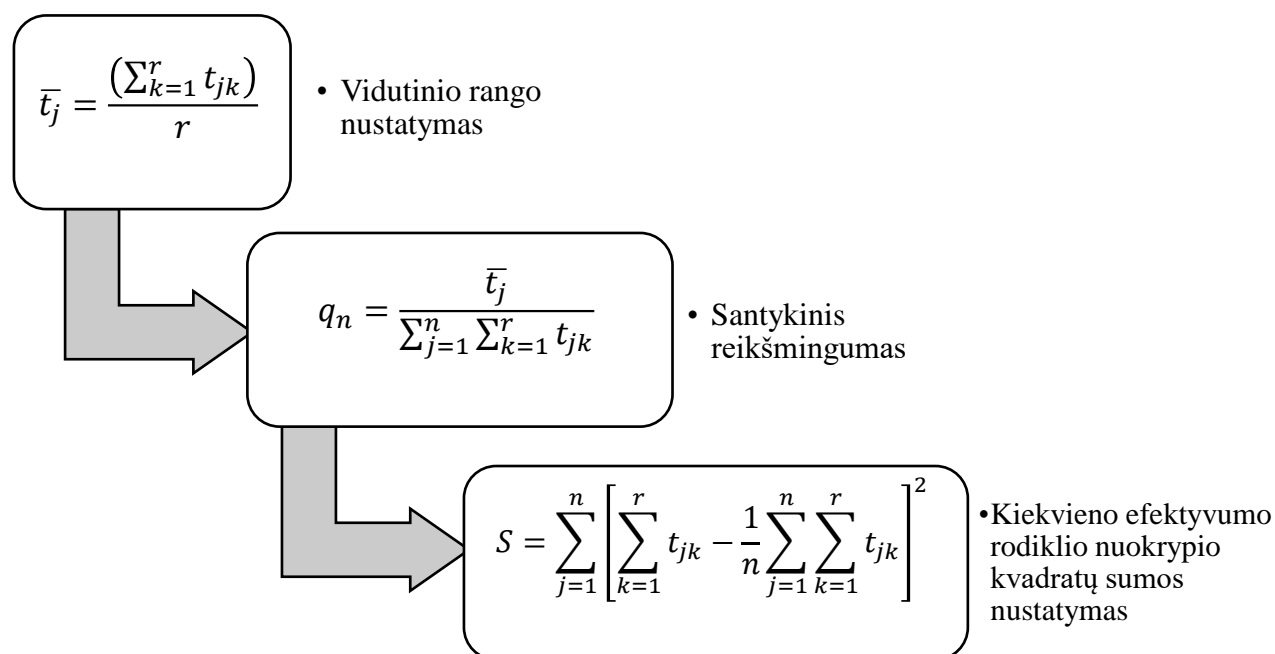
SAW metodo trūkumai

- Visos x_{ij} kriterijų vertės turėtų būti maksimalios. Minimalius reikia pakeisti į maksimalius pagal (1) formulę prieš pradėdant tolesnius skaičiavimus [11, 17].
- Visos kriterijų x_{ij} reikšmės turi būti teigiamos [11, 17].
- SAW pateikiami įverčiai ne visuomet atspindi tikrąją padėtį, gautas rezultatas gali būti nelogiškas, pvz. vieno konkretaus kriterijaus reikšmės gali labai skirtis nuo kitų [11, 17].

SAW metodas visiškai nejautrus reikšmių pirminėms vertėms. Tai reiškia, kad, kai naudojamas šis metodas, sprendimų priėmimo matricos elementų ir reikšmių vertėms neturėtų būti taikomi jokie apribojimai [12].

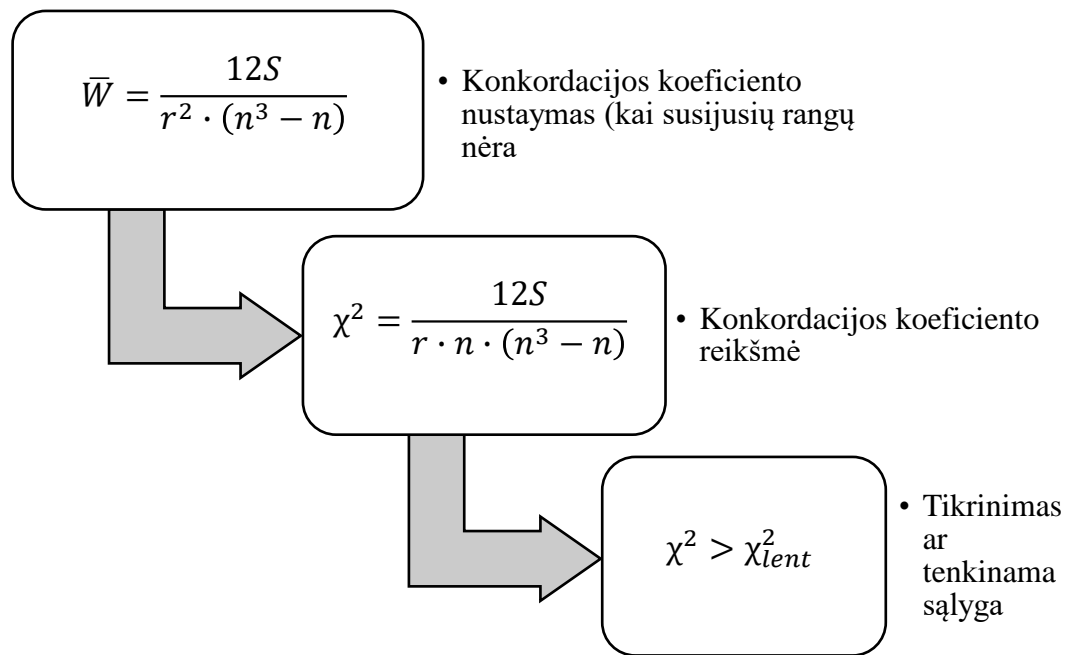
2.2. Ekspertų apklausos vertinimas

Atestuotų specialistų nuomonių suderinimo algoritmas pateiktas 18 ir 19 paveikslėliuose.



18 pav. Ekspertų apklausos suderinimo algoritmas [sukurta autoriaus]

Šiose formulėse: t_{jk} – k eksperto j -ojo rodiklio įvertinimas; r – ekspertų skaičius; n – efektyvumo rodiklių skaičius [25].



19 pav. Ekspertų apklausos suderinimo algoritmas (18-o paveikslėlio tęsinys) [sukurta autoriaus]

Paskutinėje šio algoritmo patikrinamojoje formulėje χ_{lent}^2 yra norminė reikšmė, priklausanti nuo laisvumo laipsnio ($\nu = n - 1$) ir reikšmingumo lygio. Jei ši sąlyga tenkinama, laikoma, kad ekspertų nuomonės suderintos [25].

2.3. Konstrukcijų skaičiavimo kriterijai

Statybinėje mechanikoje vertikalus masyvus strypas, apkrautas gniuždymo jėga yra vadinamas kolona. Kolonos atramos bus įtvirtintos standžiai ir turės reakcijas R_x, R_y, M_z [58]. Šiame skyrelyje bus aptarti kriterijai, kurie bus naudojami įvertinant geriausią kolonos formą.

Kaina

Kainos skaičiavimams bus pasitelkta *Cura* programa. Į ją įkėlus sumodeliuotos formos STL failą ir pasirinkus vienodus parametrus visoms formoms bus automatiškai paskaičiuotas prototipo gamybai reikalingas siūlo ilgis pagal kurį būtų galima apskaičiuoti prototipo kainą. Tačiau pakaitintas plastikas išėjęs pro manipulatoriaus galvutę yra mažesnio skersmens, todėl tiksliai apskaičiuoti būtų sudėtingiau. Kainai apskaičiuoti bus naudojamos svarstyklės. Sužinojus gaminio masę bus galima apskaičiuoti prototipo kainą:

$$K = m \cdot \frac{k}{1000}; \quad (20)$$

čia K – kaina, Eur; m – masė, g; k – vieno kilogramo plastiko kaina, Eur.

Laikas

Konstrukcijos paskaičiavimo laikas bus apskaičiuotas automatiškai *Cura* programoje. Į ją įkėlus modelio STL failą ir pasirinkus vienodus kiekvienai kolonos formai atitinkamus parametrus, tokius kaip kokybė, užpildymas, greitis ir temperatūra, plastiko siūlo parametrus ir greičius, programa automatiškai paskaičiuos prototipo spausdinimo laiką minutėmis.

Stiprio atsarga

Didžiausių normalinių įtampių teorija teigia, kad pavojingas kūno būvis susidaro kai vienas svarbiausiasis įtempis prilygsta stiprumo ribai (arba takumo ribai):

$$\sigma_{U,g} \leq \sigma_1 \leq \sigma_{U,t}; \quad (21)$$

čia $\sigma_{U,g}$ – gniuždomojo stiprumo riba, $\sigma_{U,t}$ – tempiamojo stiprumo riba [59].

Ribiniai ir leistinieji įtempiai ašinio apkrovimo atveju skaičiuojami žinant medžiagos ribines charakteristikas. Ribinis įtempis tempimo atveju randamas:

$$\sigma_{lim} = \frac{R_{lim}}{A}; \quad (22)$$

čia R_{lim} – ribinė apkrova.

Skaičiavimai pagal leistinus įtempis atliekami taikant formulę:

$$\sigma_{all} = \frac{\sigma_{lim}}{n}; \quad (23)$$

čia n – stiprumo atsargos koeficientas.

Stiprumo atsargos koeficientas yra didesnis už vienetą skaičius [58, 60].

Santykis tarp ribinės ir leistinosios apkrovų yra vadinamas stiprumo atsargos koeficientu:

$$n = \frac{\text{ribinis įtempis}}{\text{leistinieji įtempiai}} = \frac{\sigma_{lim}}{\sigma_{all}}. \quad (24)$$

Kad konstrukcijoje nesusidarytų liekamųjų deformacijų, plastinių medžiagų ribiniu įtampiu laikoma takumo riba tempiant σ_{Yt} . Tuomet stiprumo atsargos koeficientas pagal takumo ribą žymimas n_Y ir apskaičiuojamas:

$$n_Y = \frac{\sigma_{Yt}}{\sigma_{max}}. \quad (25)$$

Trapių ir mažai plastiškų medžiagų ribiniu įtampiu laikoma stiprumo riba tempiant σ_{Ut} . Tuomet gaunama:

$$n_U = \frac{\sigma_{Ut}}{\sigma_{max}}; \quad (26)$$

čia n_U – stiprumo atsargos koeficientas [58, 60].

Atsargos koeficientas (patikimumo koeficientas) – medžiagos pasipriešinimo ir mechaninio poveikio funkcijų reikšmių santykis.

Stiprumas – konstrukcijos ar jos elemento savybė nesuirti dėl apkrovų ar kitų mechaninių veikslių.

Stiprumo riba – medžiagos savybės rodiklis, didžiausias sąlyginis įtempis, kurį atlaiko medžiagos bandinys.

Stiprumo sąlyga – nelygybė, apribojanti tam tikros įtampių funkcijos reikšmės didumą ir tuo užtikrinanti pakankamą konstrukcijos elemento ar visos konstrukcijos stiprumą.

Kritinė klupdymo jėga

Oilerio formulė [60]:

$$F_{kr} = \frac{\pi^2 EI_{min}}{(\mu L)^2}, \quad (27)$$

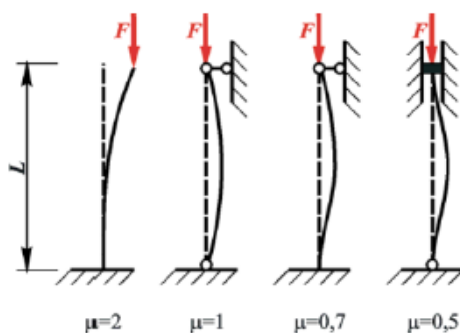
F_{kr} – maksimali kritinė jėga veikianti vertikaliai

E – medžiagos tamprumo modulis

I_{min} – minimalus skerspjūvio inercijos momentas

μ – kolonos galų įtvirtinimo sąlygų koeficientas (žr.20 pav.)

L – kolonos ilgis



20 pav. Kolonos koeficiento reikšmės pagal įtvirtinimo tipą

Kolonos forma yra stabili, kol tenkina sąlygą $F < F_{kr}$.

Įtempiai

Vidinių jėgų komponentų, veikiančių normalės kryptimi, intensyvumas vadinamas normaliniu įtapiu ir žymimas σ :

$$\sigma = \lim_{A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_n}{\Delta A}. \quad (28)$$

čia ΔA – labai mažas plotelis elemente, kuris veikiamas jėga [58].

Vidinių jėgų komponentų, veikiančių pjūvio plokštumoje, intensyvumas vadinamas tangentine įtapiu ir žymimas τ :

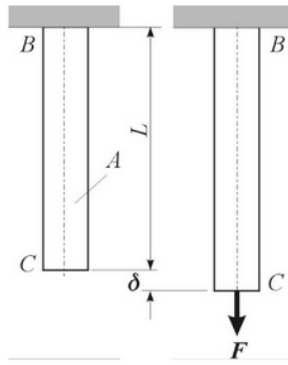
$$\tau = \lim_{A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_t}{\Delta A}. \quad (29)$$

čia ΔF_t – atstojamosios jėgos komponentė veikianti pačioje pjūvio plokštumoje [58].

Deformacijos

Ašinio apkrovimo atveju, veikiant F jėgai, L ilgio kolona pailgėja (žr. 21 pav.) δ dydžiu. Kai kolonos skerspjūvis A yra kintamas, bet kuris mažas elementas Δx , veikiamas F jėgos, pailgės $\Delta \delta$ dydžiu. Elemento Δz deformacija bus:

$$\varepsilon = \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{\Delta \delta}{\Delta z} = \frac{d\delta}{dz}. \quad (30)$$



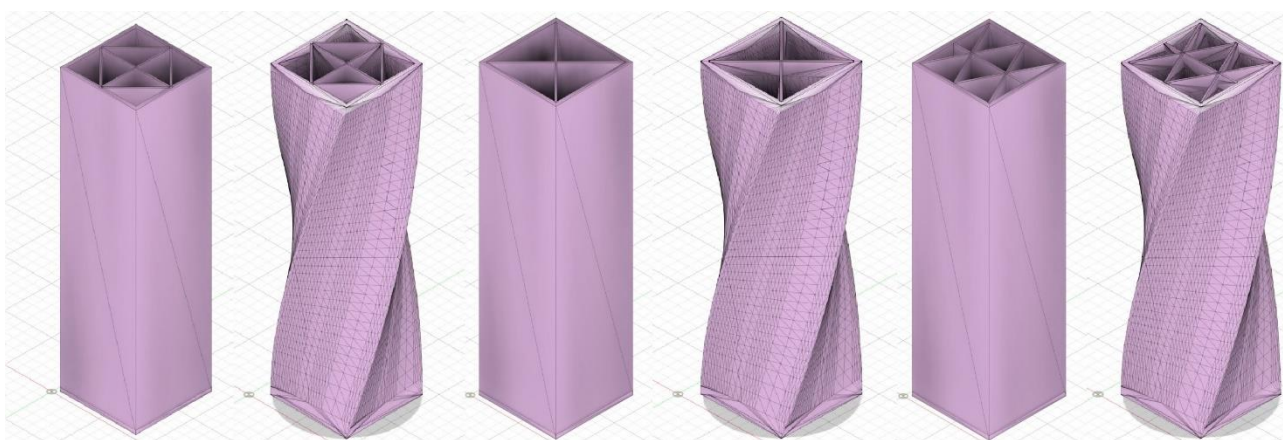
21 pav. Ašinio apkrovimo pavyzdys [58]

3. Tiriamoji dalis

Šiame skyriuje bus aprašytos sumodeliuotų kolonų formos, pagal atliktos atestuotų specialistų apklausos rezultatus, patikrinta ar jų nuomonės suderintos. Naudojantis programomis *Cura* bus apskaičiuotas prototipų išspausdinimo laikas ir sunaudotų medžiagų kaina, bei naudojantis programa *SolidWorks* apskaičiuotos kolonų konstrukcijų kritinė klumpdymo jėga, stiprio atsarga ir ašiniai poslinkiai. Visi apskaičiuoti rezultatai bus apdoroti daugiakriteriu vertinimo metodu SAW ir atrinkta racionaliausia kolonos forma pagal pasirinktus kriterijus.

3.1. Sumodeliuoti kolonų prototipų modeliai

Programoje *SolidWorks* sumodeliuotos šešios skirtingos kolonos. Kolonos viena nuo kitos skiriasi savo vidine rašto forma ir susisukimo kampu. Vidus pasirinktas trijų rūšių, o susisukimo kampai pasirinkti 0° ir 90°. Kolonų vidus sukasi kartu su išorės sienelėmis (žr. 22 pav.).



22 pav. Sumodeliuotos formos 1-6 [sukurta autoriaus]

Priimama, kad visiems kolonų prototipų skaičiavimams pasirinkta vienoda medžiaga (t. y. betonas) su vienodomis savybėmis (žr. 5 lentelę) ir vienodomis skerspjūvio savybėmis (žr. 6 lentelę).

5 lentelė. Skaičiuojamojo betono C25/30 priimtos charakteristikos

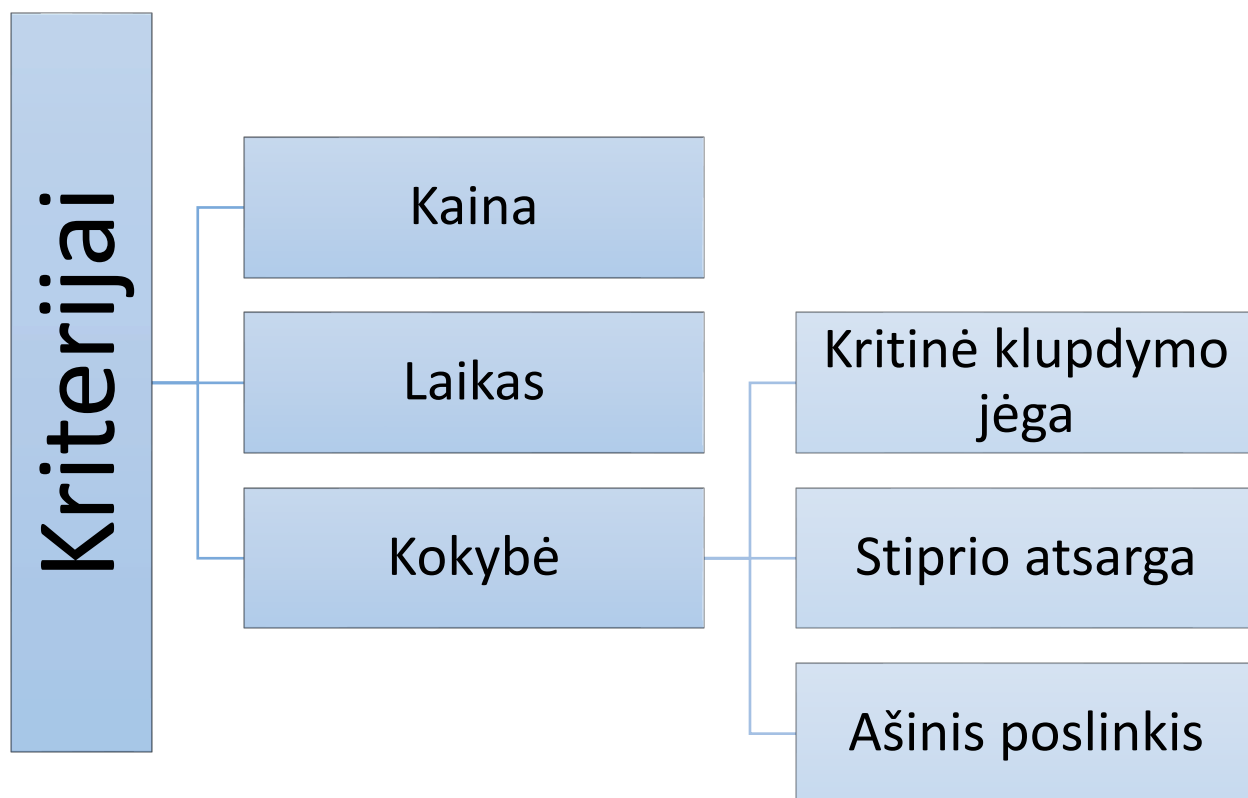
Charakteristika	Skaitinė reikšmė	Matavimo vienetai
Takumo riba tempiant	25	N/mm^2
Stiprumo riba tempiant	30	N/mm^2
Tamprumo modulis	30000	N/mm^2
Tankis	2300	kg/m^3
Puasono koeficientas	0,2	N/A

6 lentelė. Kolonų skerspjūvio savybės

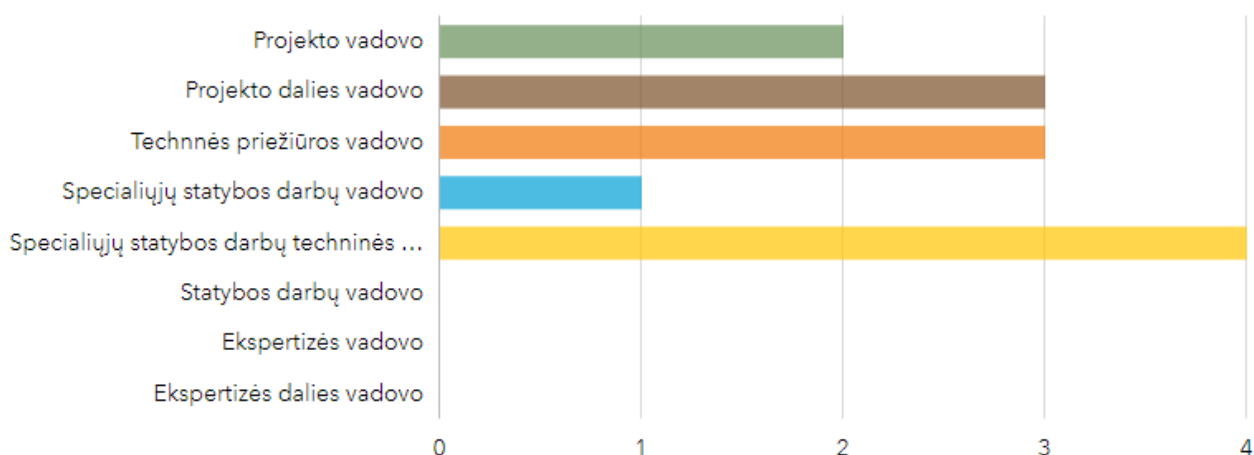
Parametro pavadinimas	Žymėjimas	Parametro dimensija	Skaitinė reikšmė
Pagrindo ilgis ir plotis	B	mm	600
Sienučių storis	S	mm	40
Kolonos aukštis	H	mm	3000
Susukimo kampas	α	°	0; 90

3.2. Ekspertų nuomonių suderinimo tikrinimas

Pagrindiniai kriterijai vertinant bet kurį projektą yra kaina, laikas ir kokybė. Šiame darbe kolonų formas pasirinkta vertinti pagal sunaudotų medžiagų kainą, išspausdinimo laiką, o kokybę išskaidant į kritinę klupdymo jėgą, stiprio atsargą ir ašinį poslinkį (žr. 23 pav.). Norint tinkamai vykdyti tyrimą buvo atlikta kvalifikacijos atestatą turinčių ekspertų (24 pav.) apklausa (žr. 6 priedą) ir pateikta jų nuomonė apie pateiktus kriterijus.



23 pav. Kriterijų skaidymas [sukurta autoriaus]



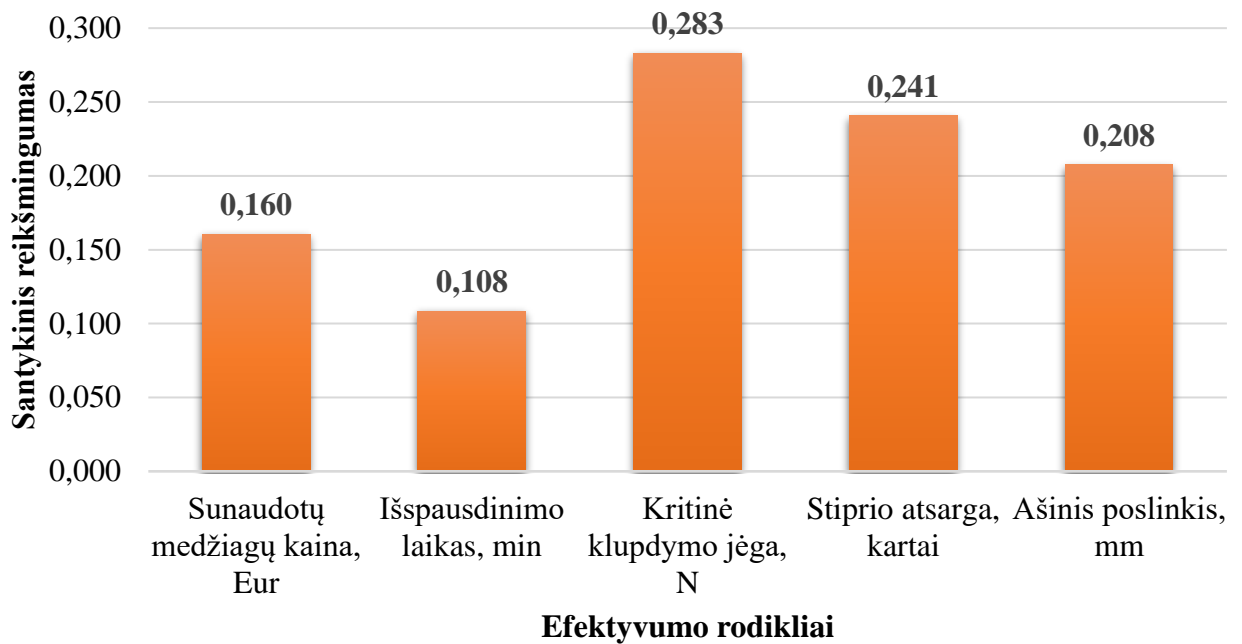
24 pav. Apklaustųjų pasiskirstymas pagal turimus kvalifikacijos atestatus

Atestuotų specialistų nuomonės suderinamumo skaičiavimas pateiktas 7 lentelėje, kurie vertino kolonų konstrukcijas, pagal pateiktus kriterijus.

7 lentelė. Apklauso rezultatai ir tarpiniai skaičiavimai

Eksperto Nr.	Efektyvumo rodiklis				
	Sunaudotų medžiagų kaina, Eur	Prototipo išspausdinimo laikas, min	Kritinė klaidymo jėga, N	Stiprio atsarga, kartai	Ašinis kolonos poslinkis, mm
1	1	2	3	4	5
2	1	2	5	3	4
3	2	1	5	3	4
4	3	2	5	4	3
5	2	1	5	3	4
6	5	3	4	4	3
7	5	3	5	4	3
8	3	1	4	5	2
9	2	1	5	3	4
10	5	3	5	5	3
11	2	1	5	4	3
12	2	1	4	5	3
13	1	2	5	4	3
Skaičiavimai					
Formulė / reikšmė	Skaitinės reikšmės				
$\sum_{k=1}^r t_{jk}$	34	23	60	51	44
$\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^r t_{jk}$	212				
\bar{t}_j	2,615	1,769	4,615	3,923	3,385
$q_j = \frac{\sum_{k=1}^r t_{jk}}{\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^r t_{jk}}$	0,160	0,108	0,283	0,241	0,208
$\sum q_j$	1				
Prioritetų eilutė	4	5	1	2	3
$\left[\sum_{k=1}^r t_{jk} - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^r t_{jk} \right]^2$	70,56	376,36	309,76	73,96	2,56
S	833				
\bar{W}	0,493				
χ^2	25,64				
χ_{lent}^2	13,28				

Atlikus skaičiavimus pagal 2.2. poskyryje pateiktą metodiką ir patikrinus sąlygą $\chi^2 > \chi_{lent}^2$ gaunama, kad nelygybė $25,64 > 13,28$, yra teisinga ir laikoma, kad ekspertų nuomonės yra suderintos, o kriterijų reikšmės, pagal kurias bus lyginamos konstrukcijos grafiškai pavaizduotos 25 paveikslėlyje.



25 pav. Kriterijų reikšmės pagal apklausos rezultatus

Ekspertų apklausoje dalyvavo 4 specialiųjų statybos darbų techninės priežiūros vadovai, 3 techninės priežiūros vadovai, 3 projekto dalies vadovai, 2 projekto vadovai ir 1 specialiųjų statybos darbų vadovas. Pagal jų atsakymus jų nuomonės yra suderintos ir svarbiausias kriterijus yra kritinė klupdymo jėga, mažiausiai svarbus išspausdinimo laikas.

3.3. Konstrukcijų išspausdinimo laiko ir kainos skaičiavimai

Prieš išspausdinant prototipus, pasirenkami tinkami parametrai, kad kolonų prototipai būtų išspausdinti geros kokybės. Parinkti parametrai pateikti 8 lentelėje.

8 lentelė. Spausdinimo parametrai visiems kolonų modeliams

Eil. Nr.	Parametro pavadinimas	Matavimo vienetas	Skaitinė reikšmė
Kokybė			
1	Sluoksnio aukštis	mm	0,20
2	Apvalkalo storis	mm	0,60
Užpildymas			
3	Dugno storis	mm	0,80
4	Užpildymo tankis	%	15,00
Greitis ir temperatūra			
5	Spausdinimo greitis	mm/s	50,00
6	Spausdinamo plastiko temperatūra	°C	150,00
7	Spausdinamo pagrindo temperatūra	°C	50,00
Plastiko siūlas			
8	Skersmuo	mm	1,75
9	Srautas	%	100,00
Mašina			
10	Spausdintuvo purkštuko dydis	mm	0,40
11	Atsitraukimo greitis	mm/s	30,00
12	Atsitraukimo atstumas	mm	6,00

Eil. Nr.	Parametro pavadinimas	Matavimo vienetas	Skaitinė reikšmė
Kokybė			
13	Pradinio sluoksnio storis	<i>mm</i>	0,20
14	Pradinio sluoksnio linijos plotis	%	130,00
15	Atskiras objekto dugnas	<i>mm</i>	0,00
16	Dvigubas ekstruzijos sutapimas	<i>mm</i>	0,15
Greitis			
17	Galvutės judėjimo greitis	<i>mm/s</i>	120,00
18	Apatinio sluoksnio greitis	<i>mm/s</i>	25,00
19	Pripildymo greitis	<i>mm/s</i>	0,00
20	Išorinio apvalkalo greitis	<i>mm/s</i>	50,00
21	Vidinio apvalkalo greitis	<i>mm/s</i>	45,00

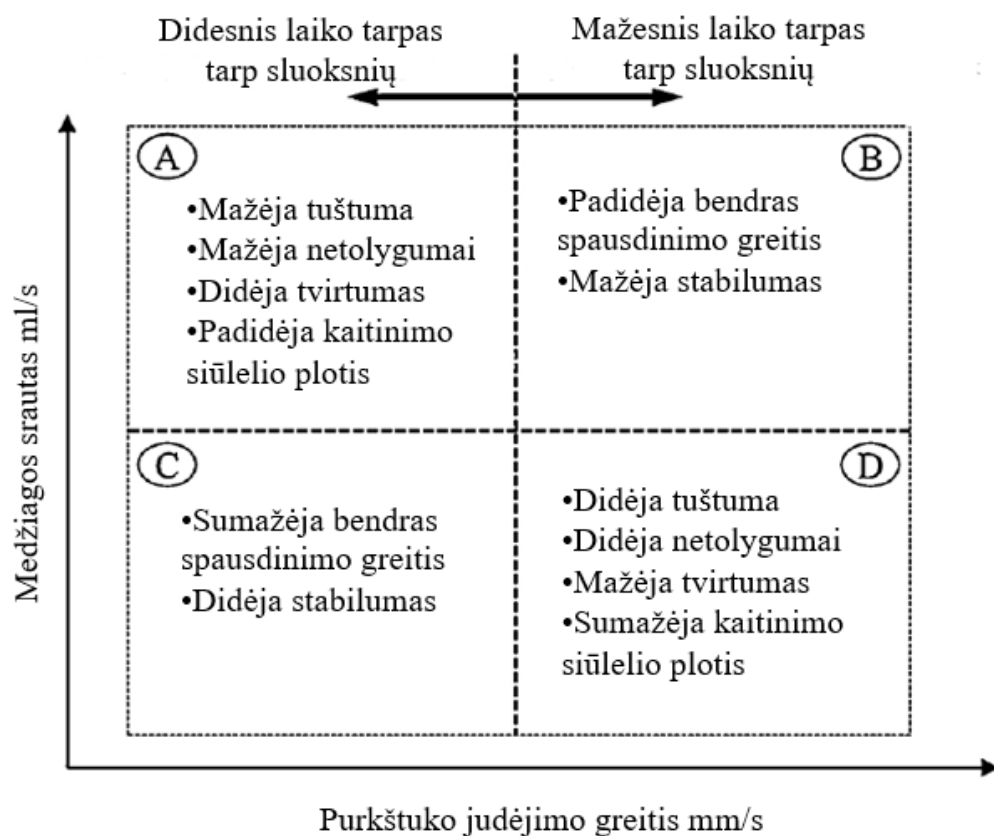
Išspausdintų formų nuotrauka pateikta 26 paveikslėlyje. Derinant tinkamus spausdinimo parametrus, pateiktus aukščiau esančioje lentelėje, bei atliekant bandymus išspausdinant prototipus, pastebėta keletas pagrindinių dėsningumų keičiant medžiagos srautą ir purkštuko judėjimo greitį (žr. 27 pav.). Didinant manipulatoriaus galvutės judėjimo greitį ir didinant išspaudžiamos medžiagos kiekį – padidėja bendras konstrukcijos išspausdinimo greitis, tačiau forma tampa netolygi, grublėta ir nestabili. Sumažinus išspaudžiamos medžiagos kiekį ir palikus tą patį greitį – didėja tuštuma ir mažėjant kaitinamo siūlelio pločiui forma tampa nelygi. Kai mažinamas purkštuko greitis ir medžiagos srautas sumažėja bendras spausdinimo greitis.



26 pav. Nagrinėjami skirtingų formų kolonų prototipai išspausdinti 3D spausdintuvu [sukurta autoriaus]

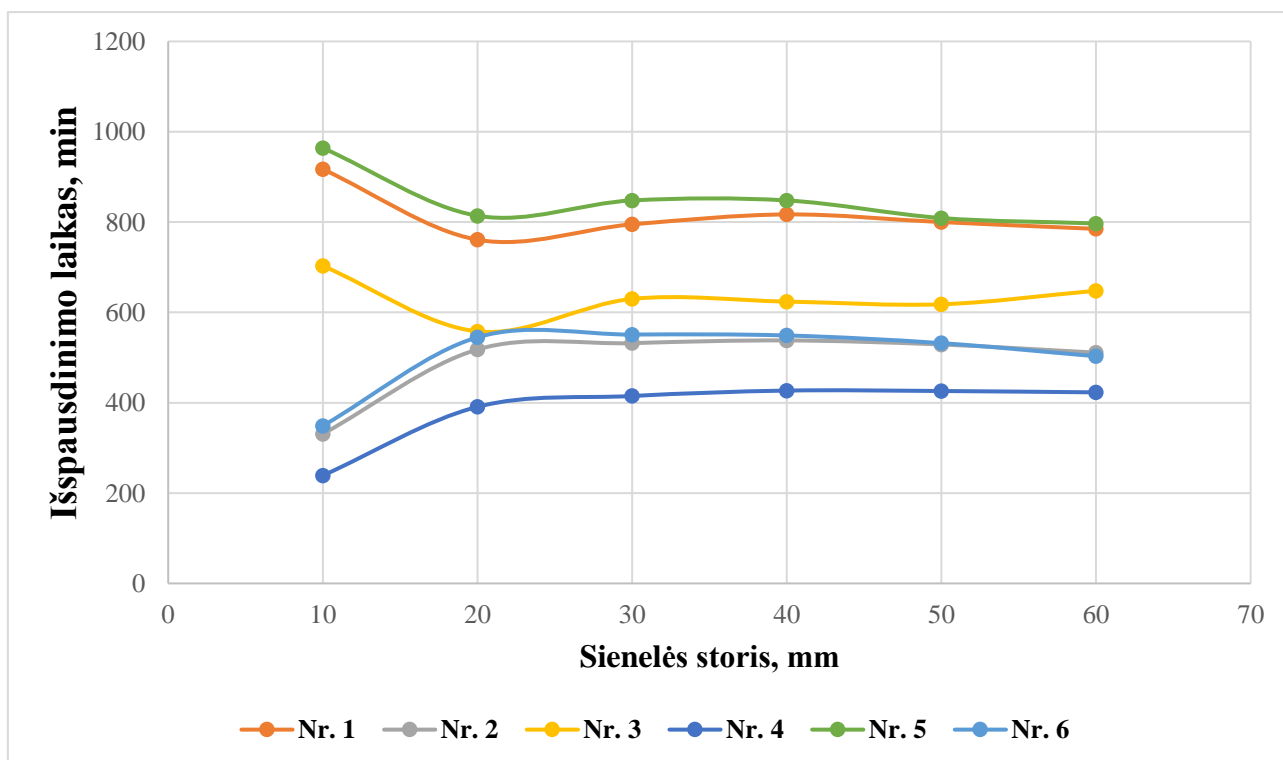
Buvo atlikti skaičiavimai keičiant kolonos sienelės storį nuo 10 mm iki 60 mm. Rezultatai pateikti 7 priede ir 28 bei 29 pav.

Pagal sienelės storį visose formose pastebima, kad kai sienelės storis 10 mm, spausdinimo laikas lyginant visą formų kintamumą yra nepastoviausias, o kai sienelės storis 20 mm ir daugiau, spausdinimo laikas tampa pakankamai pastovus ir kinta nežymiai (5–13 %). Ilgiausiai spausdinama 5 bei 1 formos, o greičiausiai 4, 2 ir 6.

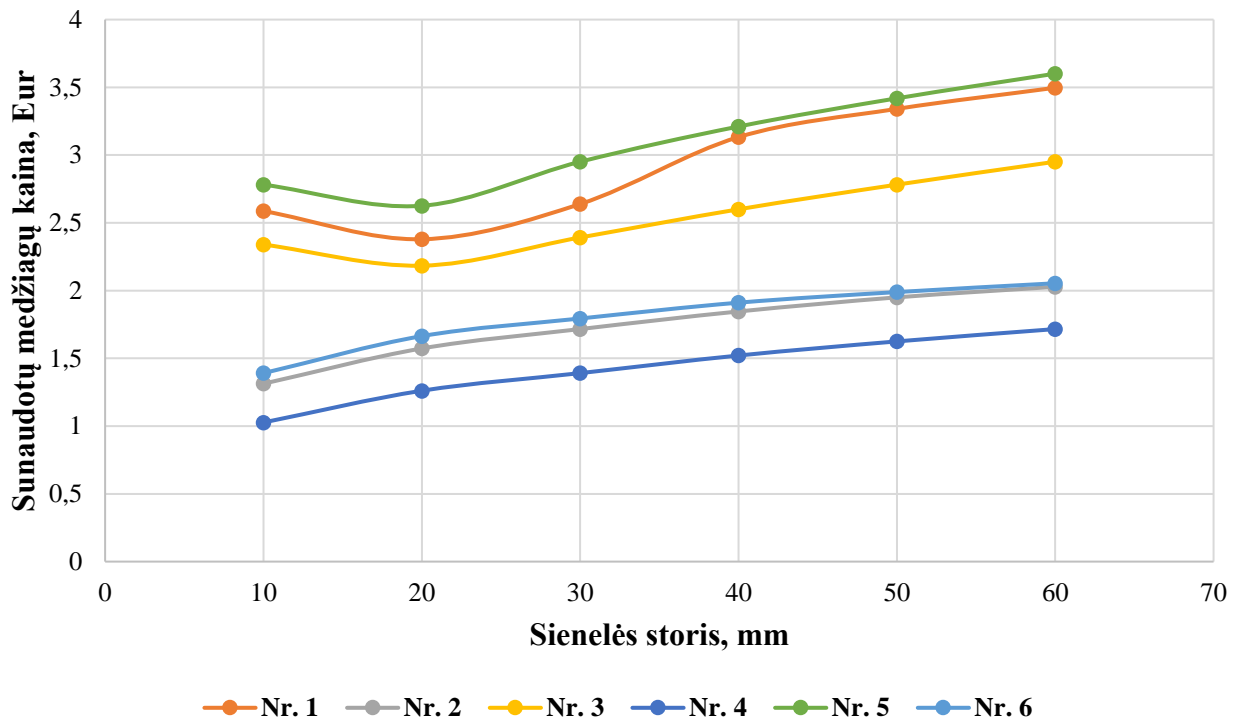


27 pav. Medžiagos srauto ir purkštuko judėjimo greičio poveikis spausdinio kokybei

Vertinant kolonos konstrukcijos išspausdinimo kainą, ji beveik proporcingai didėja didinant sienelės storį. Brangiausiai išspausdinama formos Nr. 5 ir Nr. 1. Mažiausiai kaštų reikalauja formos Nr. 4, 2 ir 6. Kai sienelės storis 40 mm, formą Nr. 4 galima atspausdinti per pus pigiau nei formą Nr. 5.



28 pav. Laiko priklausomybės nuo sienelės storio pagal formas 1-6



29 pav. Kainos priklausomybė nuo sienelės storio pagal formas 1-6

Naudojantis grafikuose esančia informacija, galima teigti, jog neįtraukiant sienelių storio kaip rodiklio, formos Nr. 5 spausdinimo laikas yra didžiausias, o formos Nr. 4 mažiausias. Lygiai taip pat yra ir su kainos skaičiavimu, t. y. brangiausiai gaunama spausti forma Nr. 5, o pigiausiai Nr. 4. Taigi, kol kas nėra aišku, kuris sienelės skersmuo bus nagrinėjamas, tam bus skaičiuojami kokybės kriterijai.

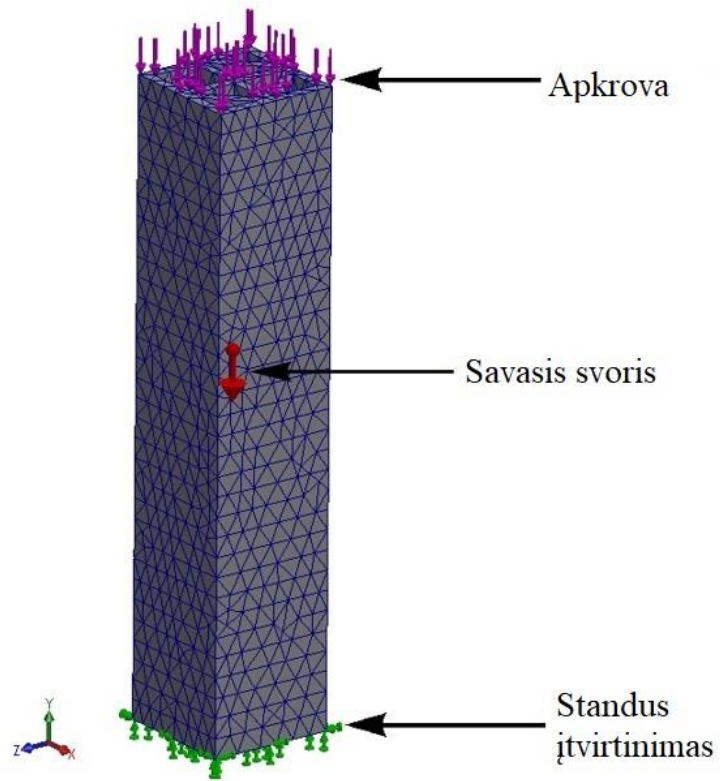
3.4. Sumodeliuotų formų mechaninio atsparumo skaičiavimai

Programoje *SolidWorks* sumodeliuotoms formoms priskiriama betono medžiaga C25/30, kurios charakteristikos pateiktos 5 lentelėje. Atliekant ašinio poslinkio ir atsargos koeficiento skaičiavimus, kolona įtvirtinama standžiai ir ant kolonų uždedama 10000 N apkrova bei savasis svoris (žr. 30 pav.). Taip pat uždedamas tinklesnis tikslesniems skaičiavimams atlikti.

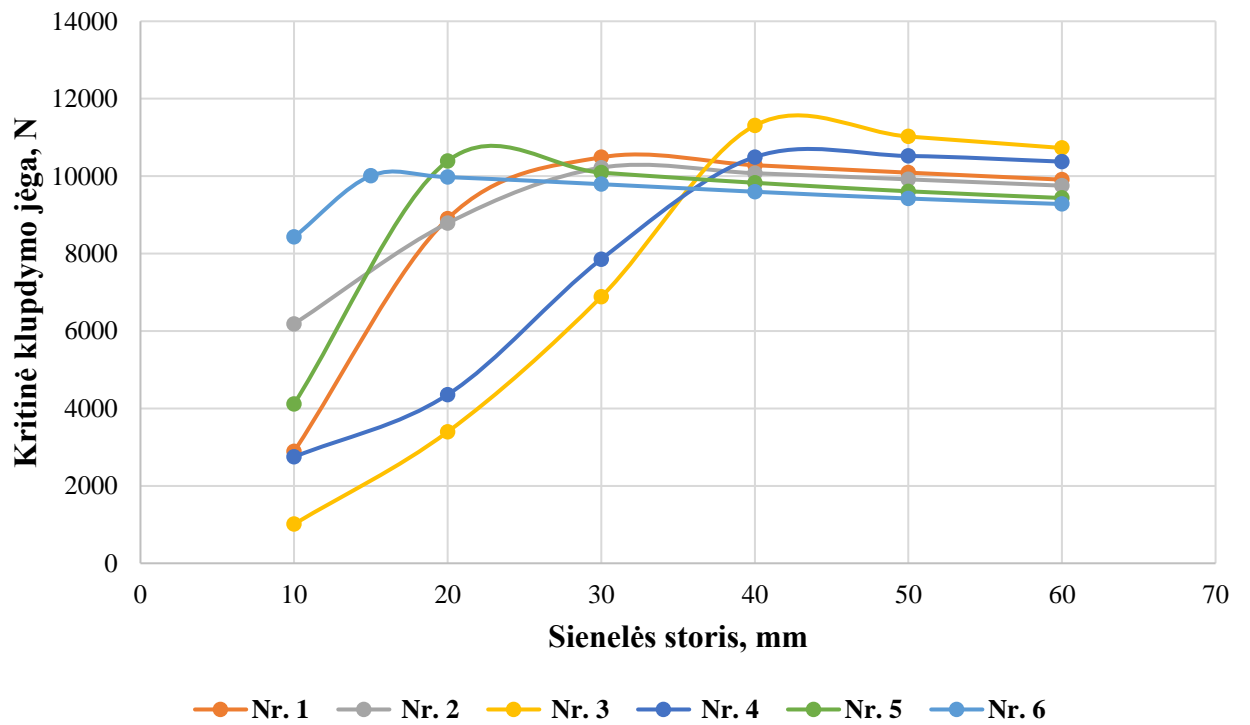
Šie skaičiavimai atlikti esant skirtingiems sienelių storiams, t. y. esant 10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm, 50 mm ir 60 mm (žr. 7 priedą) ir pagal gautus rezultatus nubraižyti grafikai (žr. 31, 32, 33 pav.). Esant mažiausiai kritinei jėgai kolona deformuojasi x ir z kryptimi. Kolonos deformacijos pateiktos 34 paveikslėlyje.

Tiriant kolonos kritinę klūpdyimo jėgą, esant skirtingiems sienelės storiams, nubrėžtas grafikas (žr. 31 pav.). Iš jo galima pamatyti, kad esant bet kuriam sienelės storiui, kritinė jėga iš pradžių didėja iki tam tikros ribos, o tuomet kinta nežymiai. Forma Nr. 3, esant sienelės storiui iki 30 mm, atlaiko mažesnę kritinę jėgą nei kitos formos (nuo 1010 iki 6881 N). Tačiau, sienelės storį padidinus iki 40 mm ji atlaiko didesnę apkrovą nei minėtos formos, t. y. nuo 11023 iki 11308 N, ir nusistovėjęs grafiko dalies kritinė jėga yra taip pat didesnė. Panašiai kinta ir forma Nr. 4. Nors jos kritinė jėga esant sienelės storiui iki 30 mm yra didesnė (nuo 2746 iki 7854 N), pasiekus 40 mm ir daugiau yra mažesnė, t. y. nuo 10375 iki 10521 N). Formų, Nr. 1 ir Nr. 5, grafiko dalis tampa pastovesne pasiekus 20 mm sienelės storio ribą ir daugiau. Formos Nr. 6 yra pastoviausia, nors sienelės storį didinant nuo

40 mm ir daugiau atlaiko mažiausią kritinę jėgą. Tačiau, jei nebūtų vertinamas savasis svoris, grafiko vaizdas būtų kitoks, visų formų kreivės beveik proporcingai didėtų.

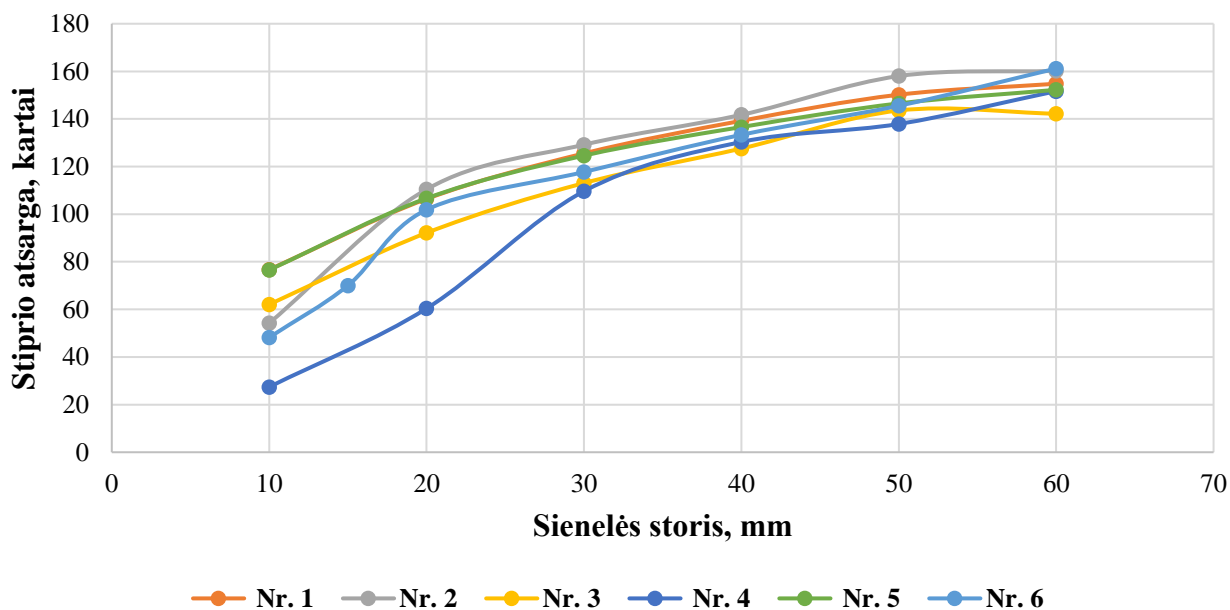


30 pav. Kolonos skaičiuojamasis modelis [sukurta autoriaus]



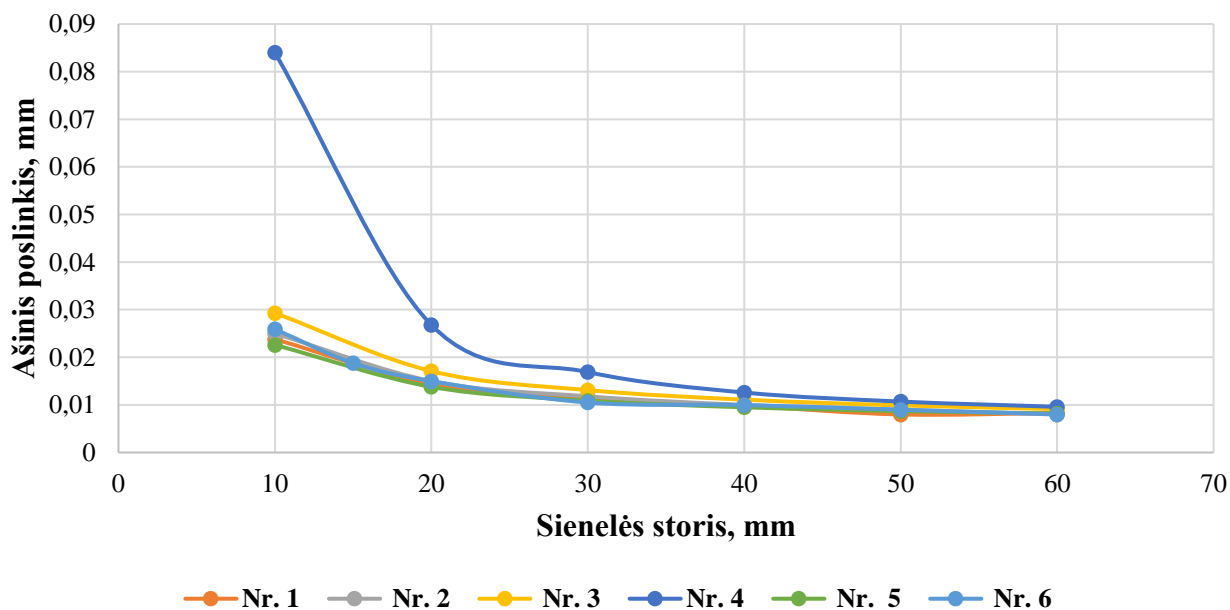
31 pav. Kritinės jėgos priklausomybė nuo sienelės storio pagal formas 1-6

Tiriant kolonos stiprio atsargą, kuri parodo takumo ribos ir įtempių intensyvumo santykį, esant skirtingiems sienelės storiams, nubrėžtas grafikas (žr. 32 pav.). Iš jo galima pamatyti, kad didinant sienelės storį stiprio atsarga didėja, tačiau neproporcingai. Stiprio atsarga mažiausiai proporcingai kinta kai forma yra Nr. 4. Tolygiausiai stiprio atsarga didėja formose Nr. 1 ir Nr. 5.



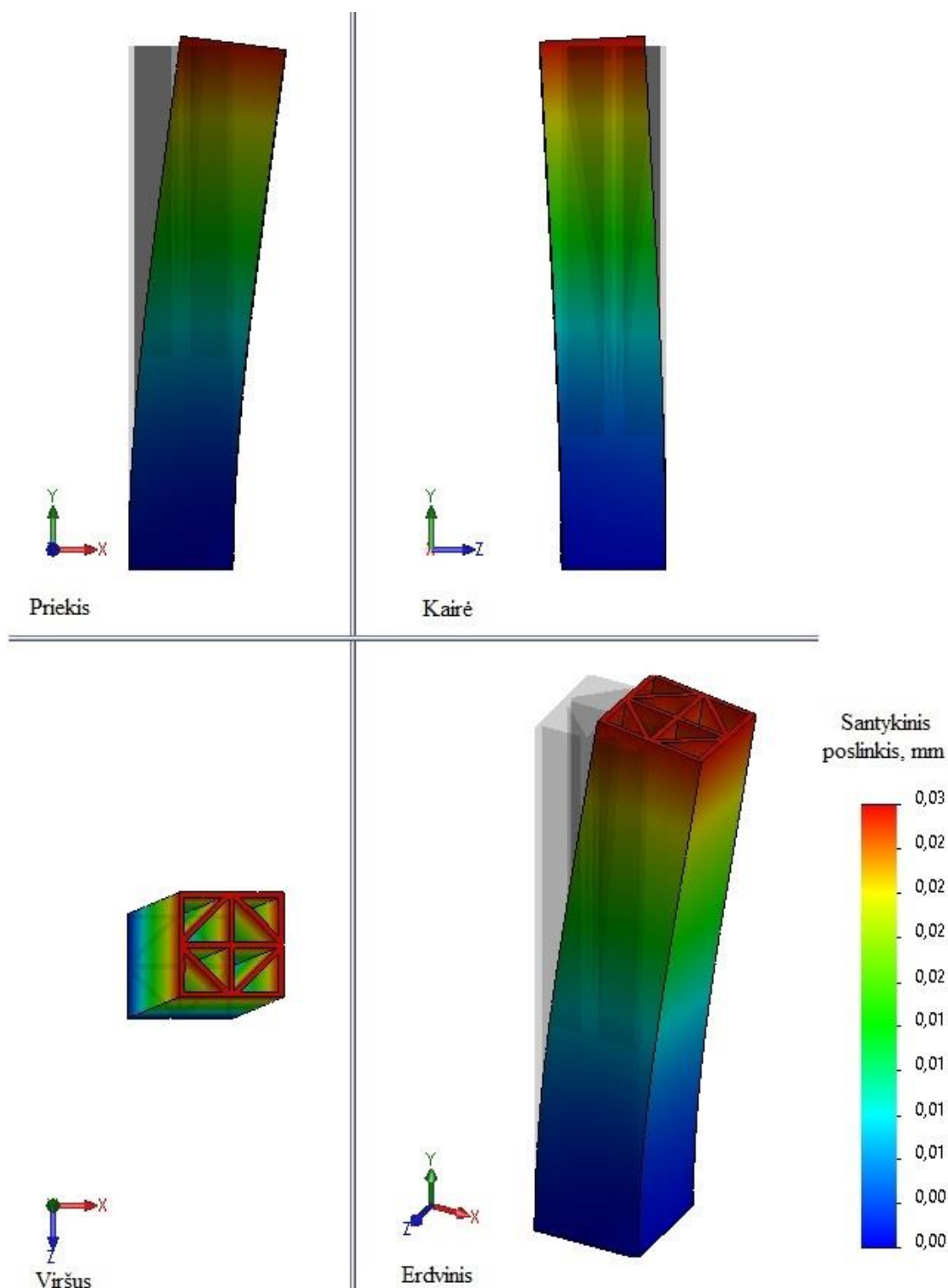
32 pav. Stiprio atsargos priklausomybė nuo sienelės storio pagal formas 1-6

Tiriant kolonos ašinį poslinkį esant skirtingiems sienelių storiams, visose formose kinta nežymiai. Tačiau iš 32 ir 33 grafikų galima pastebėti, kad labiausiai išsiskiria forma Nr. 4. Kai sienelės storis 10 mm, jos atsargos koeficientas yra mažiausias ir ašinis poslinkis yra didžiausias. Likusių formų šie parametrai kinta ne taip žymiai, bet jie nėra tiesiogiai proporcingi storiui.



33 pav. Ašinio poslinkio priklausomybė nuo sienelės storio pagal formas 1-6

Kadangi ekspertų apklausa nustatė, kad svarbiausias kriterijus vertinant kolonų konstrukcijas yra kritinė klūpdyo jėga, tai galutiniams skaičiavimams SAW metodu bus atsižvelgta į didžiausią klūpdyo jėgą pagal 31 paveikslėlį. Iš jo matyti, jog didžiausią klūpdyo jėgą atlaiko forma Nr. 3 kai sienelės storis yra 40 mm.



34 pav. Deformuotos kolonos Nr. 1 epiūra [sukurta autoriaus]

Atsižvelgiant į 3.1 – 3.4 skyreliuose atliktus skaičiavimus, sumodeliuotoms formoms pasirenkamas 40 mm sienelės storis ir bus atliekamas galutinis konstrukcijų vertinimas SAW metodu, kuriame bus vertinami visi kriterijai, t. y. konstrukcijai sunaudotų medžiagų kaina, išspausdinimo laikas, kritinė

klūpdymo jėga, atsargos koeficientas ir ašinis poslinkis. Kriterijai bus vertinami pagal skirtingą reikšmingumą, nustatytą 3.2 skyrelyje.

3.5. Konstrukcijų lyginimas daugiakriteriu SAW metodu

Galutiniams rezultatams skaičiuoti, lyginant visus pasirinkus kriterijus ir jų reikšmingumus pagal ekspertų apklausos rezultatus, pasirinktas kolonos konstrukcijos sienelės storis 40 mm ir pagal 2.1 skyrelyje pateiktą skaičiavimo metodiką, rezultatai pateikti žemiau.

9 lentelė. Sprendimų priėmimo matrica

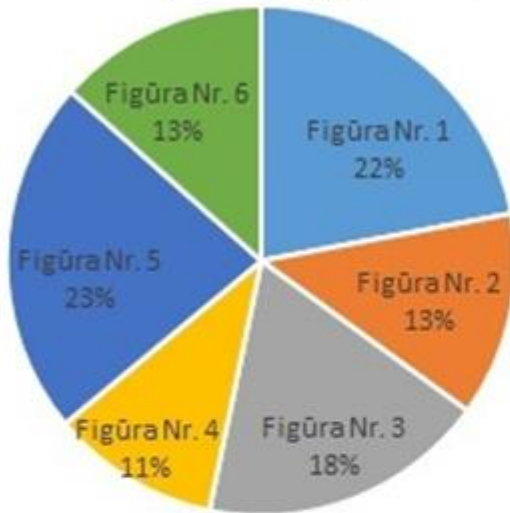
Projekto alternatyvos	Rodikliai / kriterijai				
	Sunaudotų medžiagų kaina, Eur	Prototipo išspausdinimo laikas, min	Kritinė kolonos klūpdymo jėga, N	Stiprio atsarga, kartai	Kolonos ašinis poslinkis, mm
Forma Nr. 1	3,133	817,000	10 283,000	139,220	0,0098
Forma Nr. 2	1,846	538,000	10 076,000	141,730	0,0100
Forma Nr. 3	2,600	624,000	11 308,000	127,580	0,0111
Forma Nr. 4	1,521	427,000	10 493,000	130,340	0,0126
Forma Nr. 5	3,211	848,000	9 828,700	136,599	0,0095
Forma Nr. 6	1,911	549,000	9 597,200	133,345	0,0100
Min. ar maks. rodiklis	min.	min.	maks.	maks.	min.
Rodiklio geriausia reikšmė	1,521	427,000	11308,000	141,730	0,010

Sprendimų priėmimo matricoje (žr. 9 lentelę) pagal kriterijus ir formas surašytos skaitinės reikšmės, kai sienelės storis 40 mm. Kaip pasiskirsto procentais šie kriterijai, grafiškai pavaizduota 35 pav. Sudaroma normalizuota matrica (žr. 10 lentelę) ir reikšmių matrica (žr. 11 lentelę).

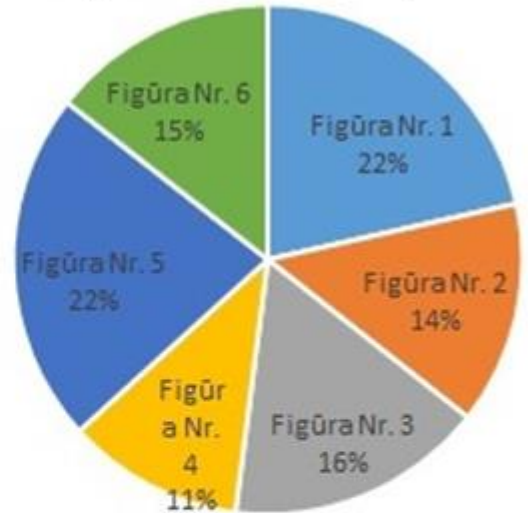
10 lentelė. Normalizuota matrica, kai kriterijų reikšmingumas skirtingas

Projekto alternatyvos	Rodikliai / kriterijai				
	Sunaudotų medžiagų kaina, Eur	Prototipo išspausdinimo laikas, min	Kritinė kolonos klūpdymo jėga, N	Stiprio atsarga, kartai	Kolonos ašinis poslinkis, mm
Forma Nr. 1	0,49	0,523	0,909	0,982	0,969
Forma Nr. 2	0,82	0,794	0,891	1,000	0,950
Forma Nr. 3	0,59	0,684	1,000	0,900	0,856
Forma Nr. 4	1,00	1,000	0,928	0,920	0,754
Forma Nr. 5	0,47	0,504	0,869	0,964	1,000
Forma Nr. 6	0,80	0,778	0,849	0,941	0,953
Min. ar maks. rodiklis	min.	min.	maks.	maks.	min.
Rodiklių reikšmingumai, q_j	0,160	0,108	0,283	0,241	0,208

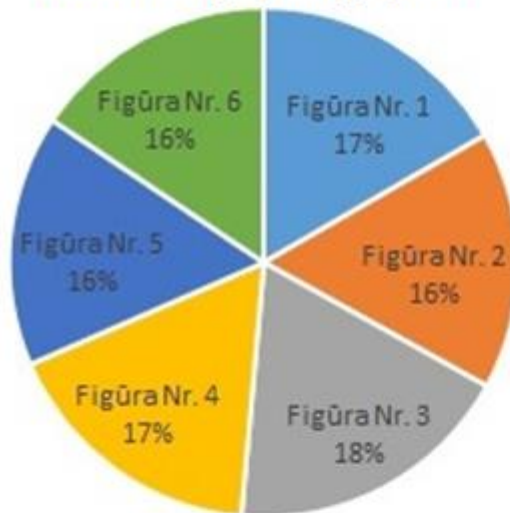
Sunaudotų medžiagų kaina, Eur



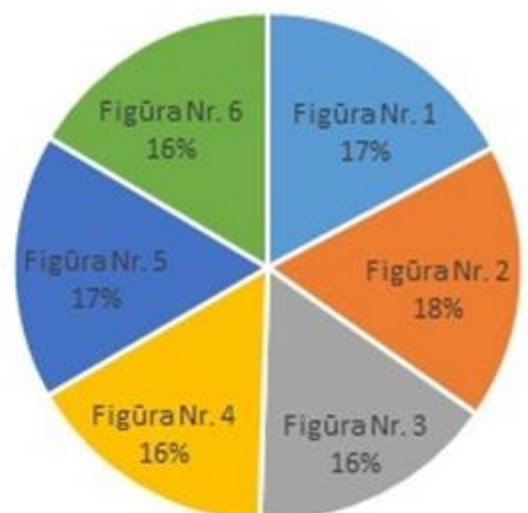
Išspausdinimo laikas, min



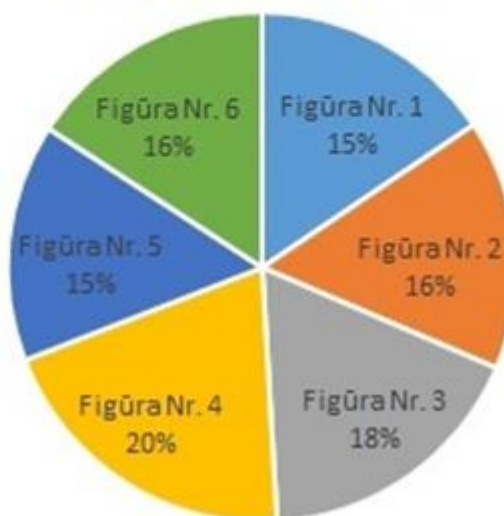
Kritinė klaidymo jėga, N



Stiprio atsarga, kartai



Ašinis poslinkis, mm

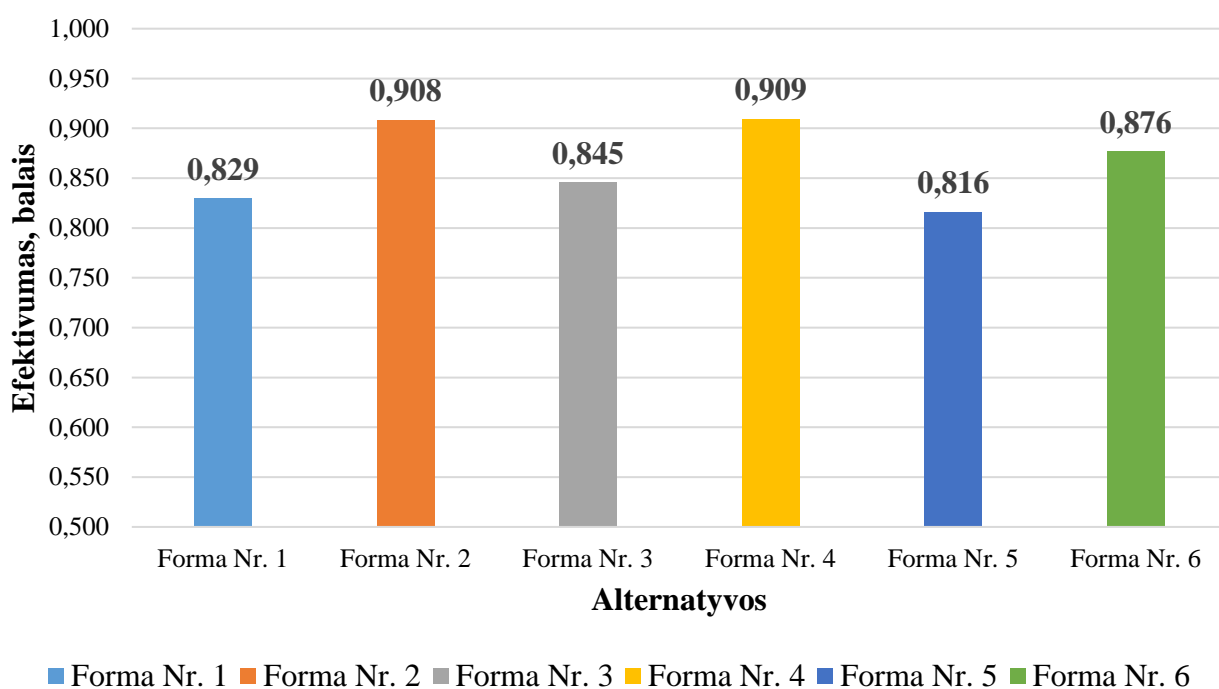


35 pav. Kolonų konstrukcijų kriterijų pasiskirstymas procentais pagal gautas reikšmes

11 lentelė. Reikšmių matrica, kai kriterijų reikšmingumas skirtingas

Projekto alternatyvos	Rodikliai / kriterijai				
	Sunaudotų medžiagų kaina, Eur	Prototipo išspausdinimo laikas, min	Kritinė kolonos klupdymo jėga, N	Stiprio atsarga, kartai	Kolonos ašinis poslinkis, mm
Forma Nr. 1	0,078	0,057	0,257	0,236	0,201
Forma Nr. 2	0,132	0,086	0,252	0,241	0,197
Forma Nr. 3	0,094	0,074	0,283	0,217	0,178
Forma Nr. 4	0,160	0,108	0,263	0,221	0,156
Forma Nr. 5	0,076	0,055	0,246	0,232	0,208
Forma Nr. 6	0,128	0,084	0,240	0,226	0,198
Min. ar maks. rodiklis	min.	min.	maks.	maks.	min.

Atlikus skaičiavimus SAW metodu, kai kriterijų reikšmingumas yra skirtingas (pagal ekspertų apklausos rezultatus, surikiuota prioritetų eilutė ir nubraižytas grafikas pagal gautus rezultatus (žr. 36 pav.) matyti, kad efektyviausia kolonos konstrukcijos forma yra Nr. 4, o mažiausiai racionali yra forma Nr. 5 ir jas skiria apie 10 %.



36 pav. Alternatyvų vertinimo efektyvumo balai, kai kriterijų reikšmingumas nevienodas

Taip pat galima pastebėti, kad forma Nr. 2 efektyvumu nuo geriausios atsilieka tik nepilnu 1 %, o geriausios trys formos yra kai kolonos sukasi 90°. Tokių rezultatų pasiskirstymą labiausiai lėmė sunaudotų medžiagų kaina ir išspausdinimo laikas, nes atitinkamai susukta nuo nesusuktos kaina skiriasi net 41 %, o išspausdinimo laikas apie 33 %. Nors kritinės jėgos reikšmingumas didžiausias, to neužteko kad forma Nr. 3 būtų aukštesnėje nei ketvirtoje vietoje nuo geriausios.

Jei kriterijų reikšmingumas būtų vienodai svarbus, skaičiavimų rezultatai pateikti 12 lentelėje ir 13 lentelėje bei 37 pav. Sprendimų priėmimo matrica naudojama ta pati kaip ir ankstesniuose skaičiavimuose. Tuomet matrica normalizuojama pasirenkant vienodus reikšmingumus, t. y. po 0,2.

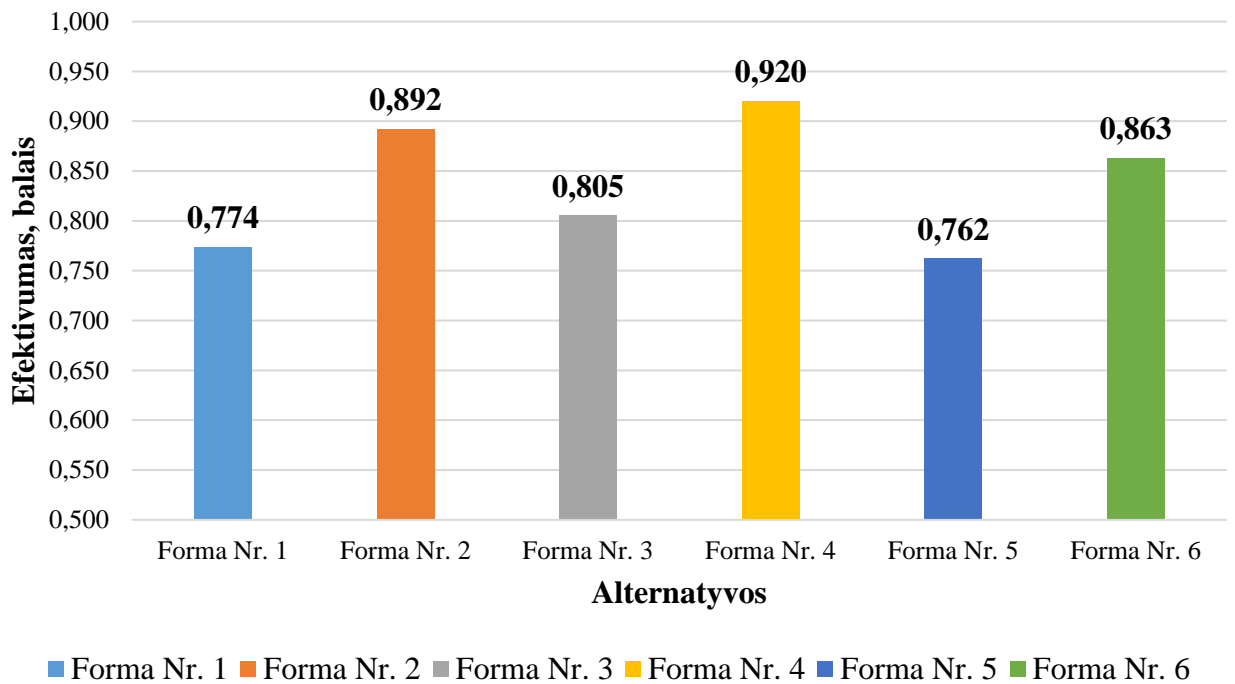
12 lentelė. Normalizuota matrica, kai kriterijų reikšmingumas vienodas

Projekto alternatyvos	Rodikliai / kriterijai				
	Sunaudotų medžiagų kaina, Eur	Prototipo išspausdinimo laikas, min	Kritinė kolonos klumpdymo jėga, N	Stiprio atsarga, kartai	Kolonos ašinis poslinkis, mm
Forma Nr. 1	0,49	0,523	0,909	0,982	0,969
Forma Nr. 2	0,82	0,794	0,891	1,000	0,950
Forma Nr. 3	0,59	0,684	1,000	0,900	0,856
Forma Nr. 4	1,00	1,000	0,928	0,920	0,754
Forma Nr. 5	0,47	0,504	0,869	0,964	1,000
Forma Nr. 6	0,80	0,778	0,849	0,941	0,953
Min. ar maks. rodiklis	min.	min.	maks.	maks.	min.
Rodiklių reikšmingumai, q_j	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200

13 lentelė. Reikšmių matrica, kai kriterijų reikšmingumas vienodas

Projekto alternatyvos	Rodikliai / kriterijai				
	Sunaudotų medžiagų kaina, Eur	Prototipo išspausdinimo laikas, min	Kritinė kolonos klumpdymo jėga, N	Stiprio atsarga, kartai	Kolonos ašinis poslinkis, mm
Forma Nr. 1	0,097	0,105	0,182	0,196	0,194
Forma Nr. 2	0,165	0,159	0,178	0,200	0,190
Forma Nr. 3	0,117	0,137	0,200	0,180	0,171
Forma Nr. 4	0,200	0,200	0,186	0,184	0,151
Forma Nr. 5	0,095	0,101	0,174	0,193	0,200
Forma Nr. 6	0,159	0,156	0,170	0,188	0,191
Min. ar maks. rodiklis	min.	min.	maks.	maks.	min.

Atlikus skaičiavimus SAW metodu, kai kriterijų reikšmingumas vienodas, surikiuota prioritetų eilutė ir nubraižytas grafikas pagal gautus rezultatus (žr. 37 pav.) matyti, kad efektyviausia kolonos konstrukcijos forma yra Nr. 4, o mažiausiai racionali yra forma Nr. 5, t. y. taip pat kaip ir skaičiuojant skirtingu reikšmingumu, nors šį kartą racionaliausią nuo blogiausios formos skiria apie 17 % ir šį kartą alternatyvų grafikas yra kitoks.



37 pav. Alternatyvų vertinimo efektyvumo balai, kai kriterijų reikšmingumas vienodas

Atlikus empirinius tyrimus SAW metodu, kai kriterijų reikšmingumas yra skirtingas ir kai vienodas, nustatyta, kad abejais atvejais efektyviausia forma yra Nr. 4, o mažiausiai efektyvi Nr. 5. Nors formos Nr. 6 vidus yra toks pat kaip blogiausios formos (Nr. 5), o tik susuktas 90° , ši forma yra efektyvesnė už visas nesusuktas formas. Visos formos, turinčios susuktą vidų 90° yra efektyvesnės nei tiesios. Formos Nr. 4 prototipas išspausdinamas per 427 min ir kainuoja 1,52 Eur. Realios konstrukcijos kritinė klūpdyimo jėga yra 10493 kN, o stiprio atsarga 130,34. Ašinis poslinkis yra 0,0126 mm.

Išvados

1. Atlikus užsienio informacijos šaltinių analizę, nustatyta, kad daugelyje užsienio šalių (Belgijoje, Rusijoje, Kalifornijoje, Prancūzijoje, Italijoje, Teksase, Čekijoje) jau yra išspausdinti pirmieji gyvenamieji namai bei biurai naudojant skirtingas 3D spausdinimo technologijas, tačiau dar nevyksta masinė statyba.
2. Atlikus mokslinės literatūros analizę išanalizuota 3D spausdinimo technologija, kurioje prototipus išspausdinti galima pagrindiniais trimis būdais, tačiau prototipams labiausiai tinka FDM tipas, o pagrindinės prototipų spausdinimo medžiagos yra PLA ir ABS. Betonines konstrukcijas galima spausdinti įvairias būdais, tačiau populiariausias yra robotinė ranka. Spausdinimo medžiagos savybės pagerinamos įmaišius portlandcemenčio ir lakiųjų pelenų, nanokloto, kalcinuoto molio, polisacharidų polimerų ir pan.
3. Išanalizavus 3D spausdinimo technologijos privalumus galima teigti, kad ši statyba yra greita, pigi, mažiau kenkia aplinkai ir yra tiksli. Šios statybos progresą lėtina reglamentų ir taisyklių nepritaikytų 3D statybai kūrimas, dabartinių bandinių netinkamumas inovatyviam 3D spausdinimui ir nenoras investuoti į naujas technologijas dėl konservatyvaus požiūrio.
4. Vertinimo metodų yra daug, klasifikuojant juos pagal naudingumo teoriją, analitinę hierarchiją, verbalinės analizės sprendimus ir lyginamosios periferijos metodus, kokybinius bei kiekybinius matavimus, tačiau nėra geriausio. SAW metodo skaičiavimo algoritmas yra nesudėtingas, tik kadangi jis sudaromas iš maksimalių reikšmių, esant minimaliai reikšmei ją reikia perskaičiuoti į maksimalią.
5. Buvo lyginamos šešios skirtingos prototipų formos, kurios viena nuo kitos skiriasi savo vidine rašto forma ir susukimo laipsniu. Jos buvo vertinamos pagal penkis kriterijus su skirtingais reikšmingumais: sunaudotų medžiagų kaina – 0,160; išspausdinimo laiku – 0,108; kritine klaidymo jėga – 0,283; stiprio atsarga – 0,241 ir ašiniu poslinkiu – 0,208. Daugiakriteriu vertinimo metodu SAW nustatyta, kad efektyviausia 3D spausdintuvu spausdinti formą Nr. 4. Jos susukimo kampas yra 90° , o vidus yra sudarytas iš įstrižainių, kurios sukasi kartu su išorinėmis sienelėmis. Ši forma surinko 0,909 iš 1 galimo balo, o nuo mažiausiai efektyvios ją skiria apie 10 %. Šios kolonos prototipo išspausdinimo kaina yra 1,52 Eur, išspausdinimo laikas 427 min. Realios konstrukcijos, kurios matmenys $600 \times 600 \times 3000$, o sienelės storis 40 mm. Šios kolonos kritinės jėgos reikšmė yra apie 10500 N, stiprio atsarga apie 130 ir ašinis poslinkis apie 0,01 mm. Jei visų kriterijų reikšmingumas būtų vienodas, ši forma vis tiek tampa efektyviausia ir surenka 0,92 iš 1 galimo balo, tik šiuo atveju ją nuo blogiausios skiria 17%.

Literatūros sąrašas

1. MECHTCHERINE, Viktor. Large-scale digital concrete construction – CONPrint 3D concept for on-site, monolithic 3D-printing. *Automation in Construction* [interaktyvus]. Amsterdam: Elsevier, 2019, 107, 102933 [žiūrėta 2019-10-26], ISSN 0926-5805. Prieiga per: Science Direct.
2. DANIEL TAY, Yi Wei. Effect of printing parameters in 3D concrete printing: Printing region and support structures. *Journal of Materials Processing Tech.* Amsterdam: Elsevier, 2019, 271, 261-270 [žiūrėta 2019-10-26]. ISSN 0924-0136. Prieiga per: Science Direct.
3. GHAFFAR, Seyed Hamidreza. Additive manufacturing technology and its implementation in construction as an eco-innovative solution. *Automation in Construction.* Amsterdam: Elsevier, 2018, 93, 1-11 [žiūrėta 2019-11-01], ISSN 0926-5805. Prieiga per: Science Direct.
4. LOWKE, Dirk. Particle-bed 3D printing in concrete construction – Possibilities and challenges. *Cement and Concrete Research.* Amsterdam: Elsevier, 2019, 107, 102933 [žiūrėta 2019-10-26], ISSN 0926-5805. Prieiga per: Science Direct.
5. KAZEMIAN, Ali. Cementitious materials for construction-scale 3D printing: Laboratory testing of fresh printing mixture. *Construction and Building Materials.* Amsterdam: Elsevier, 2017, 145, 639-647 [žiūrėta 2019-11-01], ISSN 0950-0618. Prieiga per: Science Direct.
6. DE SCHUTTER, Geert. Vision of 3D printing with concrete – Technical, economic and environmental potentials. *Cement and Concrete Research.* Amsterdam: Elsevier, 2018, 112, 25-36 [žiūrėta 2019-11-01], ISSN 0008-8846. Prieiga per: Science Direct.
7. MECHTCHERINE, Viktor. 3D-printed steel reinforcement for digital concrete construction – Manufacture, mechanical properties and bond behaviour. *Constructions and Building Materials.* Amsterdam: Elsevier, 2018, 179, 125-137 [žiūrėta 2019-11-01], ISSN 0950-0618. Prieiga per: Science Direct.
8. WU, Peng. A Critical review of the use of 3-D printing in the construction industry. *Automation in Construction.* Amsterdam: Elsevier, 2016, 68, 21-31 [žiūrėta 2019-11-01], ISSN 0926-5805. Prieiga per: Science Direct.
9. GOSSELIN, C. Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete – a new processing route for architects and builders. *Materials and Design.* Amsterdam: Elsevier, 2016, 100, 102-109 [žiūrėta 2019-11-01], ISSN 0264-1275. Prieiga per: Science Direct.
10. SOTO, Borja Garcia. Productivity of digital fabrication in construction: Cost and time analysis of a robotically built wall. *Automation in Construction.* Amsterdam: Elsevier, 2018, 92, 297-311 [žiūrėta 2019-11-10], ISSN 0926-5805. Prieiga per: Science Direct.
11. ZAVADSKAS, Edmundas. Sensitivity analysis of a simple additive weight method. *International Journal of Management and Decision Making.* VOL. 8, Nos. 5/6, pp.555-574
12. AVIŽA, Donatas. A multiple criteria decision support system for analyzing the correlation between the thickness of a thermo-insulation layer and its payback period of the external wall. *Journal of Management and Decision Making.* 2015, Vol. 21 No 6. ISSN 1392-3730
13. PODVEZKO, Valentinas. Engineering Economics. *The Comparative Analysis of MCDA Methods SAW and COPRAS* [interaktyvus]. Birkhäuser, 2011, 22(2), 134-146 [žiūrėta 2019-11-14], ISSN 1392 – 2785. Prieiga per: <http://inzeiko.ktu.lt/index.php/EE/article/view/310/0>
14. AVIŽA, Donatas. *Pastato atitvarų racionalaus termoizoliacinio sluoksnio daugiatikslė selektonovacija: daktaro disertacija.* Vilnius: Technika, 2016. ISBN: 978-609-457-911-0.

15. RINDFLEISCH, Aric. How 3D Printers Work. Prieiga per : <https://www.coursera.org/learn/3d-printing-revolution/lecture/dNpvw/how-3d-printers-work>
16. SIMANAVIČIENĖ, Rūta. *Kiekybinių daugiatislių sprendimo priėmimo metodų jautrumo analizė: daktaro disertacija*. Vilnius: Technika, 2011. ISBN: 978-609-457-055-1.
17. SIMANAVIČIENĖ, Rūta. Sensitivity Analysis for Multiple Criteria Decision Making Methods: TOPSIS and SAW. *Procedia Social and Behavioral Sciences*. Amsterdam: Elsevier, 2010, 2, 7743-7744 [žiūrėta 2019-11-18], ISSN 1877-0428. Prieiga per: Science Direct.
18. SANTHANAM, Manu Rahul. 3D printable concrete: Mixture design and test methods. *Cement and Concrete Composites*. Amsterdam: Elsevier, 2019, 13-23 [žiūrėta 2020-05-31], ISSN 0958-9465. Prieiga per: Science Direct.
19. ASSAAD, Joshep. Assessment of Thixotropy of Flowable and Self-Consolidating Concrete. *Materials Journal*. American Concrete Institute. 2003, 99–107 [žiūrėta 2020-06-17], ISSN 0889325X. Prieiga per: www.researchgate.net.
20. LE, T.T. Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. *Materials and Structures*. Switzerland: Springer. 2012, 1221-1232 [žiūrėta 2020-06-17], ISSN 1359-5997. Prieiga per: <https://link.springer.com>
21. MARTINS, Joao P. 3D printing: prospects and challenges. *Nanotechnologies in Preventive and Regenerative Medicine*. Amsterdam: Elsevier. 2018, 299-379 [žiūrėta 2020-06-18], ISBN 9780323480642. Prieiga per: Science Direct.
22. GEDLOVAITĖ-KVIETKUVIENĖ, Neringa. *3D spausdintuvu atspausdintų kolonų prototipų skirtingų formų daugiakriteris vertinimas*. Kaunas: Technologijų ir verslo aktualijos. 2020.
23. BUSWELL, R.A. Freeform Construction: Mega-scale Rapid Manufacturing for construction. *Automation in construction*. Amsterdam: Elsevier. 2007, 224-231 [žiūrėta 2020-10-10], ISSN 0926-5805. Prieiga per: Science Direct.
24. XU, Zhang. Large-scale 3D printing by a team of mobile robots. *Automation in Construction*. Amsterdam: Elsevier, 2018, 98-106 [žiūrėta 2020-10-12], ISSN 0926-5805. Prieiga per : Science Direct.
25. CARRASCO, L. Josep. Concordance correlation coefficients estimated by variance components for longitudinal normal and Poisson data. *Computational Statistics and Data Analysis*. Amsterdam: Elsevier, 2018, 57-70 [žiūrėta 2020-11-15], ISSN 0167-9473. Prieiga per : Science Direct.

Informacijos šaltinių sąrašas

26. Neira, Juliana. Europe's largest 3D-printer prints an entire two-story house. Publikuota 2020-08-17. Prieiga per: <https://www.designboom.com/architecture/kamp-c-3d-prints-two-story-house-08-17-2020/> [žiūrėta 2020-09-22]
27. Spinks, Jason. World's first 3D printed house constructed in Belgium. *The Brussels Times*. Publikuota 2020-07-06. Prieiga per: <https://www.brusselstimes.com/news/business/technology/120303/worlds-first-3d-printed-house-constructed-in-belgium/> [žiūrėta 2020-09-22].
28. *5 Amazing 3D PRINTED HOUSE projects*. Prieiga per: <https://www.youtube.com/watch?v=nH-zpnoNLEU&t=228s> [žiūrėta 2019-10-05]
29. 3D printed homes in 24 Hours – printed on site: printed villas, offices and floating saunas? Prieiga per: <https://www.ediweekly.com/3d-printed-homes-24-hours-printed-site-printed-villas-offices-floating-saunas/> [žiūrėta 2020-09-22].
30. Peters, Adele. These cute backyard houses can be entirely 3D-printed. *FastCompany*. Publikuota 2020-05-08. Prieiga per: <https://www.fastcompany.com/90534917/these-cute-backyard-houses-are-entirely-3d-printed> [žiūrėta 2020-09-22].
31. Mighty Buildings. Prieiga per: <https://www.mightybuildings.com/> [žiūrėta 2020-10-03]
32. Corian. Prieiga per: <http://artstone.lt/corian/> [žiūrėta 2020-10-03]
33. Cowan, Michael. The world's first family to live in a 3D-printed home. *BBC's Victoria Derbyshire programme*. Publikuota 2018-07-05. Prieiga per: <https://www.bbc.com/news/technology-44709534> [žiūrėta 2020-09-22].
34. Chiusoli, Alberto. The first 3D printed House with earth. Gaia. *WASP*. Publikuota 2018-09-29. Prieiga per: <https://www.3dwasp.com/en/3d-printed-house-gaia/> [žiūrėta 2020-09-22].
35. 3D WASP. Gaia. 3D printed earth house with Crane WASP. Presentation Video. Publikuota 2018-12-14 <https://www.youtube.com/watch?v=KPaOCWrZJ94> [žiūrėta 2020-10-03]
36. Felepchuk, Lisa. The first – ever 3D-printed house took less than 24 hours to make. *The Loop*. Publikuota 2018-03-14. Prieiga per: <https://www.theloop.ca/first-ever-3d-printed-house-took-less-24-hours-make/> [žiūrėta 2020-09-22].
37. Peters, Adele. The world's first 3D-printed neighborhood now has its first houses. *FastCompany*. Publikuota 2019-11-12. Prieiga per: <https://www.fastcompany.com/90440406/the-worlds-first-3d-printed-neighborhood-now-has-its-first-houses> [žiūrėta 2020-09-22].
38. Trpak, Michal. First 3D-printed House In The Czech Republic Is Almost Complete. *WorldArchitecture*. Publikuota 2020-07-02. Prieiga per: <https://worldarchitecture.org/article-links/efgzv/first-3dprinted-house-in-the-czech-republic-is-almost-complete.html> ir per: <http://www.prvokodburinky.cz/en/> [žiūrėta 2020-09-22].
39. Tarptautiniai žodžiai. Prieiga per: <https://www.zodynas.lt/tarptautinis-zodziu-zodynas> [žiūrėta 2020-06-10]
40. Lietuvių kalbos žodynas. Prieiga per: <https://www.lietuviuzodynas.lt/terminai> [žiūrėta 2020-06-17]
41. Vienetinė ir mažų partijų plastikinių detalių gamyba. 3D spausdinimas ir modeliavimas. Prieiga per: <https://3dkalve.eu/plastiku-savybes/> [žiūrėta 2020-10-10]
42. Oficialus įmonės internetinis puslapis. Prieiga per: <https://cybe.eu/> [žiūrėta 2020-10-12]
43. Holo efektas. Prieiga per: https://lt.wikipedia.org/wiki/Holo_efektas [žiūrėta 2020-10-12]

44. Statybos techninis reglamentas STR 1.12.06:2002 „Statinio naudojimo paskirtis ir gyvavimo trukmė“. Prieiga per : <https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/TAR.FCD9602FAB5D/fiJjCKQyrd>
45. Statybos techninis reglamentas STR 2.01.01(1):2005 „Esminis statinio reikalavimas „Mechaninis atsparumas ir pastovumas“. Prieiga per: <https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/TAR.2C5B83FAC73D>
46. Statybos techninių reikalavimų reglamentas STR 2.01.01(2):1999 „Esminiai statinio reikalavimai. Gaisrinė sauga“. Prieiga per: <https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/TAR.6CA64A9DFF4C/KAVXmUaMCM>
47. Statybos techninis reglamentas STR 2.01.01(3):1999 „Esminiai statinio reikalavimai. Higiena, sveikata, aplinkos apsauga“. Prieiga per: <https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/TAR.19AD91BDE89C/fyGLhcgUt>
48. Statybos techninis reglamentas STR 2.01.01(4):2008 „Esminis statinio reikalavimas „Naudojimo sauga“. Prieiga per: <https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/TAR.6D95BE25633B>
49. Statybos techninis reglamentas STR 2.01.01(5):2008 „Esminis statinio reikalavimas „Apsauga nuo triukšmo“. Prieiga per: <https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/TAR.C8F81F7F8F40>
50. Statybos techninis reglamentas STR 2.01.01(6):2008 „Esminis statinio reikalavimas „Energijos taupymas ir šilumos išsaugojimas“. Prieiga per: <https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/TAR.7D230DA0E41F>
51. Statybos techninis reglamentas STR 2.01.02:2016 „Pastatų energinio naudingumo projektavimas ir sertifikavimas“. Prieiga per: <https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/2c182f10b6bf11e6aae49c0b9525cbbb/asr>
52. Statybos techninis reglamentas STR 2.01.06:2009 „Statinių apsauga nuo žaibo. Išorinė statinių apsauga nuo žaibo“. Prieiga per: <https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/TAR.361470957F85>
53. Statybos techninis reglamentas STR 2.01.07:2003 „Pastatų vidaus ir išorės aplinkos apsauga nuo triukšmo“. Prieiga per: <https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/TAR.BEFE83252B3B/asr>
54. Statybos techninis reglamentas STR 2.05.05:2005 „Betoninių ir gelžbetonių konstrukcijų projektavimas“. Prieiga per: <https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/TAR.C8C4EF7FF7AE/rTLfZhDSux>
55. Statybos techninis reglamentas STR 2.05.04:2003 „Poveikiai ir apkrovos“. Prieiga per: www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/TAR.E5D5DC3C496B/QggipAbUWC
56. Statybos techninis reglamentas STR 2.09.02:2005 „Šildymas, vėdinimas ir oro kondicionavimas“. Prieiga per: <https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/TAR.1F3FB56815CB/ceqlwKNcLd>
57. Lietuvos Respublikos statybos įstatymas Nr. I-1240, 1996. Prieiga per: <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/TAIS.26250/asr>
58. ŽILIUKAS, Antanas. Medžiagų mechanika. Kaunas, Technologija, 2001. 17-53 psl. ISBN 9955-09-090-1.
59. ŽILIUKAS, Antanas. Stiprumo ir irimo kriterijai. Kaunas, Technologija, 2006, 18-30 psl. ISBN 9955-25-134-4.
60. FEODOSJEVAS , V. Medžiagų atsparumas. Vilnius. Mokslas, 1977.438-444 psl., 457 psl. ISBN 978-9955-896-36-4
61. World Population Prospects. Prieiga per: <https://population.un.org/wpp/Graphs/DemographicProfiles/Line/900> [žiūrėta 2020-11-25]

62. VOLPI, Paolo. The impact of natural disasters on the construction industry. 2018. Prieiga per: <https://www.godaddy.com/garage/the-impact-of-natural-disasters-on-the-construction-industry/> [žiūrėta 2020-11-25]
63. Then Mother Nature Attacks: The Role of Constructuin Before and After a Natural Disaster. Prieiga per: <https://constructible.trimble.com/construction-industry/when-mother-nature-attacks-the-role-of-construction-before-and-after-a-natural-disaster> [žiūrėta 2020-11-25]
64. PESCH, R. Michael. Natural Disasters‘ Impact on the Construction Insurance Industry. 2018. <https://www.constructionexec.com/article/natural-disasters-impact-on-the-construction-insurance-industry> [žiūrėta 2020-11-25]

Priedai

1 priedas. Namas Kalifornijoje ir jo perkėlimas [30]

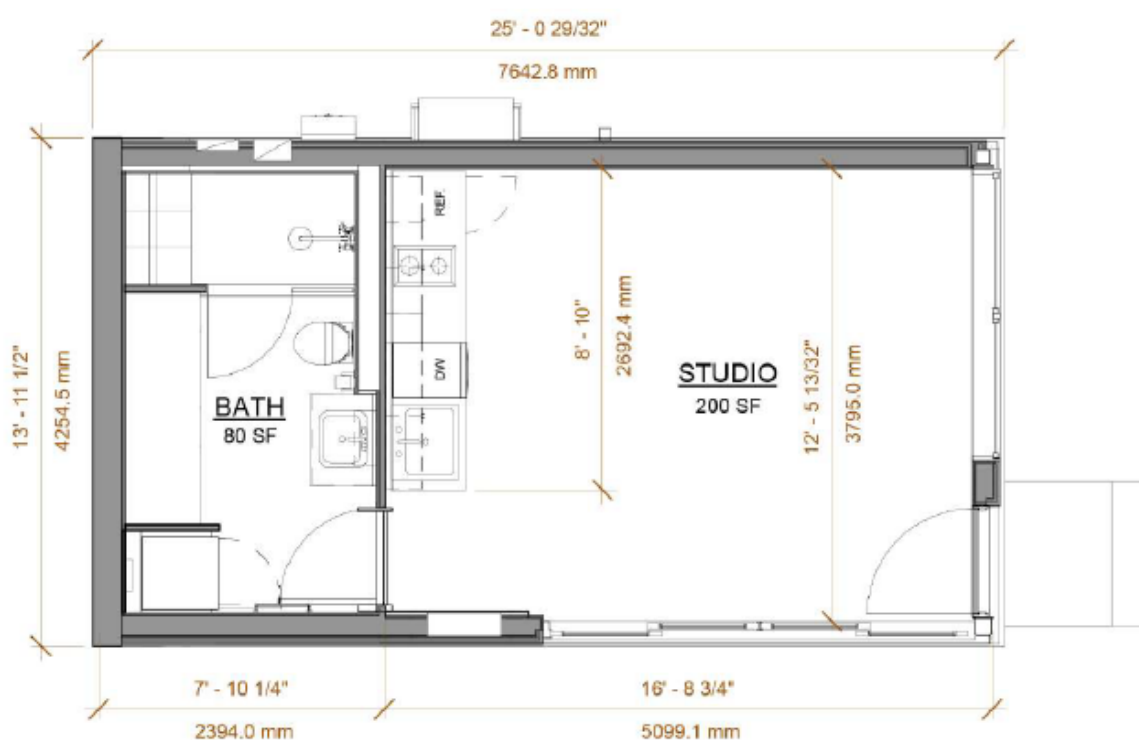
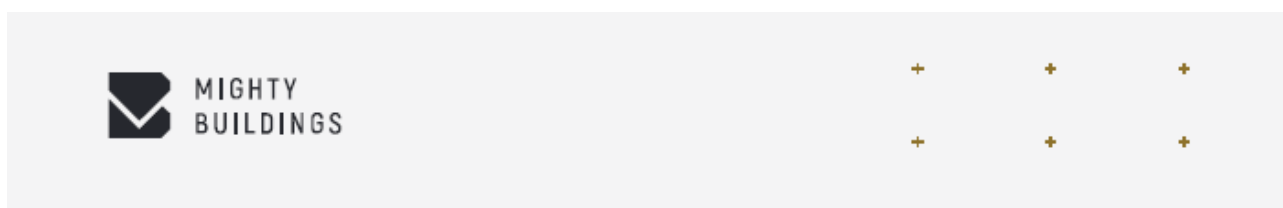


1 pav. Užbaigta namo statyba



2 pav. Namo perkėlimas

2 priedas. „Mighty Buildings“ namo išplanavimas [31]

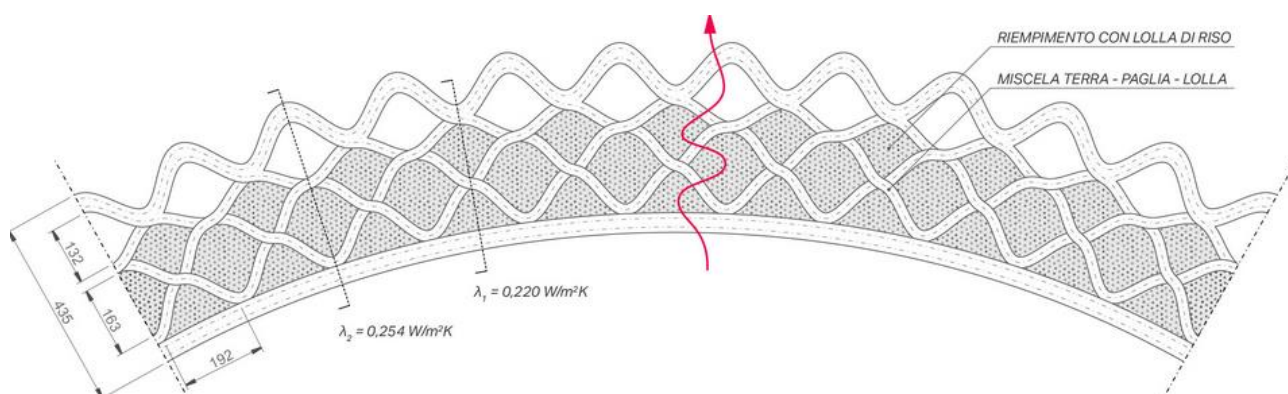


nataly@mightybuildings.com (650) 431-6026

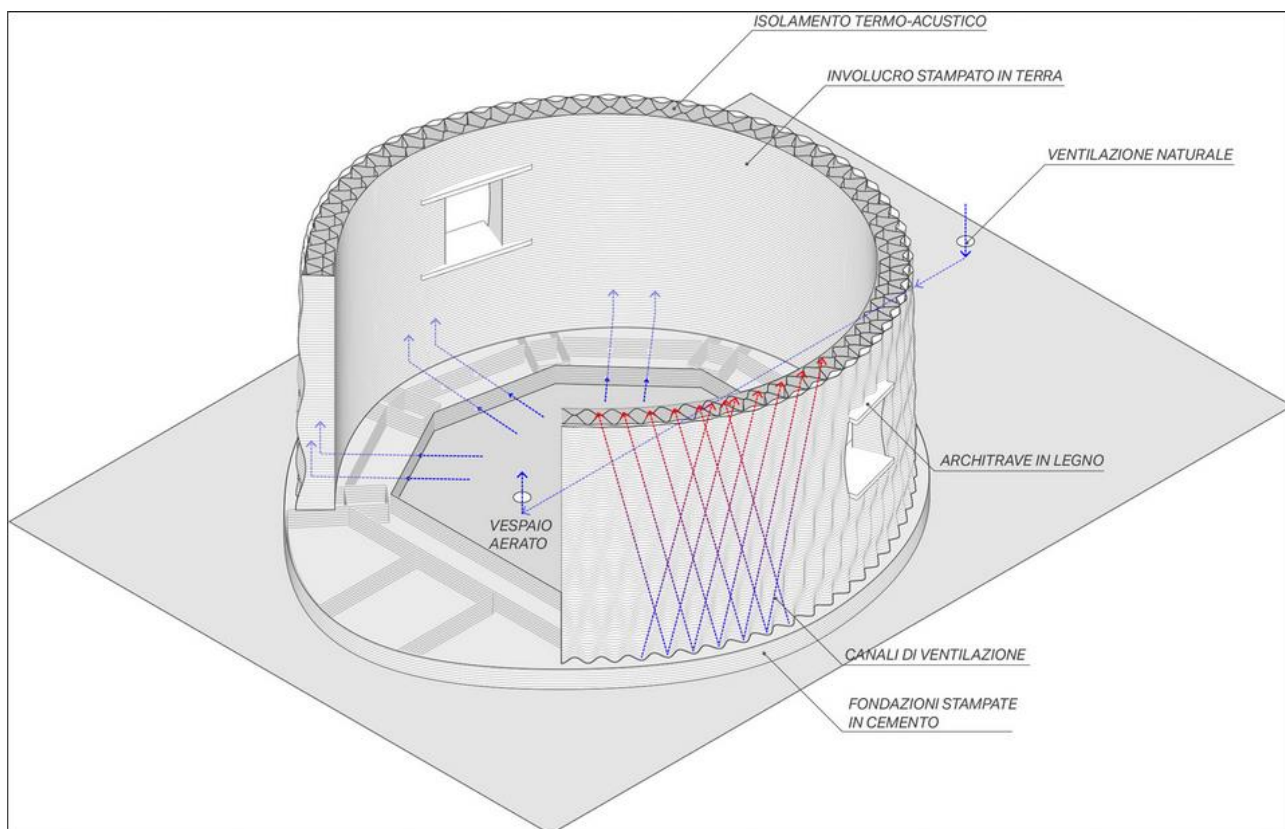
mightybuildings.com

3 pav. Įmonės „Mighty Buildings“ vieno iš statomų namų išplanavimas

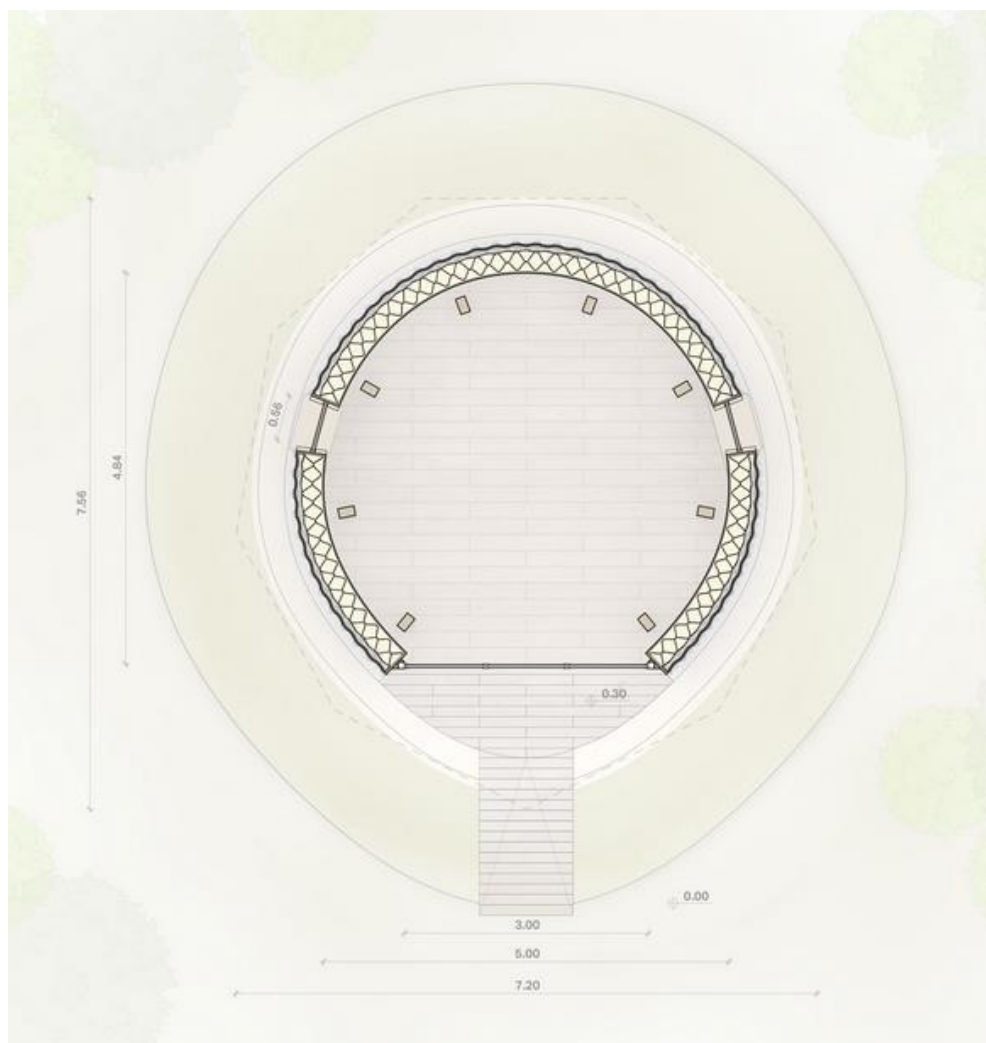
3 priedas. Italijos namo konstrukcijos [34]



4 pav. Sienos konstrukcija su vaizduojamais išmatavimais ir užpildyta grūdine izoliacija



5 pav. Namo planas



6 pav. Namo išmatavimai



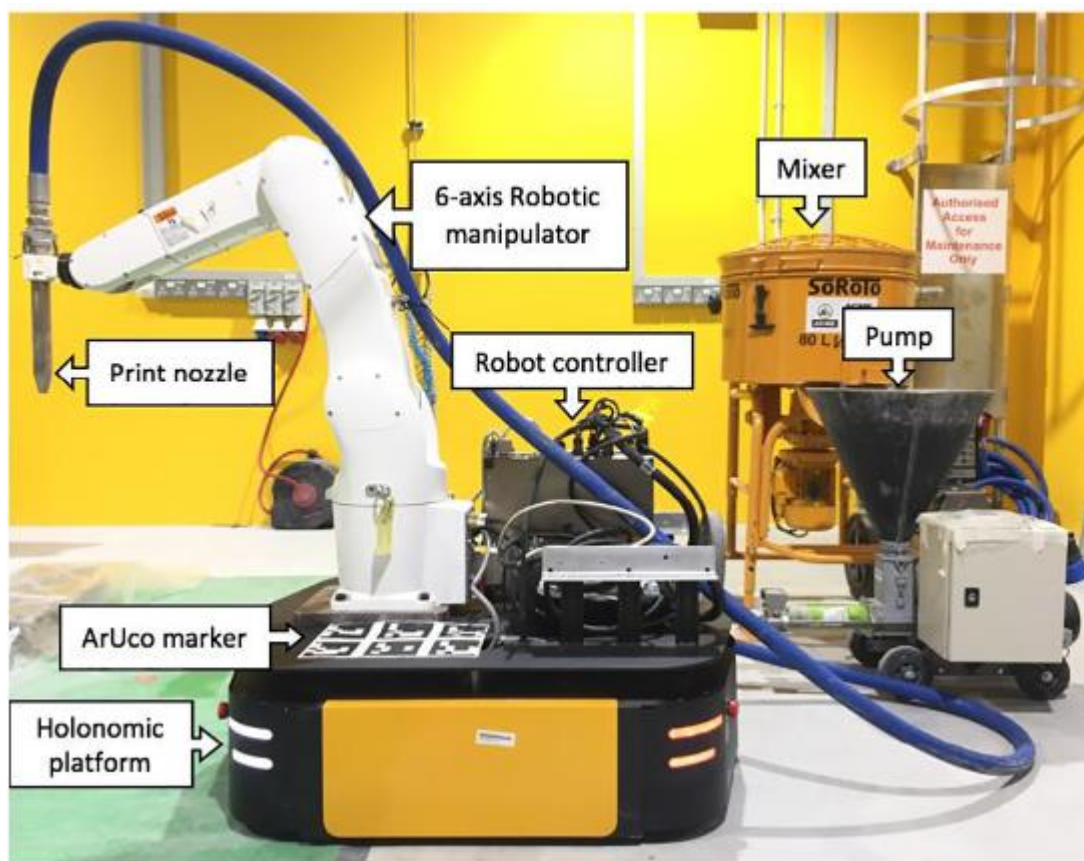
7 pav. Namo statyba stalybos aikštelėje su kabeliniu 3D spausdintuvu

4 priedas. „CyBe“ veiklos apžvalga pasaulyje [42]



8 pav. Įmonės „CyBe“ parduotų spausdintuvų ir įgyvendintų projektų žemėlapis pasaulyje

5 priedas. „CyBe“ 3D spausdintuvo sudedamosios dalys [24]



9 pav. Įmonės „CyBe“ sukurto spausdintuvo dalys

6 priedas. Apklauso anketa

Atestuotų specialistų apklausa apie kolonų konstrukcijas

Aš esu Neringa Gedlovaitė-Kvietkuvienė ir studijuoju Kauno technologijos universitete Statybos valdymo magistrantūrą. Rašau baigiamąjį darbą tema „3D spausdintuvu išspausdintų konstrukcijų prototipų daugiakriteris vertinimas“ ir norint išrinkti geriausią kolonos formą reikalinga atestuotų specialistų nuomonė nustatant užsibrėžtų kriterijų reikšmingumus. **Prašau Jūsų įvertinti kriterijų reikšmingumus nuo 1 iki 5, t.y. surikiuoti prioritetų didėjimo tvarka.**

Kokį kvalifikacijos atestatą turite?*

-Pasirinkite-

Kolonų konstrukcijų kriterijų reikšmingumas

1 - žemiausias įvertinimo balas (mažiausiai svarbu)

5 - aukščiausiai įvertinimo balas (labai svarbu)

	1	2	3	4	5
Sunaudotų medžiagų kaina*	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Išspausdinimo laikas*	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Kritinė klupdymo jėga*	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Stiprumo atsarga*	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ašinis poslinkis*	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Pateikti

10 pav. Atestuotų specialistų apklauso anketa

7 priedas. Kokybės kriterijų skaičiavimai kolonų konstrukcijoms pagal sienelės storį

Formos Nr.	Sienelės storis, mm	Kritinės jėgos reikšmė, N	Ašinis poslinkis, mm	Stiprio atsarga, kartai	Kaina, Eur	Laikas, min
1	10	2888,500	0,024	76,690	2,587	917
	20	8901,800	0,014	106,410	2,379	761
	30	10486,000	0,011	125,530	2,639	795
	40	10283,000	0,010	139,220	3,133	817
	50	10090,000	0,008	150,190	3,341	800
	60	9909,900	0,008	154,790	3,497	785
2	10	6183,400	0,025	54,220	1,313	331
	20	8784,900	0,015	110,420	1,573	518
	30	10219,000	0,012	129,190	1,716	532
	40	10076,000	0,010	141,730	1,846	538
	50	9916,400	0,009	158,020	1,95	529
	60	9753,900	0,008	160,220	2,028	511
3	10	1010,400	0,029	62,070	2,34	703
	20	3395,300	0,017	92,156	2,184	558
	30	6881,000	0,013	113,070	2,392	630
	40	11308,000	0,011	127,580	2,6	624
	50	11023,000	0,010	143,560	2,782	618
	60	10727,000	0,009	142,197	2,951	648
4	10	2745,700	0,084	27,407	1,027	239
	20	4356,000	0,027	60,385	1,261	391
	30	7853,500	0,017	109,656	1,391	415
	40	10493,000	0,013	130,340	1,521	427
	50	10521,000	0,011	137,889	1,625	426
	60	10375,000	0,010	151,670	1,716	423
5	10	4116,500	0,023	76,592	2,782	964
	20	10391,000	0,014	106,666	2,626	814
	30	10091,000	0,011	124,605	2,951	848
	40	9828,700	0,010	136,599	3,211	848
	50	9608,500	0,009	146,528	3,419	809
	60	9435,000	0,008	152,234	3,601	797
6	10	8426,300	0,026	48,213	1,391	349
	15	10006,000	0,019	70,040	1,664	545
	20	9975,000	0,015	101,880	1,794	551
	30	9792,200	0,011	117,728	1,911	549
	40	9597,200	0,010	133,345	1,989	532
	50	9422,000	0,009	145,546	2,054	503
	60	9279,500	0,008	161,187	1,391	349