



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
STATYBOS FAKULTETAS
GELŽBETONINIŲ KONSTRUKCIJŲ IR GEOTECHNIKOS KATEDRA

Žygimantas Baltutis

**3D SPAUSDINIMO BŪDU PAGAMINTŲ BETONINIŲ ELEMENTŲ
SKERSPJŪVIO FORMOS ANALIZĖ**

**SHAPE ANALYSIS OF 3D CONCRETE PRINTED WALL
ELEMENTS**

Baigiamasis magistro darbas

Pastatų konstrukcijų studijų programos, valstybinis kodas 6211EX040

Pastatų konstrukcijų specializacijos

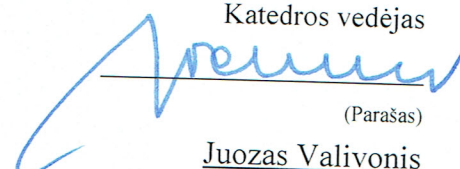
Statybos inžinerijos 02T studijų (mokslo) kryptis

Vilnius, 2019

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
STATYBOS FAKULTETAS
GELŽBETONINIŲ KONSTRUKCIJŲ IR GEOTECHNIKOS KATEDRA

TVIRTINU

Katedros vedėjas



(Parašas)

Juozas Valivonis

(Vardas, pavardė)

2019-06

(Data)

Žygimantas Baltutis

**3D SPAUSDINIMO BŪDU PAGAMINTŲ BETONINIŲ ELEMENTŲ
SKERSPJŪVIO FORMOS ANALIZĖ**

**SHAPE ANALYSIS OF 3D CONCRETE PRINTED WALL
ELEMENTS**

Baigiamasis magistro darbas

Pastatų konstrukcijų studijų programos, valstybinis kodas 6211EX040

Pastatų konstrukcijų specializacijos

Statybos inžinerijos 02T studijų (mokslo) kryptis

Vadovas

dr. Robertas Zavalis



2019 06 03

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Lietuvių kalbos konsultantas lekt. Lina Rutkienė

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Vilnius, 2019

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
STATYBOS FAKULTETAS
GELŽBETONINIŲ KONSTRUKCIJŲ IR GEOTECHNIKOS KATEDRA

Technologijos mokslų sritis
Statybos inžinerijos studijų kryptis
Statinių konstrukcijų studijų programa, valstybinis kodas 621H21001
Pastatų konstrukcijų specializacija

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(parašas)

Juozas Valivonis

(vardas, pavardė)

BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO
UŽDUOTIS

Nr.

Vilnius

Studentui (ei) Žygimantui Baltutčiui
(vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema 3D spausdinimo būdu pagamintų betoninių elementų skerspjūvio formos analizė
patvirtinta 2019 m. kovo 12 d. dekanų įsakymu Nr. 105ST

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2019 m. gegužės 27 d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

Atlikti literatūros apžvalgą bei išanalizuoti 3D spausdinimo būdu gaminamų betoninių elementų darbo, taikomų medžiagų, technologijų bei formos ypatumus. Taikant skaitinio modeliavimo metodą, atlikti geometrinių parametrų poveikio vertinimą, ekscentriškai gniuždomo santvaros formos elemento įtempių būviui.

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai:
.....
.....

Vadovas (vardas, pavardė, mokslinis laipsnis ir vardas)
.....
(parašas)
(vardas, pavardė, mokslinis laipsnis ir vardas)

Užduotį gavau
.....
(parašas)
.....
(vardas, pavardė)

2017-10-10
(data)

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

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Žygimantas Baltutis, 20132319

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

Statybos fakultetas

(Fakultetas)

Statinių konstrukcijos, PKfm-17

(Studijų programa, akademinė grupė)

BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO)

SAŽININGUMO DEKLARACIJA

2019 m. gegužės 10 d.
(Data)

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas (projektas) tema „3D Spausdinimo būdu pagamintų betoninių elementų skerspjūvio formos analizė“

patvirtintas 2019 m. kovo 12 d. dekanų potvarkiu Nr. 105 st,
parašytas savarankiškai. Šiame darbe (projekte) pateikta medžiaga nėra plagijuota.
Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.
Parenkant ir įvertinant medžiagą bei rengiant baigiamąjį darbą (projektą), mane konsultavo
mokslininkai ir specialistai: dr. Robertas Zavalis, lekt. Lina Rutkienė

Mano darbo (projekto) vadovas dr. Robertas Zavalis

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


(Parašas)

ŽYGYMANIAS BALUTIS
(Vardas ir pavardė)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas Statybos fakultetas Gelžbetoninių konstrukcijų ir geotechnikos katedra	ISBN Egz. sk. Data-.....-.....
Antrosios pakopos studijų Statinių konstrukcijų programos magistro baigiamasis darbas Pavadinimas 3D spausdinimo būdu pagamintų betoninių elementų skerspjūvio formos analizė Autorius Žygimantas Baltutis Vadovas Robertas Zavalis	
Kalba: lietuvių	
Anotacija Darbe analizuojamas, 3D betono spausdinimo būdu pagamintas, ekscentriškai lenkiamas sienos elementas, paremtas kinų įmonės „Winsun“ praktiniais pavyzdžiais. Pagrindinis šio darbo tikslas yra išanalizuoti geometrinių parametų poveikį konstrukcijos elgsenai, taikant skaitinį modeliavimą. Darbe nustatytas geometrinių dydžių: spyrio posvyrio kampo ir aikštelės ilgio poveikis konstrukcijos elgsenai, pateiktos rekomendacijos racionaliai formai pasirinkti. Baigiamąjį darbą sudaro septyni skyriai, kuriuose apžvelgiama 3D betono spausdinimo technologija, savybės darančios įtaką galutinio elemento elgsenai, praktikoje gaminamų ir analizuojamų elementų geometrijos, atliekama skaitinė tiriamų elementų analizė, aprašomas algoritmas dideliame kiekyje duomenų analizuoti ir pateikiami grafiniai rezultatai, išvados. Darbo apimtis yra 77 puslapiai be priedų, 59 paveikslai, 10 lentelių ir 38 literatūros šaltinių sąrašas.	
Prasminiai žodžiai: 3D betono spausdinimas, betonas, betoninė santvara, skerspjūvio formos analizė, spyrio posvyrio kampas, adityvus gaminimas, duomenų analizė.	

Vilnius Gediminas Technical University Faculty of Civil Engineering Department of Reinforced Concrete Structures and Geotechnics		ISBN Copies No. Date-.....-.....
Master Degree Studies Structural Engineering study programme Master Graduation Thesis Title Shape analysis of 3D concrete printed wall elements Author Žygimantas Baltutis Academic supervisor Robertas Zavalis		
Thesis language: Lithuanian		
Annotation An object of this thesis is 3D concrete printed, uniaxially loaded, wall type element, based on practical examples manufactured by Chinese construction company called "WinSun". Main goal of this thesis is to analyse an impact of certain geometrical properties for end product by using numerical analysis based on finite element method calculus. Thesis consists of seven sections in which 3D concrete printing technology, properties that influences mechanical behavior of an end product, geometries being manufactured and analysed in practice were reviewed, numerical analysis of tested elements are performed, algorithm in Python programming language is created to help analyse huge amounts of numerical data, graphical results and recommendations are provided. Thesis contains of 77 pages (appendix excluded), 59 figures, 10 tables, 38 literature references.		
Keywords: 3D concrete printing, concrete, concrete girder, shape analysis, strut angle, additive manufacturing, data analysis.		

Turinys

ĮVADAS	11
1. LITERATŪROS APŽVALGA	13
1.1 Spausdinamo betono technologija.....	13
1.2 Spausdinamos medžiagos pradiniai parametrai	19
1.3 Sluoksnių krypties poveikis	23
1.4 Spausdinamų elementų armavimas	25
1.5 Spausdinamų elementų formų apžvalga.....	32
2. SPAUSDINTO ELEMENTO FORMOS ANALIZĖ	39
2.1 Elemento skaičiuojamasis modelis	40
2.2 Elemento medžiagų parametrai	42
2.3 Skaičiavimo modelio sudarymas.....	45
2.4 Lyginamoji rezultatų analizė	48
IŠVADOS IR PASIŪLYMAI	71
LITERATŪRA IR ŠALTINIAI.....	72
PRIEDAI.....	76
A priedas. Maksimalių elemento atlaikomųjų momentų diagramos.....	76
B priedas. Elementų standumų ir momentų priklausomybės.....	80
C priedas. Elementų maksimalių momentų ir aukščio priklausomybės	88
D priedas. Duomenų analizės kodas, „Python“ programavimo kalbai.	91

LENTELIŲ SĄRAŠAS

2.1 lentelė. Skaitiniame modelyje, taikomų medžiagų parametrų reikšmės (Zavalis, 2013).....	43
2.2 lentelė. Kampo ir aikštelės įtakos palyginimas.	59
2.3 lentelė. Maksimalių momentų kampo, aikštelės ir priekrovos priklausomybės, veikiant 0 kN ašinėi jėgai	62
2.4 lentelė. Maksimalių momentų kampo, aikštelės ir priekrovos priklausomybės, veikiant 75 kN ašinėi jėgai	63
2.5 lentelė. Nearmuoto elemento maksimalių momentų kampo, aikštelės ir priekrovos priklausomybės, veikiant 0 kN ašinėi jėgai	64
2.6 lentelė. Ne armuoto elemento maksimalių momentų kampo, aikštelės ir priekrovos priklausomybės, veikiant 75 kN ašinėi jėgai	64
2.7 lentelė. Armuotų ir nearmuotų elementų lyginimas.....	65
2.8 lentelė. Santykinis plotas 1m elementui.....	67
2.9 lentelė. Maksimalaus momento ir elemento ploto santykiai	67
2.10 lentelė. Elemento aukščio ir standumų priklausomybės	69

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Supaprastintas 3D spausdinimo procesas sluoksniavimo metodu (angl. <i>layer deposition method</i>)	14
1.2 pav. Parametrai, nuo kurių priklauso betono spausdinimas (Bester, 2018)	15
1.3 pav. 3D spausdinimo būdu pagaminti bandiniai. Pradedant iš kairės: 30°, 22.5°, 7.5°, 15°	16
1.4 pav. Užpildo aukštis h_0 , sluoksnio aukštis l_n , elemento aukštis H (Rousell, 2018)	17
1.5 pav. CAM įranga valdoma ekstrudinė galva juda greičiu V , liedama skiedinį, taip kuriant sluoksnius kurių aukštis h ir plotis w . Bendras konstrukcijos aukštis H_m yra priklausomas dydis nuo liejimo greičio V ir liejamo kontūro ilgio L (Wangler et al., 2016)	20
1.6 pav. Elementas ir jo sluoksniai koordinačių sistemos atžvilgiu: a) apkrauta z kryptimi; b) y kryptimi; c) x kryptimi (Paul et al., 2017)	23
1.7 pav. Elementas ir jo sluoksniai koordinačių sistemos atžvilgiu: a) apkrauta z kryptimi; b) y kryptimi; c) x kryptimi (Paul et al., 2017)	23
1.8 pav. Betono tankinimas („123rf“, 2019)	26
1.9 pav. SDC metodu pagaminti elementai (Lloret-Fritsch, 2016): a) žvaigždės formos standus klojinys, 180° kampu besisukant per visą kolonos aukštį, b) 2m aukščio sienos elementas, pagamintas naudojant lanksčius klojinius, c-d) vertikalus sienos elementas, skirtas langams atitverti, ir jo geometrija	27
1.10 pav. MM technologija: a) 14m ilgio, dvigubo kreivumo sienos karkasas, b) karkaso užpildymas, c) 3m aukščio sienos maketas (DFAB HOUSE, 2018)	28
1.11 pav. Išorinio armavimo pavyzdys: a) skaitmeniniu būdu, pagamintas betoninis sijos elementas, b) išorinės armatūros ir betoninio elemento jungimo mazgas, c) tiesi sija, d) skirtingo skerspjūvio sija (Asprone, Menna, et al., 2018)	29
1.12 pav. Betoninio segmento spausdinimas, tiesiogiai liejant betoną ir vielą vienu metu (Bos et al., 2017)	30
1.13 pav. 7-nių sluoksnių sija, lenkimo bandyme (kairėje), elemento irtis dėl vielos nutrūkimo (dešinėje) (Bos et al., 2017)	30
1.14 pav. Pirmas, 3D betono spausdinimo būdu pagamintas, pėsčiųjų tiltas (Bos et al., 2017)	31
1.15 pav. Sudėtingos santvaros tipo formos, konstrukcija (XtreeE, 2017)	32
1.16 pav. Elemento sluoksnių tankumo poveikis, sukeliantis neviseiško užpildymo problemą (Schuteer et al, 2018)	33
1.17 pav. Schematiškai atvaizduojamas statmenas pjūvis, per sluoksnius išlietus 3D spausdintuvu. a) pastovaus sluoksnio aukščio modelis, b) tangentinio tęstinumo modelis (Gosselin et al., 2016). 34	
1.18 pav. Daugiafunkcė siena: a) daugiafunkcės sienos elemento CAD modelis, b) 3D spausdinimo būdu pagamintas daugiafunkcis sienos elementas (Gosselin et al., 2016)	35
1.19 pav. Topologijos optimizacijos pavyzdys, naudojant: a) santvraos elementus, b) kontinumo elementus (Gaynor et al, 2013)	36
1.20 pav. Vidinių jėgų atvaizdavimas, optimizuojant elementą: a) analizuojamas elementas, b) tradicinis stygų - spyrių modelis, c) optimizuotas santvraos modelis, d) optimizuotas kontinuumo modelis. Raudonos linijos vaizduoja tempiamas zonas, juoda punktyro linija – gniuždomas (Gaynor et al., 2013)	37
1.21 pav. Hibrinės santvraos ir kontinuumo modelio optimizacijos pavyzdžiai: a) sijos tipo elementas; b) sienos tipo elementas; c) tilto atramos tipo elementas (Gaynor et al., 2013)	38

2.1 pav. Kompanijos <i>WinSun</i> produktas, moduliniai blokai („WinSun“, 2019)	39
2.2 pav. Tiriamos konstrukcijos., tipinė geometrija ir pjūvis	40
2.3 pav. Stygų spyrio metodo, mazgų tipai a) tempiamas, b) gniuždomas (Williams, Deschenes, Bayrak, 2012)	41
2.4 pav. Visi tiriami geometrijos variantai.....	41
2.5 pav. Tipinės geometrijos, skaičiuojamoji schema.....	42
2.6 pav. Medžiagų modeliai: a) eksponentinis, b) parabolinis.....	43
2.7 pav. Plieno medžiagos modelis pagal EC3	44
2.8 pav. Elemento geometrijos analizės procesas	45
2.9 pav. Elemento baigtinių elementų metodo, skaičiuojamasis modelis, „MidasFX“ aplinkoje	46
2.10 pav. Modeliuojamas 2D elemento pjūvis (kairėje) ir realus elemento skerspjūvis (dešinėje)..	46
2.11 pav. Elemento skaičiuojamojo modelio, armavimas.....	47
2.12 pav. Elemento skaičiuojamasis modelis, „DianaFEA“ aplinkoje	48
2.13 pav. Rezultatų formato, Excel forma pavyzdys	49
2.14 pav. Armuoto elemento pradinio standumo ir aikštelės ilgio priklausomybė.....	51
2.15 pav. Elemento „25_variable_0_R“ momento ir standumo priklausomybių diagrama	51
2.16 pav. Elemento „55_variable_0_R“ momento ir standumo priklausomybių diagrama	52
2.17 pav. Elemento „55_25_0_R“ plyšio pločio pasiskirstymas 1 grafiko taške	53
2.18 pav. Skiedinio (aukščiau) ir armatūros tempimo įtempių pasiskirstymas elemente prieš pirmąjį trūkį.....	53
2.19 pav. Skiedinio(aukščiau) ir armatūros tempimo įtempių pasiskirstymas elemente po pirmojo trūkio.....	54
2.20 pav. 55_25 aukščiau, 55_100 elementų pleišėjimo pasiskirstymai prieš pirmą trūkį.....	54
2.21 pav. Ne armuoto elemento pradinio standumo ir aikštelės ilgio priklausomybė	55
2.22 pav. Elemento „25_variable_0_UR“ momento ir standumo priklausomybių diagrama.....	56
2.23 pav. Armuoto elemento pradinio standumo ir kampo didumo priklausomybė	57
2.24 pav. Elementų „variable_25_0_R“ momento ir standumo priklausomybių diagrama	58
2.25 pav. Elemento „variable_100_0_R“ momento ir standumo priklausomybių diagrama	58
2.26 pav. 25_25 aukščiau, 55_25 elementų pleišėjimo pasiskirstymai, prieš pirmą trūkį.....	59
2.27 pav. Ne armuoto elemento pradinio standumo ir kampo priklausomybė	60
2.28 pav. Tipinė ne armuoto elemento momento ir standumo priklausomybė.....	60
2.29 pav. Elemento 35_50_75_R plyšių pločio pasiskirstymo diagrama	61
2.30 pav. Elemento 55_50_75_R plyšių pločio pasiskirstymo diagrama	61
2.31 pav. 35_75_R elemento pleišėjimo pasiskirstymas. Esant 0kN (aukščiau) ir 45kN ašinei jėgai	62
2.32 pav. Priekrovos ir laikomosios galios priklausomybė, armuotiems elementams.....	63
2.33 pav. Priekrovos ir laikomosios galios priklausomybė nearmuotiems elementams	64
2.34 pav. Priekrovos ir vidutinių momentų priklausomybė.....	66
2.35 pav. Aukščio poveikio analizės tiriami geometrijos variantai	68
2.36 pav. Elemento atlaikomojo momento ir standumo priklausomybės grafikas.	68
2.37 pav. Elemento aukščio ir pradinių standumų priklausomybės diagrama.....	70
2.38 pav. Tipinė elemento atlaikomųjų momentų maksimumų ir elemento aukščio priklausomybė.....	70

IVADAS

Darbo aktualumas. Statybos sektoriaus automatizavimo svarbą sąlygoja daugybė priežasčių: darbo saugos reikalavimų griežtėjimas; darbo užmokesčio didėjimas; kvalifikuotos darbo jėgos didėjimas; statybos procesų, atliekamų statybos aikštelėje, ribojimas; gamybos kaštai; architektūrinė laisvė formoms. Jau dabar dažnai susiduriama su viena ar kita automatizacijos forma statybos sektoriuje, pavyzdžiais galime laikyti tokius procesus kaip automatizuotas plytelių klojimas robotu, išmanieji namai, automatizuoti suvirinimo robotai, 3D betono, bei metalo spausdintuvai ir pan.

Šiuolaikinėse statybose retai kada pasitaiko serijinės gamybos elementų, praktiškai visi modernūs statiniai turi skirtingų formų ir matmenų sienas, perdangas, fasadus ar atskirus jų elementus. Todėl čia matoma aiški galimybė sutaupyti laiko bei medžiagų, mažinant gamybos proceso atliekų kiekį bei klotinių kiekį.

3D betoninių elementų spausdinimas yra viena iš technologijų, kuri pamažu skverbiasi į statybų rinką. Vakarų Europoje tokie žinomi universitetai, kaip Eindhoveno techninis universitetas, Ciuricho universitetas, Loughborough universitetas (Wolfs et al, 2015; Le et al., 2012; Wangler et al., 2016) ne pirmus metus tyrinėja įvairias 3D betono spausdinimo technologijos subtilybes. Eindhoveno universiteto studentai 2017 m., pagamino pirmą pėsčiųjų tiltą pasaulyje, pagamintą 3D betono spausdinimo būdu.

Vystantis statybų rinkos skaitmenizacijai ir į rinką ateinant naujiems 3D spausdintuvams, atsiranda poreikis nagrinėti atspausdintų elementų elgseną ne tik gamybos stadijoje, bet ir eksploatacinėje. Analizuojant tokius elementus, svarbu išnagrinėti ne tik jų medžiagos, bet ir formos parametrus.

Darbo problematika. Siekiant efektyviai išnaudoti funkcinės – mechaninės 3D elemento savybes būtina, kad šviežiai išspausdinta medžiaga turėtų tam tikras reologines savybes. Tikėtina, kad 3D technologijos ateityje bus taikomos plačiai, o projektuotojams reikės metodų, kaip taupiai ir efektyviai suprojektuoti tokias konstrukcijas. Todėl dabar pradedame nagrinėti šią temą ir analizuojame formos galimybes, atsižvelgiant į tai, kad tokių tyrimų dar nėra daug, darbe nutarėme orientuotis į eksploataavimo sąlygomis dirbančio tokio elemento raizginio **formą**.

Baigiamajame magistro darbe nagrinėjamas mechaninių savybių kitimas, esant kintamiems formos parametrams. Atliekama parametrinė rezultatų analizė.

Tyrimų objektas. Ekscentriškai gniuždomas santvaros formos skerspjuvio elementas.

Darbo tikslas. Išanalizuoti ekscentriškai gniuždomo santvaros formos elemento elgseną taikant skaitinį modeliavimą.

Darbo tikslui pasiekti keliama šie **uždaviniai**:

1. Išanalizuoti betono 3D spausdinimo galimybes, taikomas medžiagas ir technologijas.
2. Taikant skaitinio modeliavimo metodą, atlikti geometrinių parametrų poveikio vertinimą, ekscentriškai gniuždomo santvaros formos elemento įtempių būviui.

Darbo struktūra

Darbą sudaro įvadas, du skyriai ir rezultatų apibendrinimas, naudotas literatūros ir šaltinių sąrašas. Darbo apimtis yra 74 puslapiai be priedų, 59 paveikslai, 10 lentelių ir 38 literatūros šaltinių sąrašas.

1. LITERATŪROS APŽVALGA

1.1 Spausdinamo betono technologija

1.1.1 Adityvioji gamyba

Šiuolaikinis pasaulis jau nebeįsivaizduojamas be kompozitinių elementų gamybos, pradedant nuo buities reikmenų iki aukštųjų technologijų produktų, kurie yra gaminami iš skirtingų medžiagų, galutiniame procese gaunant kompozitinius gaminius. Tai apima tiek metalo liejimą, tiek plastiko, betono, polimero ar kitokios medžiagos.

Adityvioji gamyba (angl. *additive manufacturing*, toliau – AM) paaiškinamas kaip gamybos procesas, kai atskiri gaminio elementai yra jungiami vienas su kitu (dažniausiai sluoksnis po sluoksnio) tam tikros nuotoliniu būdu valdomos įrangos pagalba“ (Kazemian, 2017, p. 40). AM vystymasis yra nulemtas sparčios pramonės industrializacijos, kuri pamažu tolsta nuo tradicinės aikštelės statybos procesų. Juos keičia pažangesni automatizuoti procesai, kurie yra žymiai greitesni bei pigesni. Tačiau tradicinio betonavimo sritis dar nėra taip paveikta automatizavimo kaip kiti pramonės sektoriai. Reikia paminėti, jog architektai naudoja AM technologijas mažo mastelio modeliams ir vizualizacijoms daryti. Čia yra matoma akivaizdi perspektyva Lietuvos statybos pramonės sektoriui, kuris gerokai atsilieka nuo Europos rinkos, pasak A. Sagatausko:

Europoje pagal santykinį robotų skaičių žmogui pirmąją Vokietiją, kur 10 tūkstančių darbuotojų tenka 322 robotai, <...> Tuo metu Lietuvoje tiems patiems 10 tūkstančių tenka vos 5. (Sagatauskas, 2018)

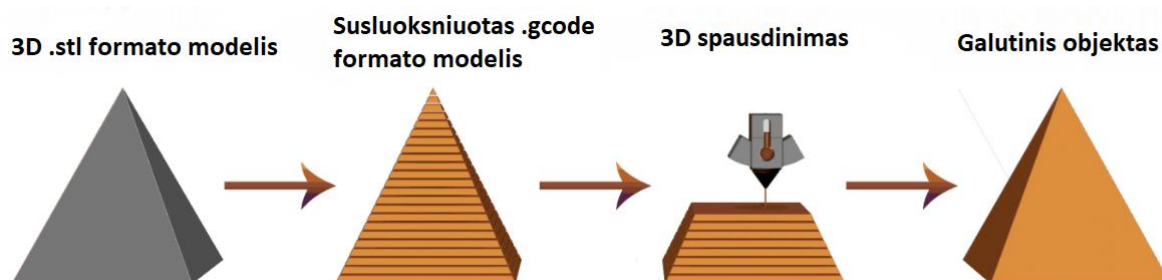
Išankstinės gamybos ir mišriosios statybos rezultatai jau yra akivaizdūs. Remiantis projektavimo Lietuvoje praktika, galima teigti jog šiuo metu didžioji dalis pastatų tiek Lietuvoje, tiek Šiaurės Europoje yra iš anksto surenkamos gamybos proceso rezultatai. Pastaruosius du dešimtmečius stebima akivaizdi tendencija – perėjimas nuo monolitinių (aikštelėje pilamo betono) į visiškai surenkamą gelžbetoninių elementų gamybą. Tai davė labai gerų rezultatų visam statybos sektoriui: kūrėsi surenkamo gelžbetonio gamyklos, tobulėjo specifinės žinios, kūrėsi gerosios praktikos ir kt.

Tačiau šiame modernizacijos procese vis dar yra neriboto potencialo tobulėti naudojant AM technologijas ir iš anksto gaminant elementus. Kadangi AM procesai mažina žmogiškųjų išteklių poreikį, o tuo pačiu ir kainą, nereikalauja klotinių sistemų, užtikrina darbų saugą ir elementų gamybos kaštus. Taip pat AM mažina poveikį aplinkai naudojant alternatyvias rišamąsias medžiagas, užtikrina galutinio produkto kokybę statant geometriškai sudėtingus objektus.

Literatūroje aprašomi trys pagrindiniai AM technologijų tipai, naudojami architektūros ir statybos sektoriuose betonavimo darbams atlikti. „D-Shape“, „Contour Crafting“ ir „3D Printing of Concrete (3DPC)“ (Bos et al., 2016). Visi šie metodai panašūs tuo, jog juos taikant gaminami 3D objektai

jungiant atskirus jų komponentus. Vis dėlto, jie buvo sukurti skirtingiems panaudojimo ir medžiagų tipams, o tai daro kiekvieną iš jų ypatingą.

Visi procesai yra paremti tokiu principu: sukurtas 3D CAD (angl. *computer-aided-design*) modelis, kuris toliau yra paverčiamas į STL (angl. *standard triangulation language*) tipo failą. Toliau STL failas yra nuskaitomas tam skirta programine įranga, kuri „supjausto“ modelį į sluoksnius pagal Dekarto koordinatų sistemą dvimatėje plokštumoje. Toks sluoksniuotas modelis yra „siunčiamas“ į gamybą, kur taikant AM technologiją veikiančios mašinos, šiuo atveju 3D betono spausdintuvas, lieja sumodeliuotą, sluoksniuotą elementą pagal jį atitinkantį modelį.



1.1 pav. Supaprastintas 3D spausdinimo procesas sluoksniavimo metodu (angl. *layer deposition method*)

„D-Shape“ – procesas paremtas „Z-corp 3D“ spausdinimo sistemos, kuri yra tobulinama nuo 2004 m. Technologija veikia dalelių nusodinimo ir selektyvaus kietėjimo, naudojant rišamąją medžiagą, principu: į smėlio ar kitos mechaniškai pastovios medžiagos masę, robotu yra įterpiama cementinė matrica, kuri kietėjimo metu suriša smėlį (Cesaretti et al., 2014).

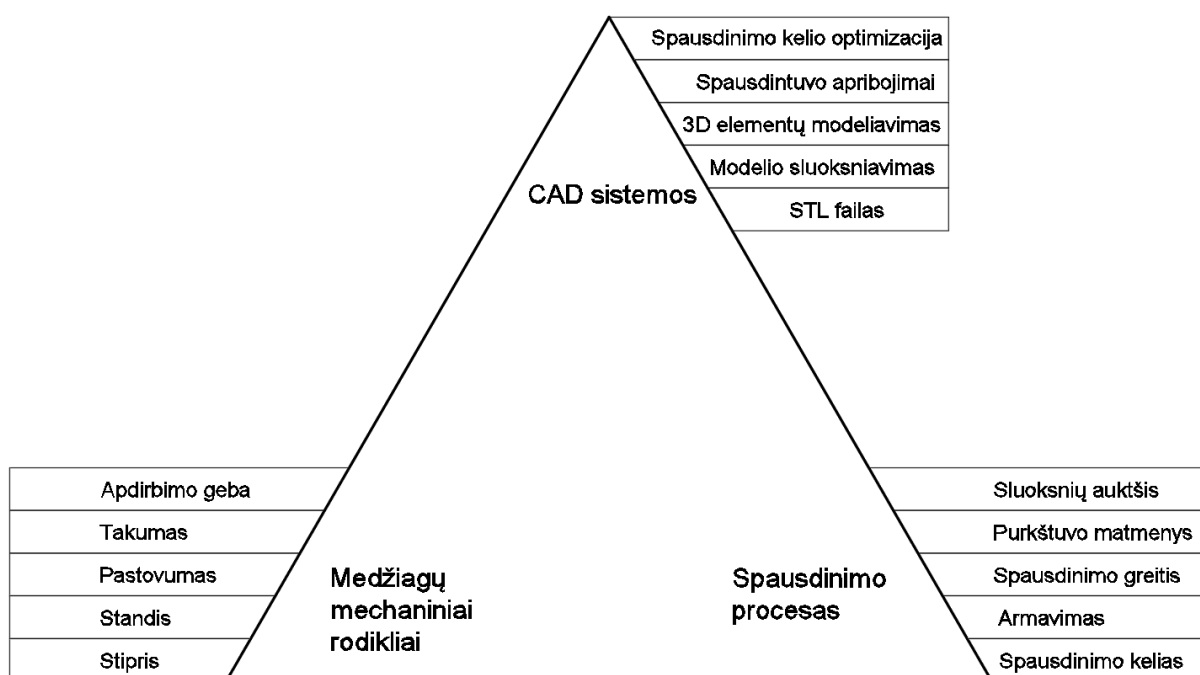
„Contour Crafting“ – Dr. Bekrokh Khoshnevis ištobulintas metodas, kuris paremtas bet kokios formos kūrimu plane. Taip pat kaip ir kituose metoduose, mašina, valdoma kompiuteriu, nuskaityto sluoksniuotą modelį ir robotine ranka lieja sluoksnį po sluoksnio, sudarant tam tikrą formą (Wolfs, Bos, Salet, 2018),

3DCP metodas naudoja tris skirtingus medžiagos liejimo variantus: kranas, robotas arba rėmas. Visi variantai dirba tokiu pačiu principu kaip ir prieš tai minėtieji, tačiau šis metodas turi daugiau laisvės laipsnių, pvz., robotinė ranka gali lieti sluoksnius X, Y, Z, RX, RY, RZ kryptimis, o tuo tarpu CC metodas leidžia tik X,Y (Wolfs, Salet, Hendriks, 2015).

1.1.2 Betono svarba skaitmeniniame pasaulyje

Betonas yra plačiausiai naudojama statybinė medžiaga visame pasaulyje (Bos et al., 2016). Per metus pasaulyje suvartojama 2 milijardai tonų betono. Jo populiarumas nulemtas jo paprastumo: greitai paruošiamas, pigus ir lengvai išgaunamas. Panaudojimo sritis plati: tiltai, pastatai, silosai, tuneliai, pamatai bei daugybė kitų požeminių bei antžeminių statinių. Betonas taip pat yra daugelio infrastruktūros projektų esminė žaliava. Taip pat reikia pabrėžti, jog betonas yra labai gerai apdirbama medžiaga. Jo savybė pradinėje stadijoje tekėti leidžia gaminti bet kokios formos gaminius. Geros mechaninės charakteristikos užtikrina betono naudojimo populiarumą. Tačiau reikia suprasti, jog nors betono prieinamumas dabar labai geras, jis nėra neribotas. Vis dėlto tai yra iškastinė žaliava, todėl reikia skirti didesnę dėmesį alternatyviųjų resursų panaudojimui betono gamyboje.

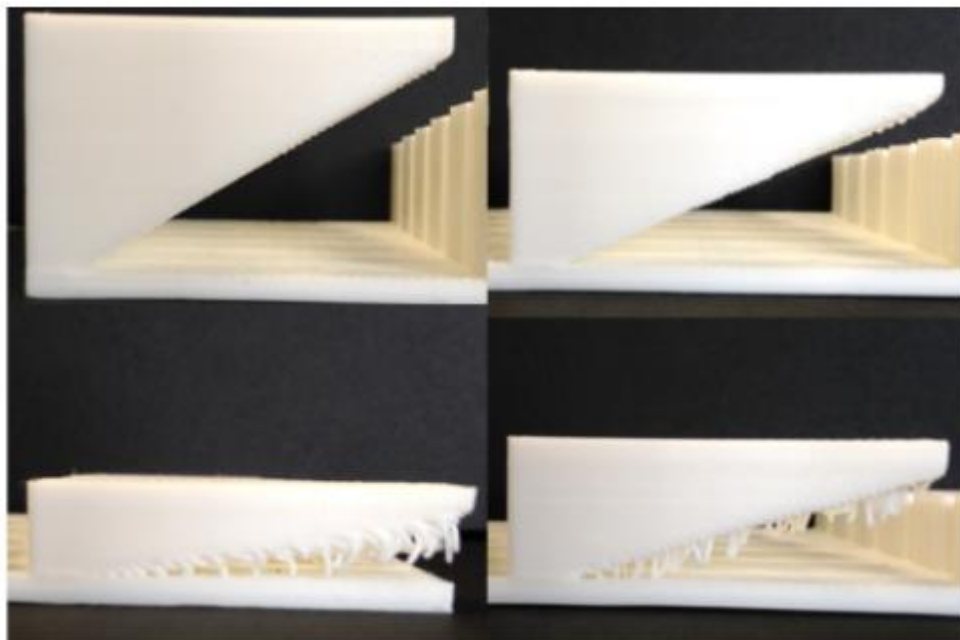
Toliau plėtojant temą reikia suprasti, kas daro didžiausią poveikį betonuojant elementus AM technologijos metodais. 1.2 pav. pateikta grafinė viso betonavimo proceso dalių iliustracija. Besteris (Bester, 2018) išskiria tokias pagrindines dalis: kompiuterinio projektavimo sistemos (angl. *computer aided design*), spausdinimo procesas bei spausdinamo elemento medžiagų rodikliai.



1.2 pav. Parametrai, nuo kurių priklauso betono spausdinimas (Bester, 2018)

Visas spausdinimo procesas prasideda virtualioje aplinkoje. Pirmiausia modeliuojamas galutinis produktas tokio failo formatu, kuris yra suprantamas programiniams paketams, kurie susluoksniuoja galutinį elementą į sluoksnius, kuriais bus liejamas elementas. Dažniausia modeliuojama .stl failo formatu (Paul et al., 2018). Modeliavimo stadijoje svarbu suvokti 3D spausdinimo galimybių ribas ir atsižvelgti į tokius nematomus procesus kaip savasis svoris. Pavyzdžiui, spausdinant elementą, esant

dideliu ekscentricitetu, arba spausdinant ant sluoksnių, kurie neturi atramos taško, elementas dar spausdinimo metu gali neatlaikyti savojo svorio ir tiesiog suklyti, arba gali atsirasti spausdinimo defektų 1.3 pav.



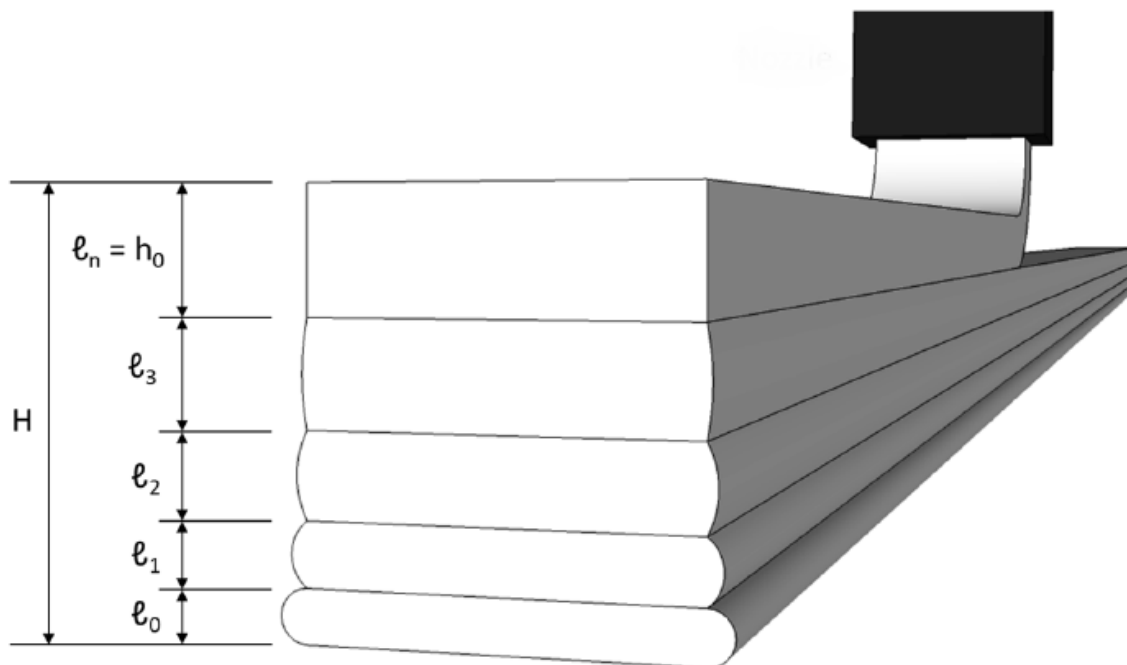
1.3 pav. 3D spausdinimo būdu pagaminti bandiniai. Pradedant iš kairės: 30°, 22.5°, 7.5°, 15°

Spausdinimo procesas priklauso nuo tokių parametrų kaip spausdinimo greitis, sluoksnių aukštis, purkštuko matmenys, spausdinimo kelias bei armavimas. Galutinio produkto kokybė stipriai priklauso nuo efektyvios šių parametrų kontrolės.

Spausdinimo greitis labiausiai daro įtaką spausdinamų sluoksnių aukščiui. Naudojant pastovios geometrijos purkštuką bei pastovų medžiagos padavimo greitį, spausdinimo greitis gali sąlygoti tokias pasekmes: per lėtai spausdinant bus išlietas per didelis kiekis sluoksnio, per greitai išliejant nebus užtikrinama sluoksnių kokybė (Paul et al., 2018).

Purkštukai dažniausiai būna apskritimo, kvadrato ir stačiakampio formos. Apskritimo formos purkštukų diametras varijuoja nuo 4 iki 25mm (Lim et al., 2011; Bos et al., 2016), tačiau iš apskritimo formos purkštukų liejamus sluoksnius sunku konstruoti dėl nevienodo kontakto paviršiaus ir medžiagos deformacijų (Bos et al., 2016). Kvadratiniai ir stačiakampiai purkštukai dažniausiai būna nuo 10x10mm iki 25x25mm ir atitinkamai nuo 9x6mm iki 10x40mm (Paut et al., 2018; Bos et al., 2016). Sluoksniai liejami iš kvadratinių ir stačiakampių purkštukų pagerina sukibimą bei paviršiaus kokybę (Bos et al., 2016). Taip pat reikia paminėti, jog tokio tipo purkštukus reikėtų naudoti tik tada kai spausdintuvo galva gali judėti laisvai, spausdinamo kelio atžvilgiu, taip išvengiant spausdinamų sluoksnių susisukimo. Dažniausiai spausdintuvo purkštuko geometrija apsprendžiama spausdinamo elemento mastelio.

Medžiaga, liejama pro purkštuką, literatūroje apie 3D betono spausdinimą aprašoma kaip užpildas (angl. *filament*). Spausdinimo procese užpildas yra liejamas per purkštuką ir sluoksniuojamas. Čia svarbu paminėti, jog užpildo aukštis yra pradinis nedeformuoto sluoksnio aukštis, o n -tasis sluoksnio aukštis (l_n) yra deformuotas dėl jį veikiančių viršutinių sluoksnių 1.4 pav. (Rousell, 2018)



1.4 pav. Užpildo aukštis h_0 , sluoksnio aukštis l_n , elemento aukštis H (Rousell, 2018)

Užpildo aukštis varijuoja nuo 1mm iki 10cm ir labiausiai priklauso nuo pradinių spausdinamos medžiagos takumo įtempių (Rousell, 2018).

Medžiagos parametrų nustatymas dabar yra aktualiausia tema betono spausdinimo tyrinėjimuose. Siekiant surasti optimalų medžiagos mišinį yra atlikta daugybė bandymų. Tačiau didžioji dalis tyrinėjimų nenaudoja stambių medžiagos užpildų. Dažniausiai yra apsiribojama maksimaliu 2mm dydžio užpildu, o tai iš esmės yra cementinė pasta – skiedinys. Taip pat papildomai naudojami betono priedai pagerinantys betono takumą, kietėjimą ir pan. Literatūroje aprašomi vandens ir rišamosios medžiagos bei rišamosios medžiagos ir smulkiojo užpildo (smėlio) santykiai svyruoja nuo 0.23 iki 0.41 ir atitinkamai nuo 0.63 iki 0.73 (Paul et al., 2018).

Apdirbimo geba (angl. *extrudability*) – medžiagos galimybė tinkamai ją lieti per tam tikrą spausdinimo galvutę nenutrūkstamai. Spausdinant betoną šviežiai pagamintas betonas turi laisvai keliauti tiekimo keliu, išlaikydamas išspaustą formą. Tiksotropinė betono forma turi būti palaikoma norint jį pumpuoti, tačiau tiksotropinei medžiagai maišymasis, sukurtas pumpuojant ruošinį, sumažina ruošinio klampą. Geras rezultatas buvo pasiektas naudojant savaime susislenkančio betono, torkretuojamo betono principus (Le et al., 2012).

Takumas – galimybė betoną tiekti į spausdinimo galvutę per padavimo sistemą tam tikrame laiko tarpe. Taip pat tiekama medžiaga turi išlikti mobili ir stabili nuo tiekimo sukuriama slėgio. Tiekimo metu medžiaga turi būti pakankamai minkšta ir slanki, o liejimo galvutėje ji turi būti pakankamai standi, kad išlieta laikytų savo formą.

1.2 Spausdinamos medžiagos pradiniai parametrai

1.2.1 Pagrindinės spausdinamo betono problemos

Kaip ir buvo minėta anksčiau, daugiausia tyrimų šioje srityje yra atliekama sluoksnių liejimo technologijos pagrindu. Tolesnė analizė pateikia pagrindinius iššūkius, su kuriais susiduria bet kokia technologija, paremta sluoksnių liejimo principu.

Pirmiausia, kiekvienas liejamas sluoksnis turi atlaikyti savo ir paskiau einančių sluoksnių svorį ir tuo pačiu metu persidengti taip, jog nesusidarytų neveiksnios jungtys (aprašymas toliau šiame skyriuje) dėl nepakankamo skiedinio išsimaišymo.

Skiedinio kietėjimas

Sluoksniavimo metodu liejamas skiedinys pavaizduotas 1.5 pav. Kiekvienas naujai išlietas sluoksnis turi atlaikyti tangentinius įtempius, atsirandančius dėl savojo svorio poveikio. Šie įtempiai gali būti apskaičiuojamai mokslininkų (Schowalter, Christensen, 1998) aprašyta priklausomybe:

$$\tau_{0,0} = \rho \cdot g \cdot \frac{h}{\sqrt{3}} \quad (1)$$

čia

ρ – medžiagos tankis,

g – laisvojo kritimo pagreitis,

h - sluoksnio aukštis.

Sluoksniavimo proceso pabaigoje, apatinis sluoksnis turi laikyti visą virš savęs esančią konstrukciją. Tokiu atveju įtempiai būtų apskaičiuojami pagal priklausomybę (Schowalter, Christensen, 1998):

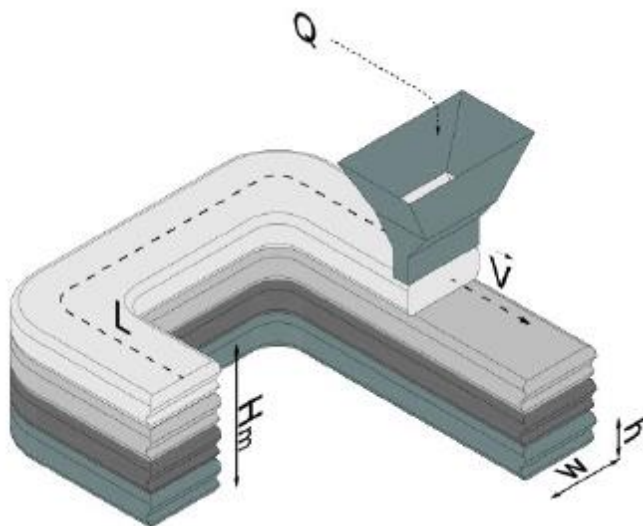
$$\tau_{0,f} = \rho \cdot g \cdot \frac{H_m}{\sqrt{3}} \quad (2)$$

Taigi, galutinio ir pradinio stiprio santykis turi būti:

$$\frac{\tau_{0,f}}{\tau_{0,i}} = \frac{H_m}{h} \quad (3)$$

Turint omenyje, jog dažniausiai pasitaikantys matmenys tokio tipo spausdintiems elementams, kai sluoksnio aukštis kinta tarp 1–3cm ir bendras aukštis kinta tarp 80–150cm, gaunamos santykio reikšmės kinta ribose 25–150.

Vienas svarbiausių faktorių yra ryšio tarp medžiagos sluoksnių susidarymas. Būtina nagrinėti sluoksnių tarpusavio sąveiką ir suprasti kaip formuojasi ryšys tarp cementinio skiedinio sluoksnių.



1.5 pav. CAM įranga valdoma ekstrudinė galva juda greičiu V , liedama skiedinį, taip kuriant sluoksnius kurių aukštis h ir plotis w . Bendras konstrukcijos aukštis H_m yra priklausomas dydis nuo liejimo greičio V ir liejamo kontūro ilgio L (Wangler et al., 2016)

Sukibimo stipris gali būti aprašomas kaip tūrio dalelių ir tarpdalelinių jėgų funkcija (Flatt, Bowen, Yodel, 2016). Nevertinant hidratacijos, santykis (3) atspindi tarpdalelinių jėgų santykį, kuris dar kartą išreiškiamas ir gali būti susiejamas su efektyviu tarpdalelinių jungčių sluoksnio storu (angl. *steric hindrance layer*). Šis sluoksnis „atitolina“ dalelių jungimąsi tarp gretimų liejamų sluoksnių (Gelardi, Flatt, 2016):

$$\sqrt{\frac{\tau_{0,f}}{\tau_{0,i}}} = \frac{\delta_i}{\delta_f}. \quad (4)$$

Šis santykis, pagal turimus duomenis, varijuotų tarp 5 ir 12. Paprasčiausiu atveju $\delta_f = 0.8nm$, kai skiedinys neturi jokių priemaišų (Perrot et al., 2012). Todėl pradinis sluoksnio storis δ_i turėtų būti apie 4–10nm. Tokio rezultato praktiškai yra neįmanoma pasiekti su turimais plastifikatoriais, todėl priimta išvada, jog medžiaga kietėja, kol yra tiekimo mašinoje (t. y. dar neišspausdinta). Tai palieka šias pasirinktis:

- Išlietas skiedinys nesideformuoja ir turi didesnę pradinę stiprį. Tačiau jam išspausti reikia didesnio slėgio, o tai sąlygoja didesnę tikimybę susikurti neveiksnioms jungtims.
- Hidratacija didina medžiagos stiprį, tačiau ji neturi paveikti mišinio, esančio tiekimo sistemoje. Tam tikslui turi būti užtikrintas pastovus maišymas prieš tiekiant skiedinį.

Neveiksnios jungtys.

Klasikiniu betonavimo atveju vienas iš svarbiausių kriterijų gamintojui yra elementų paruošimas ir pastatymas į projektinę padėtį. Šiam tikslui labai svarbu betonuojant kuo greičiau pasiekti reikiamą betono gniuždomąjį bei tempiamąjį stiprius. Tačiau 3D spausdinimo technologijoje pasireiškia atvirkščias variantas, kadangi norima pasiekti tokį betono struktūrizavimosi laipsnį (angl. *structurization rate*) (Roussel, Cussigh, 2008), kuris būtų optimalus: betonas galėtų laisvai tekėti padavimo keliu (būti pakankamai takus ir turėti mažą struktūrizavimosi laipsnį), tačiau galėtų išlaikyti savo formą ir keletą pradinių sluoksnių liejamų virš esamų sluoksnių (turėti pakankamai greitą struktūrizavimosi laipsnį).

Esant pakankamai dideliame cementinių gaminių (skiedinio, betono) struktūrizavimosi laipsniui, yra tikimybė atsirasti neveiksnios jungtims (angl. *cold joints*). Taip pat Rousselas ir Cussighas (Roussel, Cussigh, 2008) savo darbe nustatė, jog esant tiek dideliame laiko tarpui tarp liejamų sluoksnių, tiek didelei tiksotropijai (mažam struktūrizavimosi laipsniui), kontakto parametrai prastėja.

Todėl autoriai (Roussel, Cussigh, 2008) nusprendė jog medžiagos tiksotropija yra pagrindinis šaltinis dėl ko atsiranda neveiksnios jungtys ir jog sluoksnių kontakto zona yra pagrindinis faktorius.

Neveiksnios jungtys tarp dviejų išbetonuotų sluoksnių, gali atsirasti tada kai yra viršijamas kritinis kietėjimo laikas, kuriam apskaičiuoti autoriai (Roussel, Cussigh, 2008) pasiūlė tokią išraišką:

$$t_{h,max} = \frac{\sqrt{\frac{(\rho \cdot g \cdot h)^2}{12} + \left(\frac{2 \cdot \mu_p \cdot V}{h}\right)^2}}{A_{thix}}, \quad (5)$$

čia

μ_p – plastinė klampa.

A_{thix} – dydis, kuris apibrėžia medžiagos kietėjimo greitį (Roussel, Cussigh, 2008).

$$A_{thix} = \rho \cdot g \cdot h / (\sqrt{3} \cdot t_{h,min}), \quad (6)$$

čia

$t_{h,min}$ – yra mažiausias laikas, per kurį galima išlieti h aukščio sluoksnį, vertinant tik medžiagos tiksotropiją.

(6) išraiška yra labai aproksimuota ir reikalauja detalesnės analizės, tačiau šiuo metu galime sakyti, jog tik ką išspausdinto betono sluoksnis gali turėti pusę arba mažiau apatinio sluoksnio stiprio (Roussel, Cussigh, 2008).

Iš (5) sąlygos galima daryti išvadą, jog, norint išvengti neveiksnių jungčių, elemento spausdinimo trukmė turėtų būti mažesnė nei kietėjimo riba. Vadinasi, gamybos greitis V turi būti (Roussel, Cussigh, 2008):

$$V > \frac{\rho \cdot g \cdot h^3}{4 \cdot \mu_p}. \quad (7)$$

1.2.2 Cementinio skiedinio elgsena kietėjimo stadijoje

Spausdinamame betone (skiedinyje), panašiai kaip kitose cementinėse medžiagose, pasireiškia visko plastinė Binghamo medžiagos elgsena. Ši teorija sako, jog medžiaga gali pasiduoti tik tada, kai įtempiai, sukelti slėgio tiekimo metu, bus didesni nei pradiniai medžiagos takumo tangentiniai įtempiai (angl. *initial yielding shear stress*, τ_y) (Wolfs, Bos ir Salet, 2018). Svarbu suprasti elastoplastinę medžiagos elgseną pradinėje betono spausdinimo stadijoje, kad galėtume nagrinėti tolesnę kietėjimo fazę.

Medžiagos (skiedinio) elgsena tik tą po maišymo ir išliejimo, gali būti prilyginama dalelių trinties ir sukibimo elgsenai. R. J. M. Wolfsas su bendraautoriais teigia, jog išspausdinto skiedinio elgsena yra panaši į grunto elgseną, todėl savo tyrimuose daugybė autorių naudoja Mohro–Columbo irimo kriterijų medžiagos elgsenai aprašyti. Buvo nustatyta, jog sankiba tokios kompozicijos medžiagoje (sluoksniuotame skiedinyje) buvo tiesinė laiko priklausomybė. Trinties kampas nustatytas pastovus per visą kietėjimo procesą, nors R. J. M. Wolfsas ir kt. papildomai vertina kampo kitimą laike.

$$\tau_y(t) = C(t) + \sigma_n \cdot \tan(\varphi(t)) \quad (8)$$

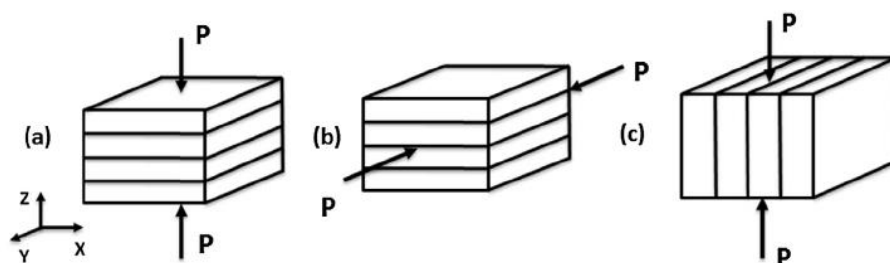
Spausdinimo procese veikia dvi skirtingos jėgos: bėgant laikui betono stipris ir standis turi didėti tokiu pačiu greičiu kaip didėja apkrova nuo liejamų sluoksnių. (8) lygtis rodo Mohro – Columbo irimo kriterijų, kurį naudoja R. J. M. Wolfsas ir kt. Autoriai pritaiko jį laike kintančiomis priklausomybėmis. $C(t)$ yra sankiba tarp cemento dalelių ir kampas $\varphi(t)$ yra vidinių trinties jėgų kampas, kuris atsiranda dėl mikro dalelių esančių tarp skiedinio sluoksnių. Mohro – Columbo irimo kriterijuje medžiagos stipris ir įtempiai nuo aukštesnių liejamo betono sluoksnių yra susiję su medžiagos tangentiniais ir normaliniais įtempiais.

Todėl yra svarbu nustatyti aiškias ribas, pasirenkant medžiagos parametrus gaminant elementus 3D betono spausdinimo būdu.

1.3 Sluoksnių krypties poveikis

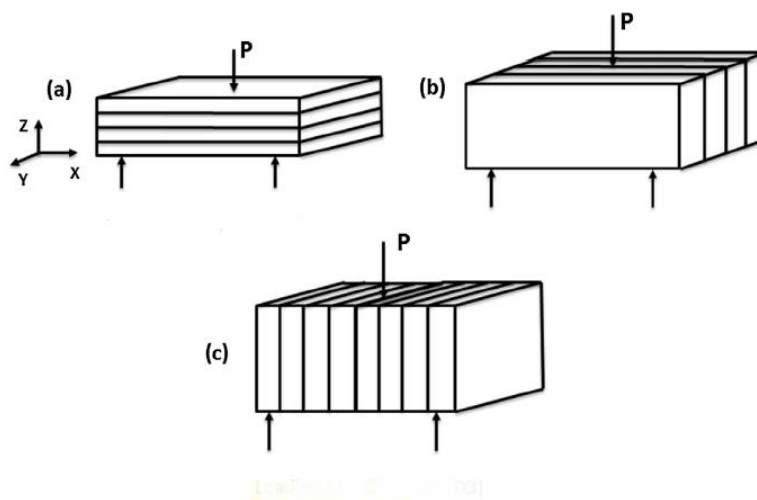
Vienas pagrindinių trūkumų betono spausdinimo sluoksniais technologijoje yra tas jog, kaip ir bet kokia medžiaga pagaminta iš sluoksnių, ji turi nevienodas savybes skirtingomis kryptimis. Tai reiškia, jog galutiniame elemente pasireiškia anizotropiškumas, skirtingai nei paprastame monolitiniame betone, kur mechanines savybes mes priimame visomis kryptimis vienodas – izotropinė medžiaga.

3D spausdinime (plastiko, metalo, betono), kol medžiaga yra gaminama sluoksnis po sluoksnio, yra įprasta tikėtis jog medžiagos savybės horizontalia kryptimi bus svarbesnės nei vertikalia kryptimi. Kadangi gamybos procese, visos jėgos atsirandančios vertikalia kryptimi, bus tiesiogiai priklausomos nuo sukibites horizontalia kryptimi.



1.6 pav. Elementas ir jo sluoksniai koordinačių sistemos atžvilgiu: a) apkrauta z kryptimi; b) y kryptimi; c) x kryptimi (Paul et al., 2017)

Neseniai atlikti tyrimai (Paul et al., 2017) rodo jog, buvo pasiekta nuo 10 % iki 14 % gniuždomojo stiprio padidėjimas, gniuždant bandinius z ir x kryptimis (žr., pav., 1.6), palyginus su monolitiniu betonu. Toje pačioje analizėje autoriai pastebėjo 16 % ir 14 % padidėjimą lenkiamajame stipryje, lenkiant bandinius x ir y kryptimis.



1.7 pav. Elementas ir jo sluoksniai koordinačių sistemos atžvilgiu: a) apkrauta z kryptimi; b) y kryptimi; c) x kryptimi (Paul et al., 2017)

Tačiau šis gniuždomojo ir lenkiamojo stiprio padidėjimas yra pakankamai neaiškus fenomenas, kurio paaiškinti negali patys autoriai (Paul et al., 2017; Nerella, Krause, Näther, Mechtcherine, 2016). Taip pat reikia pabrėžti, kad autoriai (Paul et al., 2017) naudoja bandinius, kurių sluoksnių storiai gerokai didesni 15–38mm. Tuo tarpu Nerella (Nerella et al., 2016) naudoja bandinius sudarytus iš 0.0875mm storio sluoksnių.

Abiejose darbuose sluoksnių liejimo kryptis yra vienas iš parametrų, lemiančių elemento mechanines savybes. Kaip ir buvo minėta anksčiau, spausdinimo laikas ir kokybė yra labai svarbūs faktoriai 3D spausdinime. Betonai plastinėje stadijoje yra lengvai apdirbami, tačiau, prasidėjus hidratacijai, ilgainiui bus sunkiau išspausti vis kietėjantį mišinį. Taip pat proceso eigoje dalis vandens gali būti prarasta dėl džiūvimo. Rezultate, aukštesniuose elemento sluoksniuose bus sukuriamos vis prastesnės mechaninės savybės nei žemesniuose sluoksniuose.

Atlikus literatūros analizę galima teigti, jog 3D spausdinime spausdinimo kryptis ir laikas turi didelę įtaką galutiniai elementų laikomajai galiai. Todėl yra svarbu tinkamai pasirinkti racionalią spausdinimo kryptį.

1.4 Spausdinamų elementų armavimas

Nagrinėjant naujas betonavimo technologijas būtina kalbėti apie tokių elementų armavimą. Jau ilgai egzistuojančios armavimo technologijos yra optimizuojamos iš anksto surenkamo betono gamyklose: virinimai tinklai, automatiniai armatūros rišikliai, robotinių rankų panaudojimas ir pan. Naujų armavimo metodų negalime kopijuoti („pagerinti“) nuo senesniųjų, nes tai yra ne tik technologiškai neracionalu, bet gali iššaukti ir papildomų problemų. Pavyzdys: negalime naudotis senąja armavimo praktika, galvojant naujus metodus 3D spausdinamam betonui armuoti. Tai tik sukurs papildomų problemų ir įstatys kūrėjus į tam tikrus rėmus. Jeigu sukuriame laisvos formos konstrukcinį elementą ir matome problemą jį suarmuoti su klasikiniais armavimo principais, logiška, kad susidursime su sunkumais. Todėl į tokius konstrukcinius sprendimus reikia pažvelgti iš šalies ir ieškoti ne tradicinių sprendimų. Tačiau kuriant naujas armavimo technologijas, reikia teisingai įvertinti jau ir esamus, tradicinius metodus.

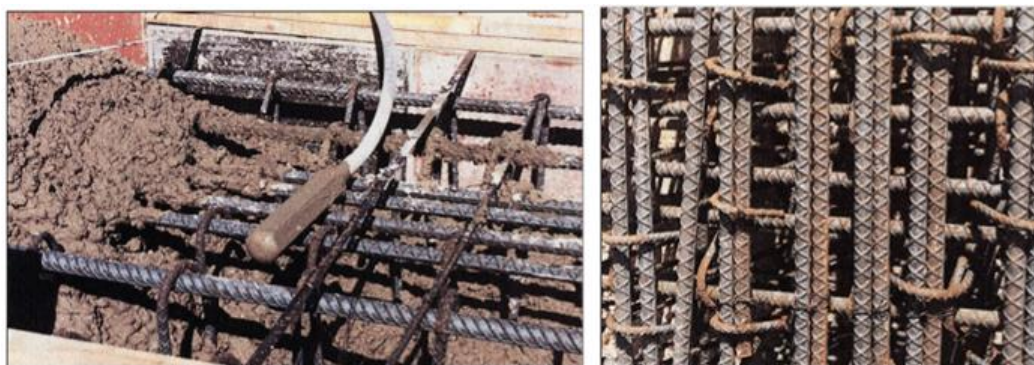
Kaip žinia, betono tempiamasis stipris yra gerokai mažesnis negu gniuždomasis, kuris sudaro maždaug 10 % pastarojo. Nepaisant to, tempiamojo stiprio sklaida yra labai didelė. Todėl įprastai tempiamasis betono stipris projektavimo uždaviniuose nėra vertinamas. Tokio tipo konstrukcijoms armavimas yra būtinas.

Reikia suprasti, jog armavimas elementuose nėra skirtas tik elemento laikomosios galios didinimui. Didelė dalis armavimo šiuolaikiniuose pastatuose yra „minimalaus armavimo“ sąlygos, kurios funkcijos yra tokios: 1) išvengti staigaus irimo prasidėjus pleišėjimui, 2) įrąžų perskirstymas, 3) deformacijų ir plyšių pločio mažinimas. Pirmos dvi funkcijos yra dažniausiai siejamos su laikomąja galia, nes šiuolaikiniuose projektavimo normose taikomas ribinių būvių projektavimo metodas, kuris apibrėžia reikalingą deformacijų atsargą. Pastatų minimalus armatūros kiekis yra reikalingas kontroliuoti plyšiams ir tai sudaro didžiąją dalį armatūros.

Įprastinė armatūra, naudojama šiuolaikinėse statybose, skirstoma į vidinę, išorinę, metalinę ar nemetalinę. Paprastai naudojama įprastoji armatūra, metaliniai rumbuoti strypai, kurių takumo riba 450–500MPa. Tokio tipo armatūros rumbai užtikrina pakankamą sukibtį tarp betono ir armatūros, taip pat plieno ir betono temperatūrinio plėtimosi koeficientai beveik tokie patys, kas dar tik pagerina jų kombinaciją.

Gelžbetoninių elementų įrengimas naudojant tokio tipo armatūrą dažniausiai būna paprasčiausio betono liejimo į klojinius statybos aikštelėje ar gamykloje. Abiem atvejais yra paruošiami iš anksto virinami arba rišami armatūros tinklai, statomi į klojinius, kurie yra paremti ant atraminių konstrukcijų. Betonuojant, betonas yra pilamas į klojinius ir naudojant betono vibratorius, tolygiai paskirstomas. Betonuojant aukštus elementus, tokius kaip sienas ir plokštes, jų minimalius matmenis

riboja vibratorių diametras. Tai yra aktualus klausimas, nes, esant dideliame armavimui ir naudojant įprastą betoną, betono tankinimo procesas yra pernelyg sudėtingas.



1.8 pav. Betono tankinimas („123rf“, 2019)

Kaip ir minėta darbo pradžioje, statybos skaitmenizacija neatsilieka nuo kitų pramonės sektorių ir jau yra sukurtas ne vienas metodas aukščiau aprašytoms problemoms spręsti. Tarp labiausiai žinomų ir tobulinamų metodų galima įvardinti: išmaniųjų klojinių (angl. „*Smart dynamic casting*“, „*Mesh mould*“), išorinio armavimo, betono spausdinimas naudojant fibrobetonį, tiesioginio betono ir armatūros spausdinimo metodus.

1.4.1 Išmanieji klojiniai

Išmanieji klojiniai (angl. „*Smart dynamic casting*“) – tai metodas, sukurtas ETH Zurich universitete, kuris yra labai panašus į slenkančiųjų klojinių technologiją, papildant metodą lanksčiais valdomais klojiniais. Betonas tiekiamas į judantį klojinį, kuris yra daug mažesnis nei galutinis gaminys. Mišinys turi tam tikras reologines savybes, dėl kurių klojiniui judant elementas išlaiko savo pradine formą (Lloret-Fritschi, 2016).



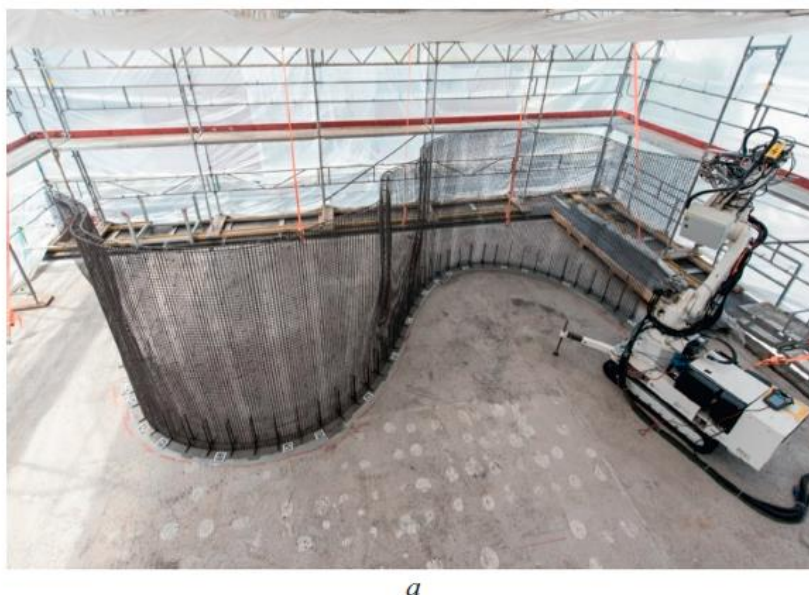
1.9 pav. SDC metodu pagaminti elementai (Lloret-Fritschi, 2016): a) žvaigždės formos standus klojinys, 180° kampas besisukant per visą kolonos aukštį, b) 2m aukščio sienos elementas, pagamintas naudojant lanksčius klojinius, c-d) vertikalus sienos elementas, skirtas langams atitverti, ir jo geometrija

SDC metodas leidžia kurti sudėtingos formos elementus, tačiau apsiriboja tik vertikaliais elementais. Taip pat vienas iš pagrindinių trūkumų yra tokio elemento armavimas klasikiniu metodu.

Šiuo metu metodas yra paremtas robotu lankstomų armatūros karkasų gamyba, kurie po to yra apibetonuojami SDC metodu. Tačiau metodo autoriai numato, jog tam tikras problemas galima išspręsti kombinuojant keletą technologijų: betono ekstruziją vienu metu judant klojiniui ir robotui virinant armatūros karkasą (Lloret-Fritschi, 2016).

1.4.2 Armatūros tinklo klojinys

Armatūros tinklo klojinio metodas (angl. „*Mesh mould*“, toliau – MM), pradėtas naudoti ETH Zurich universitete, yra paremtas skaitmeniniu būdu roboto virinimu, kur armatūra ir klojinys yra gaminami robotų pagalba vienu metu. Gamybos metu robotas kuria tankų erdvinį armatūros tinklą, kuris po to yra užpildomas specialiu skiediniu. Skiedinys turi tam tikras medžiagos savybes, kurios neleidžia jam prabėgti pro erdvinį armatūros karkasą. Po armatūros karkaso užpildymo, siena iš išorės yra apipurškiama skiediniu, taip sukuriant apsauginį sluoksnį.



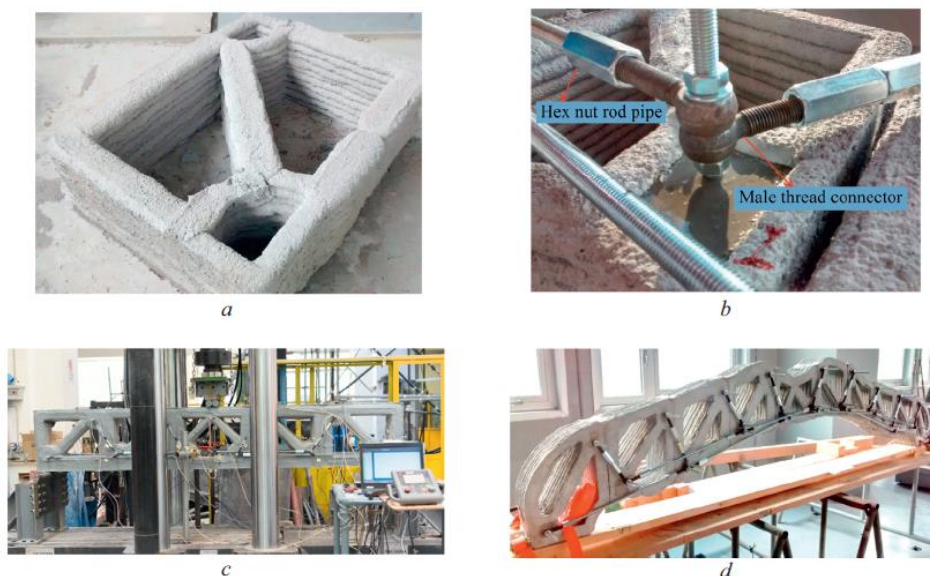
1.10 pav. MM technologija: a) 14m ilgio, dvigubo kreivumo sienos karkasas, b) karkaso užpildymas, c) 3m aukščio sienos maketas (DFAB HOUSE, 2018)

Metodas turi tam tikrų trūkumų, tokių kaip purškiamo skiedinio sukibtis su jau pradėjusiu kietėti užpildu karkaso viduje. MM technologija naudoja klasikinius armatūros strypus, tačiau apsiriboja jų diametru, kuris yra nuo 4.5mm iki 6mm, dėl virinimo, lankstymo ir pjaustymo sumetimų (Patrick , Wangler , Falcon, Flatt, Kaufmann, 2018).

1.4.3 Išorinis armavimas

Pagrindinis šio metodo principas yra gelžbetoninių elementų gamyba skaitmeniniu būdu, atskiriant betoninių elementų gamybą nuo jų armavimo. Principas paremtas tuo, jog gelžbetonines sijas galima pakeisti į daug mažesnių betoninių sijos segmentų, kuriuos antroje stadijoje galima sujungti į vientisą elementą, naudojant išorinį armavimą.

Metodo privalumas tas, jog, gaminant kiekvieną elementą, galima jį optimizuoti atskirai taip, kad jis užtikrintų pasirinktas, svorio mažinimo, laikomosios galios ir kitus kriterijus.



1.11 pav. Išorinio armavimo pavyzdys: a) skaitmeniniu būdu, pagamintas betoninis sijos elementas, b) išorinės armatūros ir betoninio elemento jungimo mazgas, c) tiesi sija, d) skirtingo skerspjūvio sija (Asprone, Menna, et al., 2018)

1.4.4 Fibrobetonio spausdinimas

Plieninių fibrų panaudojimas betono spausdinime yra gana akivaizdus betoninių elementų tempiamosios galios problemos sprendinys. Šią metodiką šiuo metu nagrinėja Eindhoveno technologijos universitete (Bos, Bosco, Salet, 2018). Čia yra tiriama fibrų įtaka spausdinto elemento tempiamajam stipriui.

Tyrimai rodo, jog fibrų panaudojimas gerokai padidina spausdinto betono tempiamąjį stiprį ir lankstumą. Tačiau medžiagos elgsenoje pasireiškia silpnėjimas po plyšio atsiradimo (angl. *strain softening*). Taip pat, gaminant tokio tipo elementus sluoksniavimo principu, pastebimas akivaizdus fibrų susilygiavimas su sluoksnių liejimo kryptimi, o tai turi teigiamos įtakos, jeigu įrašos elemente atsiranda lygiagrečiai sluoksniams, ir neigiamos, jeigu įrašos veikia kitomis kryptimis.

1.4.5 Tiesioginis betono ir armatūros spausdinimas

Šis metodas yra kol kas pažangiausia gelžbetoninių elementų 3D spausdinimo gamybos technologija, tyrinėjama Eindhoveno technologijos universitete (Bos, Ahmed, Jutinov, Salet, 2017). Ši metodika paremta betono sluoksniavimo principu, aptartu ankstesniuose skyreliuose, su papildoma armatūra, kuri yra vienu metu įterpiama į išspausdinamą betoną.



1.12 pav. Betoninio segmento spausdinimas, tiesiogiai liejant betoną ir vielą vienu metu (Bos et al., 2017)

Šiame koncepte armatūra yra plieninės vielos, kuri yra pakankamai stipri ir lanksti. Buvo atlikta keletas bandymų (Bos et al., 2017) naudojant 3 tipų vielas nuo 0,63mm diametro iki 1,20mm, kurių maksimalūs tempimo įtempiai $\sigma_{ult} = 670, 1000, 1600 MPa$. Bandymų metu buvo bandomos sijos, pagamintos šia metodika: 7 ir 3 sluoksnių aukščio su viena vielos gija kiekviename sluoksnyje. Buvo pastebėta, jog klasikinės gelžbetonio mechanikos formulės galioja skaičiuojant tokio tipo konstrukcijas tol, kol elemento iirtis pasireiškėdavo dėl armatūros nutrūkimo $M_u > M_{cr}$.



1.13 pav. 7-nių sluoksnių sija, lenkimo bandyme (kairėje), elemento iirtis dėl vielos nutrūkimo (dešinėje) (Bos et al., 2017)

Toje pačioje studijoje buvo nustatyta, jog didesnės laikomosios galios vielų panaudojimas sukelia vielos praslydimą. Yra manoma, jog taip nutinka dėl dviejų priežasčių: dėl nepakankamo sukibimo

tarp vielos ir skiedinio (kai sluoksnių yra nedaug jie nepakankamai apspaudžia žemiau esančius sluoksnius, o to pasekoje jie nepakankamai sukimba), antra priežastis – įtempių koncentracijos ties apkrautomis vielos vietomis, kur palaipsniui betonas ir viela atsiskiria dar nespėjus įsijungti vielos inkaravimo ilgiui (Bos et al., 2017).



1.14 pav. Pirmas, 3D betono spausdinmo būdu pagamintas, pėsčiųjų tiltas (Bos et al., 2017)

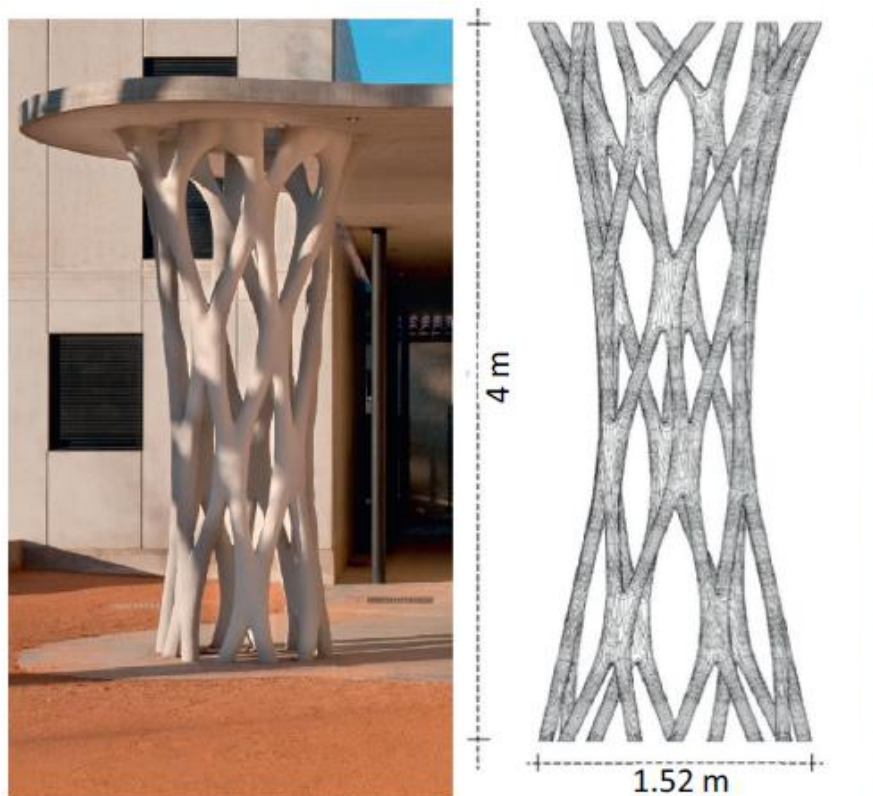
Šis metodas, tiesiogiai įterpiant vielą į spausdinamą betoną, gali pasiekti panašius rezultatus kaip ir įprastas gelžbetonis. Tačiau čia yra reikalingi papildomi tyrimai nustatant sukibtį tarp betono ir vielos, kurie leistų tinkamai įvertinti jų bendrą darbą.

1.5 Spausdinamų elementų formų apžvalga

1.5.1 Praktiniai konstrukcijų sprendimai

Šiame darbe minimas vienas iš pagrindinių 3D spausdinamų elementų privalumų - laisva geometrijos forma. Tai atveria didesnes architektūrines galimybes, kas anksčiau buvo labai ribojama dėl tam tikrų technologinių ribojimų: armatūros išdėstymas sudėtingos geometrijos klojiniuose bei pačių klojinių įrengimas, pavyzdžiui, kevalo tipo geometrijos konstrukcijose visa tai buvo įmanoma padaryti ir tai buvo daroma, tačiau ekonomiškai tai nebuvo labai racionalu.

Tobulėjant gamybos metodams, kurti sudėtingas geometrines konstrukcijas tampa vis paprasčiau. Tai rodo praktikoje sutinkami pavyzdžiai. 1.15 paveiksle vaizduojama atrama stogo denginiui, pagaminta 3D spausdinimo būdu naudojant sluoksniavimo metodą. Gaminant šį gaminį konstrukcijos geometrija buvo formuojama atitinkamai taip, kaip juda vidinės jėgos pačioje konstrukcijoje, t.y., kiekvienas santvaros elementas konstrukcijoje yra išnaudojamas tiksliai taip, kaip buvo numatyta modeliuojant. Tokiu būdu sutaupomi tiek medžiagų kaštai, tiek klojinių poreikis (Schuteer et al., 2018).



1.15 pav. Sudėtingos santvaros tipo formos, konstrukcija (XtreeE, 2017)

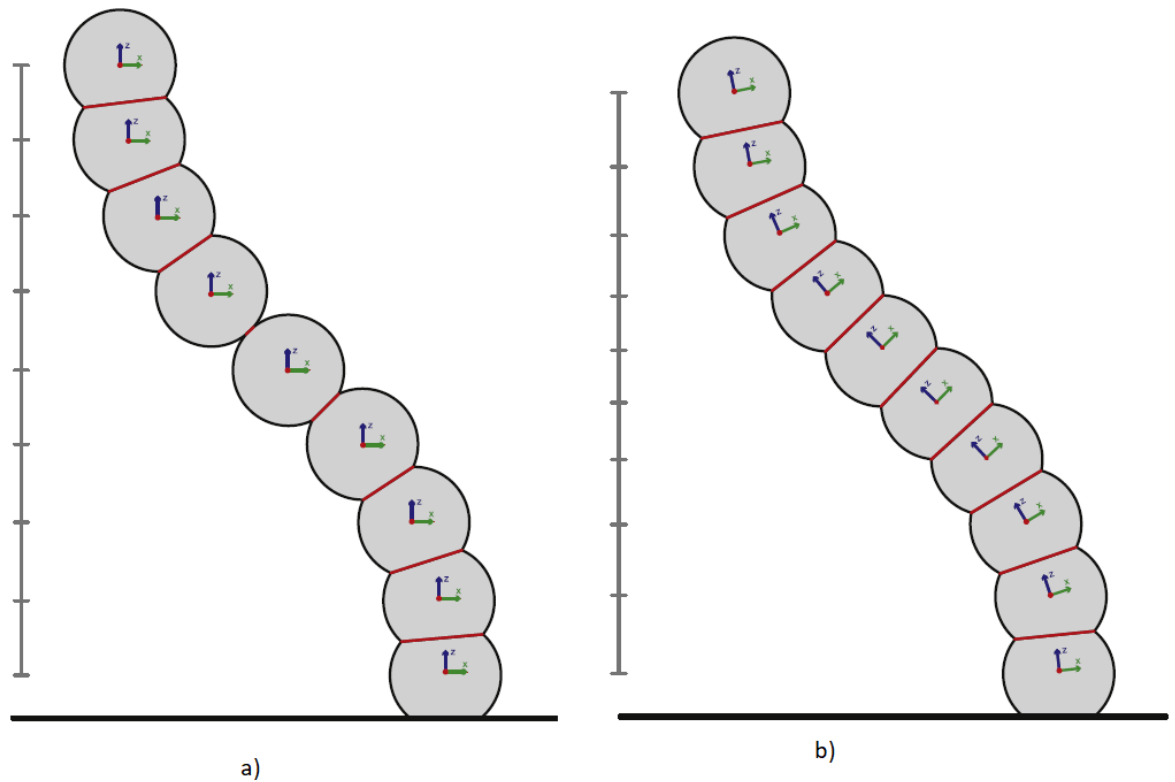
Tačiau kad ir kaip gerai skambėtų laisvos geometrijos formos konceptas, su kuriuo sutinka beveik visi literatūroje analizuoti autorių darbai, susiduriama ir su tam tikrais iššūkiais. Keletas autorių pamini tam tikrus elemento elgsenai poveikį darančius geometrinius parametrus.

Autorius Schuteeris ir jo kolegos (Schuteer et al., 2018) pateikia išvalgą, apibendrinančią geometrinių parametrų svarbą ir tam tikrus apribojimus spausdinant betoną. Autorių teigimu, gaminio kokybė (angl. *print resolution*) yra iš anksto apspręsta ir apribota tokių parametrų kaip: šviežio skiedinio mechaninių savybių, galutinio elemento tolerancijų, didelių išsikišimų modeliavimo (angl. *creating overhangs*).



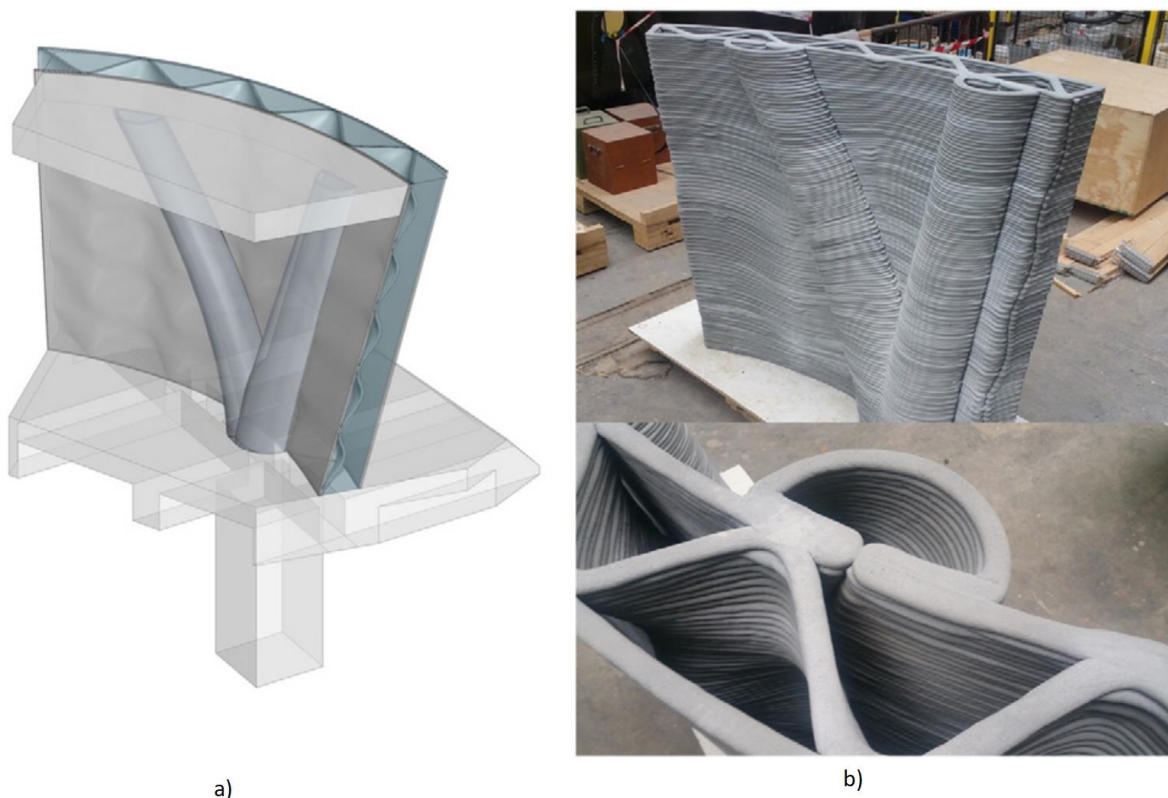
1.16 pav. Elemento sluoksnių tankumo poveikis, sukeliantis nevisiško užpildymo problemą (Schuteer et al, 2018)

1.16 paveiksle vaizduojamas tipinis bandymas norint nustatyti, ar naudojamas purkštukas tinkamai išpildo geometriją, esant labai tankiam tinklui. Paveiksle matyti, jog purkštukui liejant betoną susidaro tuštumos dėl daugybės posūkiu. Tai rodo, jog turint tam tikrą purkštuko dydį (1.2 skyrius) galutinio elemento forma yra iškart apribojama. Šis bandymas yra tradiciškai taikomas visiems adityvios gamybos technologijoms, įskaitant ir 3D plastikų, metalų bei polimerų spausdinimą). Vis dėlto akivaizdu, jog jis nėra tinkamas betonui, kadangi metodas neatsižvelgia į jau aptartus geometrijos apribojimus.



1.17 pav. Schematiškai atvaizduojamas statmenas pjūvis, per sluoksnius išlietus 3D spausdintuvu. a) pastovaus sluoksnio aukščio modelis, b) tangentinio tęstinumo modelis (Gosselin et al., 2016)

Tam tikriems elementams taip pat reikalingi išsikišantys sluoksniai, taip kaip pavaizduota 1.17 paveiksle. Tam tikras išsikišimas yra galimas tačiau jis yra labai ribojamas medžiagos parametrų bei spausdinimo strategijos, t.y., kaip racionaliai parinkti spausdinimo kelią taip, kad būtų sukuriamas kuo mažiau išsikišimų, kurie daro konstrukciją nestabilią, ypač pradinėje stadijoje. Kaip jau išsiaiškinome 2 skyriuje, esant mažam sukibimo plotui tarp dviejų elementų, kontakto parametrai gerokai suprastėja. Todėl yra labai svarbu užtikrinti maksimalų plotą tarp dviejų gretimų sluoksnių spausdinant išsikišimus. Tam tikslui pasiekti yra du galimi variantai (1.17 pav. a ir b). A variantas – tai dažniausiai literatūroje sutinkamas sluoksniavimo metodas, kuris pasižymi tuo, jog liejant kiekvieną sluoksnį yra išliejamas vienodas sluoksnio aukštis x-y plokštumoje. Tačiau minusas tas, jog kuriant išsikišimą mažėja sukibimo plotas. Atveju b yra naudojamas tangentinio tęstinumo metodas (angl. *tangential continuity*), kuris išlaiko vienodą sukibimo plotą, taip užtikrinant geresnius medžiagos parametrus, bei padidina geometrijos laisvę.



1.18 pav. Daugiafunkcė siena: a) daugiafunkcės sienos elemento CAD modelis, b) 3D spausdinimo būdu pagamintas daugiafunkcis sienos elementas (Gosselin et al., 2016)

Geometrijos formos taip pat gali priklausyti nuo galutinio elemento funkcionalumo. Elemento funkcionalumui galime priskirti tokius projektuojamus elementus, kurie ne tik atlaiko išorines apkrovas, bet ir gerina akustines bei termines savybes.

Savo darbe (Gosselin et al., 2016) autoriai nagrinėja daugiafunkčį sienos elementą, kurio paskirtis atlaikyti jį veikiančias apkrovas bei pagerinti jo termoizoliacines savybes. Paveiksle 1.18 pavaizduotas šio elemento modelis (1.18 pav., a ir b) ir atitinkamai atspausdintas elementas. Pati elemento forma yra labai įdomi. Iš esmės tai yra dvi plokštės: vidinė ir išorinė, sujungta bi-sinusoidės kreivės ryšiais, taip sumažinant ryšių kontaktų kiekį tarp vidinio ir išorinio sluoksnio, ko pasekoje susidaro mažiau šaltčio tiltelių. Čia reiktų pabrėžti, jog autoriai nenagrinėja šios sienos fragmento mechaninių savybių. Jie atlieka termoizoliacinių parametrų analizę, kurios išsamius rezultatus, bei išraiškas geometriniams parametrų pateikia savo darbe.

Yra daugybė praktinių 3D betono spausdinimo panaudojimo atvejų. Šiame skyriuje aptarti keli atvejai tik parodo, jog šios technologijos geometrijos laisvės potencialas yra neribotas.

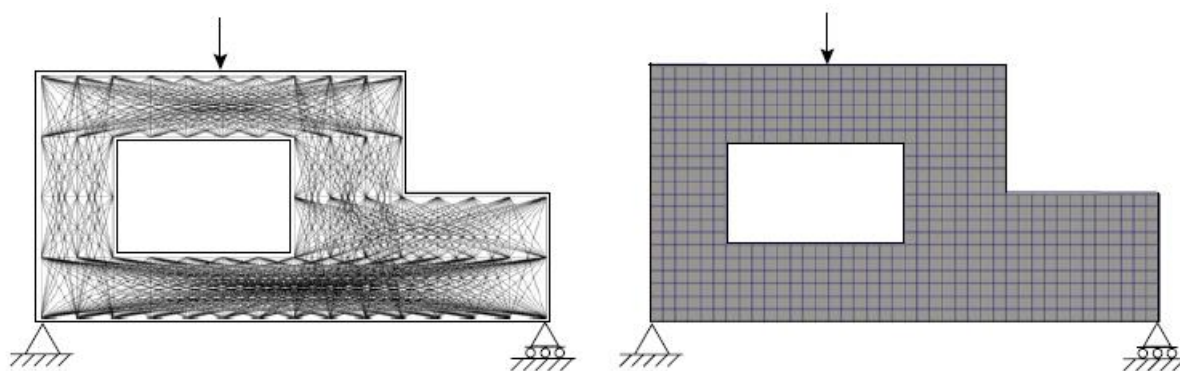
1.5.2 Gelžbetoninių elementų optimizacija

Spartėjant statybos skaitmenizacijai, gaminių geometrija tampa vis svarbesniu faktoriumi, nulemiančiu rinkos gamybos standartus. Gelžbetoniniai elementai yra ne išimtis. Pirmieji gelžbetonio optimizacijos uždavinius, dar XIX a., pradėjo spręsti (Ritter, 1899; Morsch, 1909), priimdami sąlygą, jog supleišėjusio betono elgsena panaši į santvaros. Tačiau pirmieji bandymai, suprantama, buvo imlūs laikui bei sunkiai paaiškinami be realių eksperimentinių tyrimų.

Tobulėjant technologijoms, vokiečių mokslininkas Jörg Schlaich'as ir jo kolegos (Schlaich et al. 1987) suformulavo optimizacijos sąlygą, kuri sako, jog standžiausia santvaros sistema bus ta, kuri pasieks saugiausią apkrovos – įlinkio atsaką, nes ribojant santvaros įlinkius yra mažinamos plastinės deformacijos betone. Šio darbo metu buvo sukurtas stygų – spyrio metodas, kuris plačiai naudojamas projektavimo standartuose visame pasaulyje. Tačiau pats metodas, nors ir labai populiarus, nėra idealus, kadangi jam trūko priemonių, kuriomis būtų galima lengvai atvaizduoti vidinių jėgų pasiskirstymą elemente.

Besivystant superkompiuterių rinkai, atsirado galimybės pažangesniems ir greitesniems skaičiavimo, projektavimo metodams ir programiniams paketams atsirasti. Savo darbe autoriai (Gaynor, Guest, Moen, 2013) nagrinėja naujus optimizacinius skaičiavimo paketus ir pateikia savo įžvalgas kaip reikėtų analizuoti ir optimizuoti konstrukcijas.

Topologijos (geometrijos) optimizacijos procese projektuojamas elementas yra diskretizuojamas baigtiniais elementais, dažniausiai santvaros elementais arba kontinuumo elementais (plokštelės tipo arba pilnaviduriai elementais).

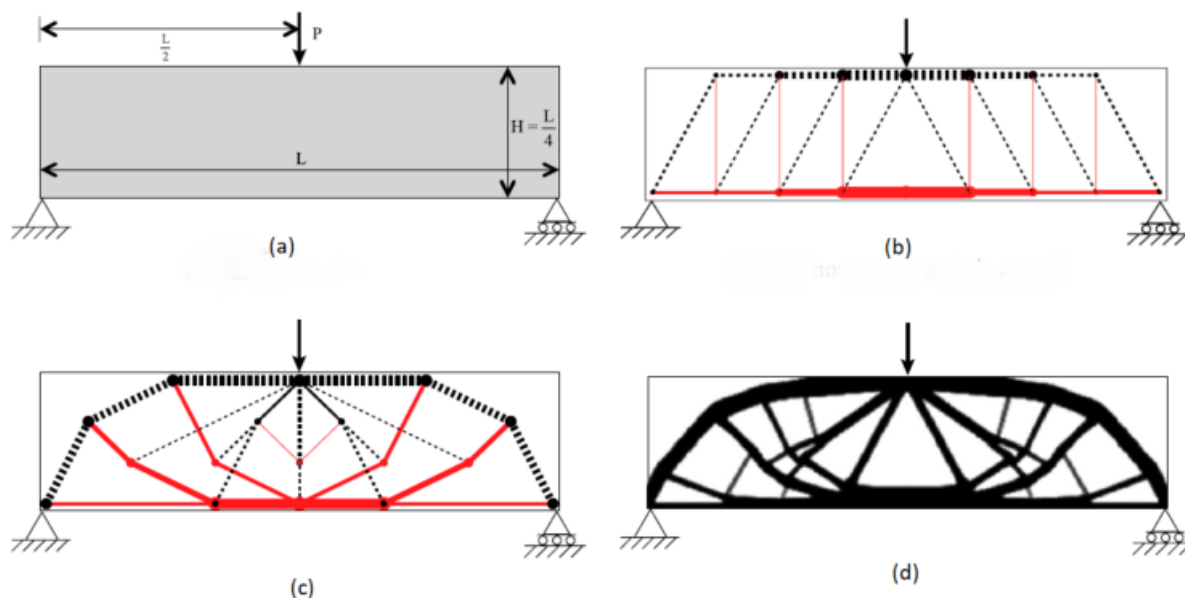


1.19 pav. Topologijos optimizacijos pavyzdys, naudojant: a) santvraos elementus, b) kontinuumo elementus (Gaynor et al, 2013)

Proceso tikslas – nustatyti reikiamos medžiagos kiekį kiekviename elemente. Jeigu baigtiniam elementui nereikia visiškai jokios medžiagos parametrų arba jie santykinai maži, baigtinis elementas eliminuojamas optimizacijos eigoje. Optimizacijos procesas detalai aprašytas (Gaynor et al., 2013)

darbe, kuriame paprasčiausiai apibrėžiamos sąlygos optimaliai geometrijai gauti, sprendžiant sisteminius uždavinius minimaliam išorinių jėgų darbui ribotame elemento tūryje gauti.

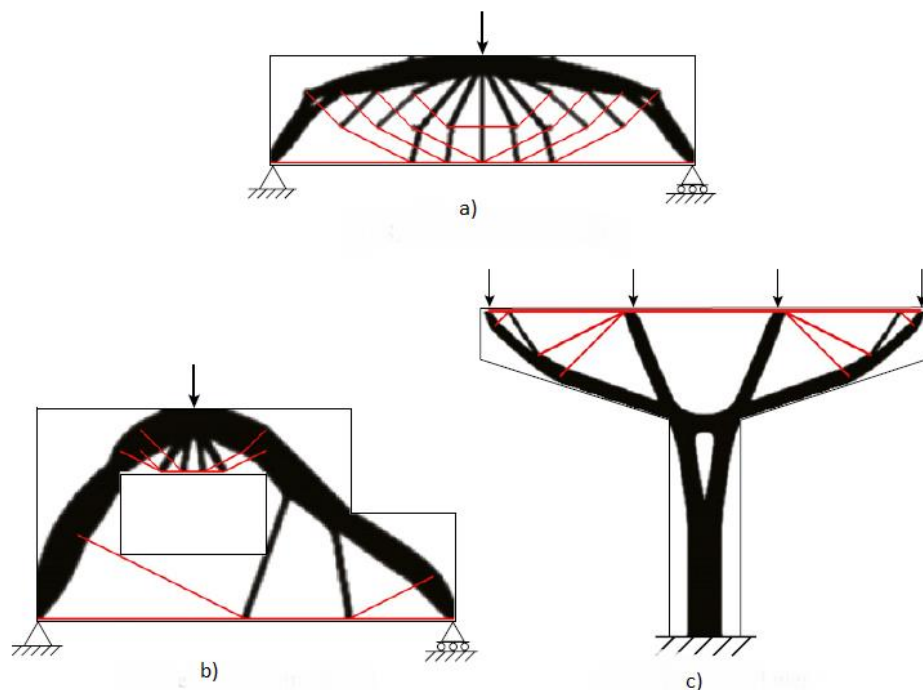
Yra išskiriami trys optimizacijos tipai, priklausantys nuo naudojamų diskrečiųjų elementų: kontinumo topologijos, santvaros topologijos bei hibridinė santvaros – kontinumo topologijos optimizacija.



1.20 pav. Vidinių jėgų atvaizdavimas, optimizuojant elementą: a) analizuojamas elementas, b) tradicinis stygų - spyrių modelis, c) optimizuotas santvaros modelis, d) optimizuotas kontinuumo modelis. Raudonos linijos vaizduoja tempiamos zonas, juoda punktyro linija – gniuždomas (Gaynor et al., 2013)

Santvaros modelio optimizacija prasideda tankiai sugeneruotu baigtinių elementų tinklu (1.19 pav. a), kuris proceso metu yra generuojamas tol, kol pasiekiamas rezultatas. Proceso metu elementai, kurie yra santykinai mažai veikiami vidinių jėgų, yra eliminuojami. Taip sukurama santvaros tipo konstrukcija, kuri optimaliai perima visas veikiančias vidines jėgas. Šis optimizacijos procesas padeda projektuotojui geriau suprasti vidinių jėgų pasiskirstymą elemente, nustatyti armuojamas zonas bei plyšių pasiskirstymą elemente. Vienas iš pagrindinių trūkumų yra tas, jog taikant tankesnę baigtinių elementų tinklą gaunama labai sudėtinga geometrija, kurią yra labai sunku išpildyti gamyboje.

Kontinuumo modelis ypatingas tuo, jog yra modeliuojama 2D arba 3D tipo baigtiniais elementais. Tai lemia geresnę vidinių jėgų vizualizaciją. Taip pat taikant šį metodą nėra apsiribojama vidinių jėgų kelio forma – ne taip, kaip santvaros metode, kur projektuotojas jau modeliuojant užsiduoda vidinių jėgų veikimo kryptis, naudojant 1D strypinius elementus. Šio modelio minusas – atvaizduojamas vidinių jėgų kelias yra labai sudėtingas.



1.21 pav. Hibrinės santvaros ir kontinuumo modelio optimizacijos pavyzdžiai: a) sijos tipo elementas; b) sienos tipo elementas; c) tilto atramos tipo elementas (Gaynor et al., 2013)

Hibridinis santvaros ir kontinuumo modelis yra geras tuo, jog iš kontinuumo modelio eliminuojami tempiami elementai ir pakeičiami santvaros tipo elementais. Taip sumažinamos projektavimo sąnaudos nagrinėjant kontinuumo elementus tempimui.

Tačiau visi modeliai buvo nagrinėjami tik esant tiesinėms medžiagų savybėms, taip pat modeliai nėra idealūs. Galiausiai, nėra pakankamai reikiamų eksperimentinių tyrimų norint patvirtinti optimizuojamų konstrukcijų modelius.

Iki šiol optimizuojami konstrukciniai elementai turėjo apsiriboti pakankamai racionaliomis geometrijos formomis, kadangi gaunant tokias formas kaip vaizduojama 7.21 pav., anksčiau pagaminti buvo praktiškai neįmanoma dėl gamybos procese atsirandančių techninių apribojimų. Visgi, esant dideliame proveržiui adityvios gamybos rinkoje ir atsiradus didelei 3D spausdintuvų pasiūlai, atsirado ne tik galimybės, bet ir poreikis tokių elementų gamybai.

2. SPAUSDINTO ELEMENTO FORMOS ANALIZĖ

Šiame skyriuje bus nagrinėjamas vertikalios sienos fragmentas, pagamintas betono sluoksniavimo būdu. Bus remiamasi idėja, kurią praktiškai įgyvendina kinų statybos kompanija *WinSun*. Pasitelkiant ankstesniuose skyriuose apžvelgtą medžiagą, įvertinome geometrinių parametrų poveikį galutinei produkto elgsenai.



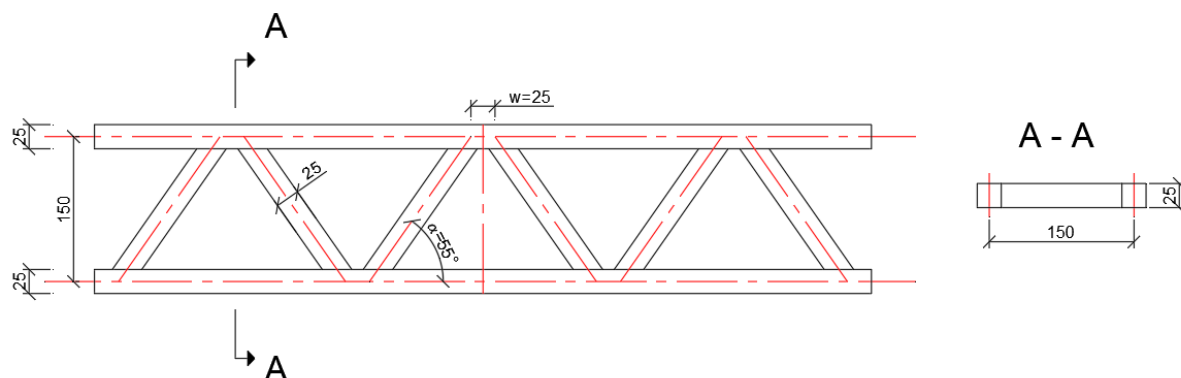
2.1 pav. Kompanijos *WinSun* produktas, moduliniai blokai („WinSun“, 2019)

Kol kas nėra nustatyti jokie reikalavimai tokio tipo konstrukcijoms, todėl kiekvienas mėginimas įvertinti mechaninę tokio tipo elementų elgseną iš dalies yra naujas.

Skyriaus tikslas – rasti racionalius kintamus geometrijos parametrus, kurie leistų gaminti ekonomiškai, patvarias tokio tipo konstrukcijas. Šiam tikslui pasiekti, bus atliekama skaitinė santvaros tipo elemento analizė.

2.1 Elemento skaičiuojamasis modelis

Tyrimė analizuojamas elementas, paremtas 1 skyriuje minėtais pavyzdžiais, yra santvaros tipo. Jį sudaro: du išoriniai elementai (juostos), bei pasviri spyriai (elementai jungiantys juostas).

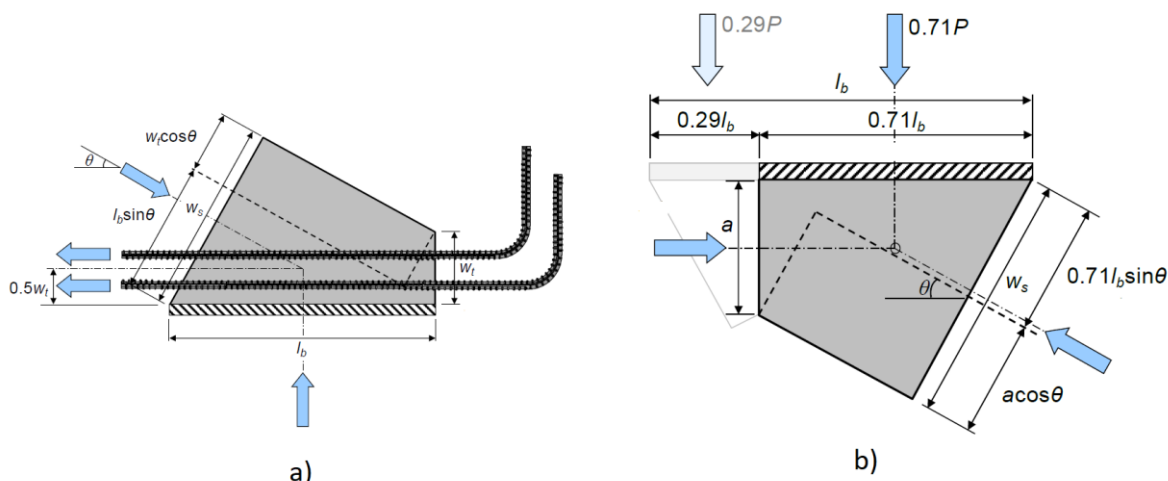


2.2 pav. Tiriamos konstrukcijos., tipinė geometrija ir pjūvis

Elemento aukštis (2.2 pav.) – atstumas tarp ašių – priimtas 150mm. Toks pradinis elemento aukštis pasirinktas atitinkamai įvertinus 1.5 skyriuje pateikto daugiafunkcį sienos pavyzdį. Darbo eigoje (2.4 skyriuje), nustatius racionalius formos parametrų dydžius, atidžiau analizuojama ir aukščio įtaka.

Sluoksnio plotis 25mm – priimtas remiantis 1.1 ir 1.2 skyriaus rekomendacijomis. Esant didesnio diametro ekstrudinei galvutei, yra liejamas didesnis sluoksnio plotis, ko pasekoje gaunamas didesnis kontakto plotas. Esant didesniam kontakto plotui, yra didesnė tikimybė prastesnei jungties sukibčiai tarp skirtingų sluoksnių, kadangi esant didesniam plotui džiūvimo paviršius yra taip pat didesnis. Esant didesniam džiūvimo paviršiui, kontakto parametrai gali skirtis iki 50 % (Roussel, Cussigh, 2008). Todėl atsižvelgiant į 1.1 ir 1.2 skyriuose aprašytas įžvalgas, pasirinktas rekomenduojamas variantas 25mm.

Sluoksnių storis matomas pjūvyje A – A yra priimtas 25mm, pagal 1.1 skyriuje pateiktas autorių (Lim et al., 2011; Bos et al., 2016) rekomendacijas.

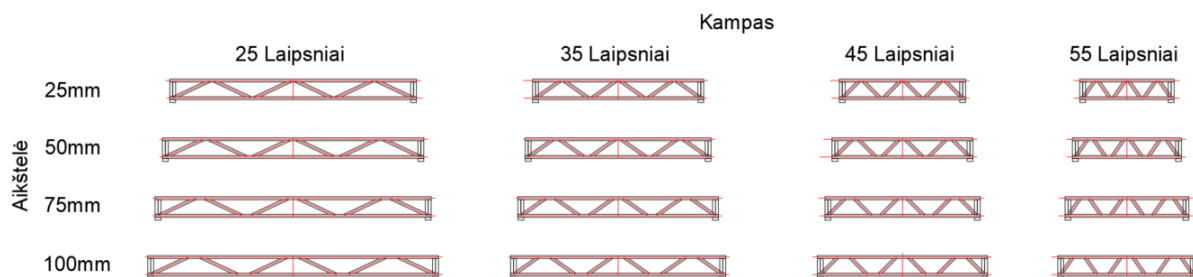


2.3 pav. Stygų spyrio metodo, mazgų tipai a) tempiamas, b) gniuždomas (Williams, Deschenes, Bayrak, 2012)

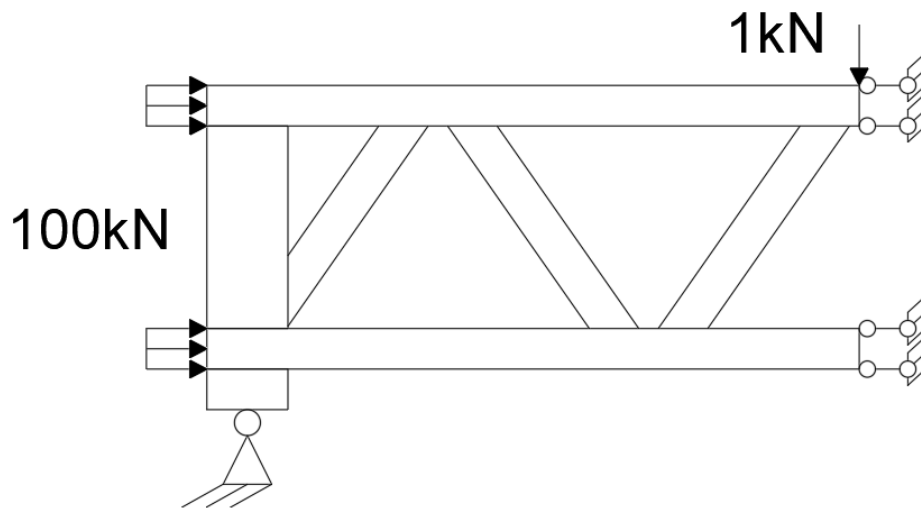
Kampas α – spyrio posvyrio kampas ir dydis w – spyrio aikštelės ilgis, bus kintami dydžiai šiame darbe. Šio skyriaus tikslas – nustatyti tokius racionalius α ir w , kurie tenkintų mūsų nustatytus ekonominius bei mechaninius kriterijus.

Išnagrinėjus literatūrą, priimta išvada, jog iš dalies tokios geometrijos elementai yra analizuojami stygų spyrių metodu, kuris išsamiai aprašytas (Williams et al, 2012) darbe. 2.3 paveiksle pavaizduoti du skirtingi stygų spyrių metodo mazgai, kuriais pasinaudojant galima įvertinti šiame darbe modeliuojamų elementų geometriją. Paveiksle vaizduojamas kampas θ yra mūsų nagrinėjamas kampas, kurį pervadiname į α , na o l_b – atraminės zonos ilgis yra pervadinamas į w - spyrio aikštelės ilgį. Pasinaudojant Williams ir bendraautorių (Williams et al, 2012) darbo rekomendacijomis, buvo priimtas minimalus spyrio posvyrio kampo 25° .

Išnagrinėti 16 skirtingų geometrijos variantų, keičiant spyrio posvyrio kampą ir spyrio aikštelės ilgį. Skyriuje nagrinėjamas kiekvieno geometrijos varianto, armuotas ir nearmuotas, modeliai.



2.4 pav. Visi tiriama geometrijos variantai



2.5 pav. Tipinės geometrijos, skaičiuojamoji schema

(2.5 pav.) pavaizduota skaičiuojamoji schema, pagal kurią bus tiriami visi variantai. Elementas veikiamas išorinių jėgų, kurios sukelia momentą skerspjūvyje. Kraštinės sąlygos numatytos tokios: įvestas paprastas lankstas atramoje, kuris atlaisvina tik pasisukimą apie y-y ašį, taip pat priimta prielaida, jog galioja simetrijos sąlygos, kurios pridėtos elemento gale imituoja elemento elgseną, taip perpus sumažinant reikiamą baigtinių elementų kiekį konstrukcijoje.

Atliekant skaičiavimus valkšnumo, susitraukimo, džiūvimo poveikiai spausdinto elemento elgsenai yra nevertinami, tai galėtų būti tolimesnių studijų temos.

2.2 Elemento medžiagų parametrai

2.2.1 Skiedinio charakteristikos

Skiedinio medžiagos parametrai yra bene svarbiausias rodiklis visame spausdinimo procese, todėl tam šiuolaikiniai tyrimai skiria daugiausia dėmesio, tačiau kaip ir minėta pradžioje, darbe orientuojamasi į jau suketėjusios medžiagos elgseną.

Skiedinio netiesinius parametrus įvedame naudojant apibendrintų deformacijų modelį (angl. *total strain arba total strain crack*), kuris paremtas vidutinio plyšio metodo (angl. *smeared crack*) principais. Šis modelis įvertina įtempių ir deformacijų būvio pokytį, kai plyšys yra fiksuotas (angl. *fixed stress strain concept*). Tempiamieji ir gniuždomieji įtempiai aprašomi kaip funkcijos, priklausančios nuo deformacijų. Tempiamo skiedinio elgsena aprašyta eksponentine priklausomybe (2.6 pav.), įvertinant tempiamojo skiedinio stiprį ir irimo energiją.

Skiedinio tempiamasis ir gniuždomasis stipris parinkti atsižvelgiant į autoriaus (Zavalis, 2013) atliktus eksperimentinius tyrimus ir pateikiami 2.1 lentelėje, o irimo energijos, apskaičiuotos pagal P.Lorenco rekomendacijas, (10) irimo energija tempiamam skiediniui, ir (11) gniuždomam. Plyšio

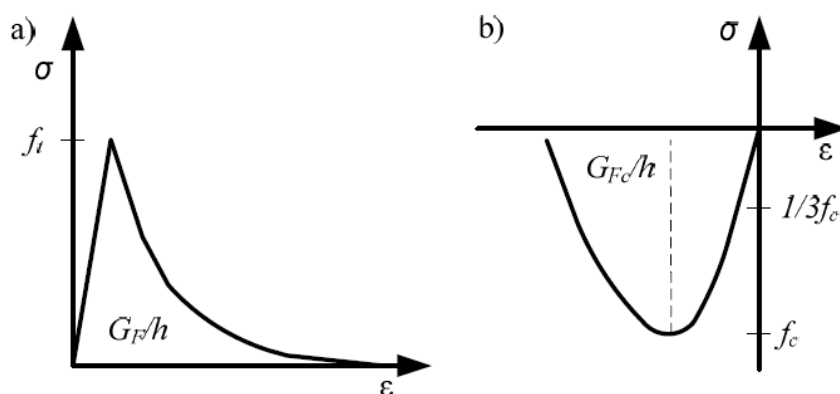
lokalizavimo ilgis h (angl. *crack band width*) priklauso nuo baigtinių elementų dydžio ir įvertinamas automatiškai (programiniame pakete „Diana“ numatytas automatinis jo įvertinimas). Skiedinio elgsena gniuždant aprašoma naudojantis paraboline priklausomybe.

Irimo energija tempiamam skiediniui:

$$G_{ft} = 0,025(2f_t)^{0,7} \quad (9)$$

Irimo energija gniuždomam skiediniui:

$$G_{fc} = 15 + 0,43f_c - 0,0036f_c^2 \quad (10)$$



2.6 pav. Medžiagų modeliai: a) eksponentinis, b) parabolinis.

2.1 lentelė. Skaitiniame modelyje, taikomų medžiagų parametrų reikšmės (Zavalis, 2013)

Parametrai	Medžiaga
	Skiedinys A
Gniuždomasis stipris f_c , N/mm ²	33,0
Tempiamasis stipris f_t , N/mm ²	2,49
Tempimo irimo energija, $G_F \times 10^{-3}$, Nmm/mm ²	124,8
Gniuždymo irimo energija, G_F , Nmm/mm ²	25,3
Tamprumo modulis $E \times 10^{-3}$, N/mm ²	17,8
Puasono koeficientas, ν	0,23

2.2.2 Armavimo charakteristikos

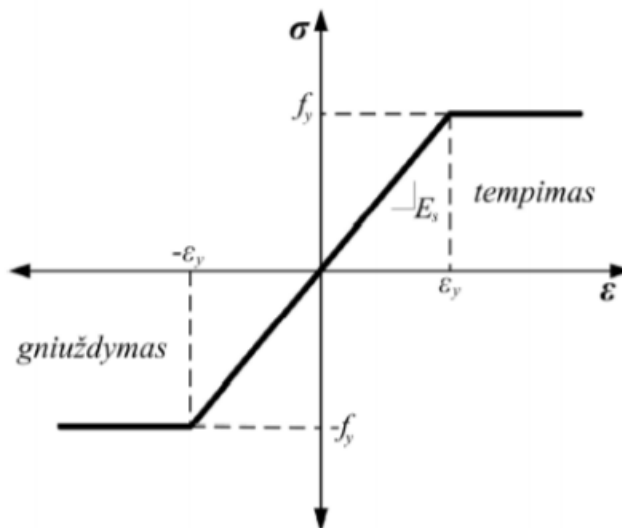
Armavimui naudojamos 1mm diametro vielos. 2.7 pav. pavaizduota, jog kiekviename baigtiniame elemente yra modeliuojama 4 vielos diametrai vietoje 1-o, taip yra dėl to, jog į vieną baigtinio elemento storį patenka keturi sluoksniai, o kiekvienas sluoksnis turi po vieną vielą. Todėl

modeliuojant armavimą, baigtiniais elementais, juose nurodyta visa armatūra tenkanti 100mm storio, plokštelių tipo elementams.

Armavimui naudojamas stiprus plienas, kurio takumo riba yra:

$$F_y = 1000 \text{ MPa}.$$

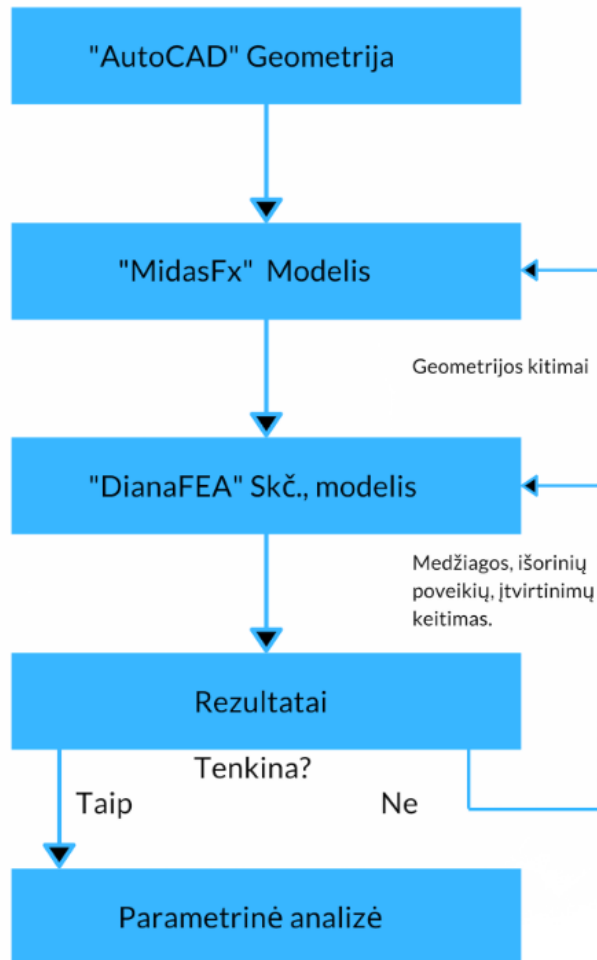
Medžiaga yra tampriai plastinė ir programoje įvedama su Von Mises'o sąlyga, kuriai pakanka medžiagos takumo ribos.



2.7 pav. Plieno medžiagos modelis pagal EC3

2.3 Skaičiavimo modelio sudarymas

Modelio sudarymui naudojame programinius paketus „MidasFX“ ir „Diana“. Programos tarpusavyje turi gerą saveiką. Sukurti modeliai „MidasFX“ programoj, puikiai dirba su „Diana“ baigtinių elementų skaičiavimo sistema, kuri po skaičiavimo leidžia nuskaityti rezultatus „MidasFX“ programiniame pakete. Ši programų sąveika gerokai palengvina rezultatų vizualizaciją ir jų valdymą.



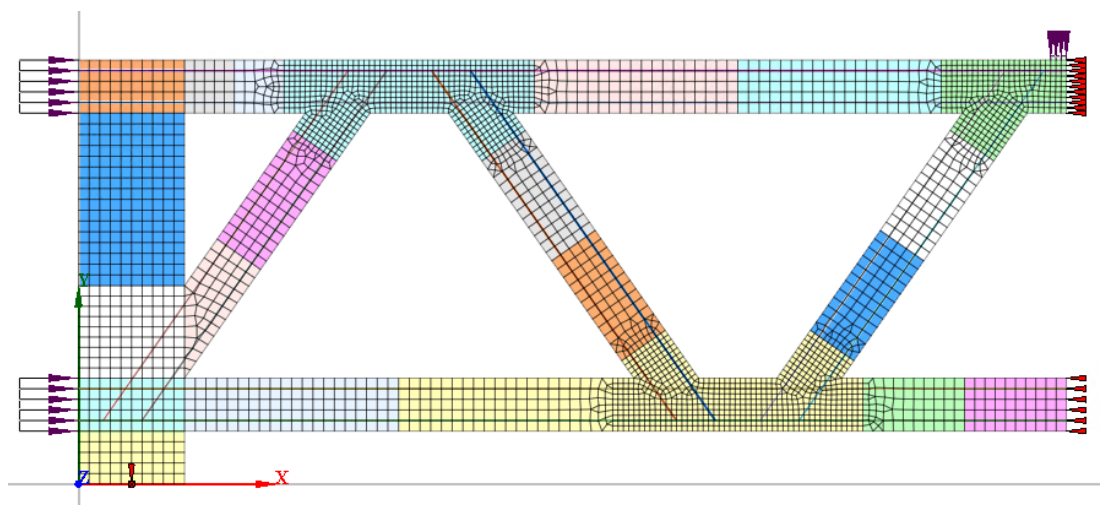
2.8 pav. Elemento geometrijos analizės procesas

Kaip ir minėta, geometrijos analizei naudosime baigtinių elementų metodą, todėl visas elementas modeliuojamas 2D erdvėje, pasitelkiant plokštelines ir strypinius baigtinius elementus.

Pirmiausia, modeliuojama santvaros tipo geometrija, naudojant plokštelės tipo baigtinius elementus. Įvedamas standus blokas, pagamintas iš tos pačios medžiagos ir esantis elemento kairėje (2.9 pav.), įtempių koncentracijos mažinimui.

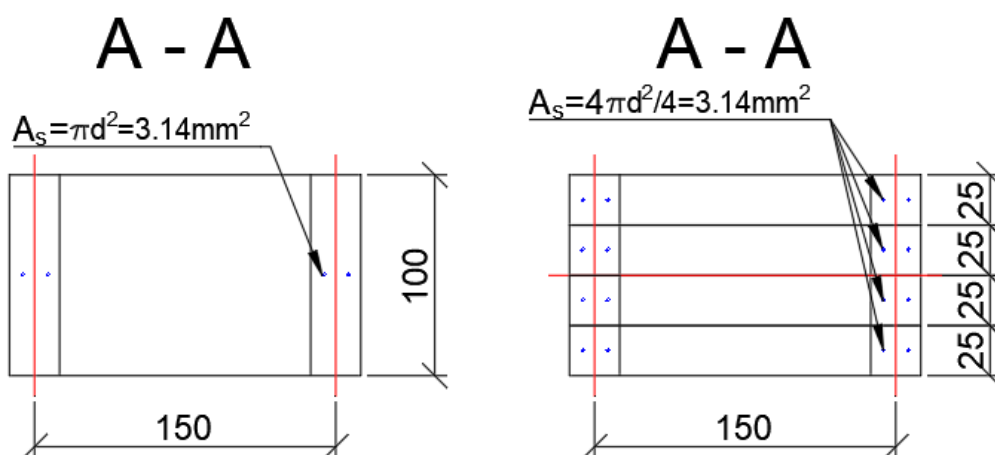
Taip pat įvedama plieninė atrama, ant kurios remiasi visas elementas (modeliuojama paslanki jungtis tarp atramos ir elemento, įvedant kontakto tipo baigtinius elementus su dideliu pasiduoamumu x-x ašies kryptimi). Čia reikia paminėti jog, elementas vaizduojamas gulščias, nors

praktikoje jis vertikalus, tačiau ,vizualizacijos ir modeliavimo patogumo tikslais, jis buvo paverstas į gulsčią poziciją.



2.9 pav. Elemento baigtinių elementų metodo, skaičiuojamasis modelis, „MidasFX“ aplinkoje

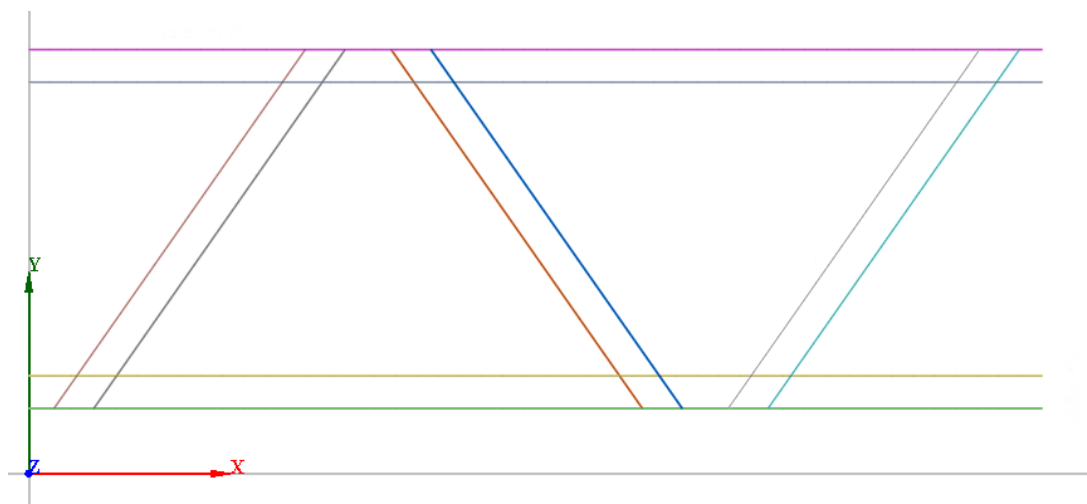
Pasirinktas tankus ir tikslus plokštelės tipo baigtinių elementų (toliau BE) tinklas, kurio narių dydžiai nuo 5mm (sutankintose mazgų vietose) iki 10mm. BE forma daugiausia kvadrato tipo. Tyrimai ir praktika rodo, jog kvadrato tipo 2D plokšteliniai BE turi mažiausią paklaidą (Barauskas, Balevičius, Kačianauskas, 2004). Tačiau ne visada pavyko taikyti kvadratinio tipo BE, ten kur geometrija sudėtingesnė (aštrūs kampai, suapvalinimai ir pan.). BE tinklas prisitaikė ir parinko optimalius trikampio tipo BE, kurie gali paveikti rezultatų netikslumus, tačiau aiškos įtempių koncentracijos tolimesniuose skyriuose atmetamos.



2.10 pav. Modeliuojamas 2D elemento pjūvis (kairėje) ir realus elemento skerspjūvis (dešinėje)

2.10 pav. vaizduojamas realus ir modeliuojamas, mūsų tiriamos konstrukcijos elemento, skerspjūviai. Modeliuojamas skerspjūvio aukštis yra 100mm. Tai yra vienas iš parametų, reikiamų modeliuojant plokštelės tipo BE-ais, šis dydis bus plokštelės storis.

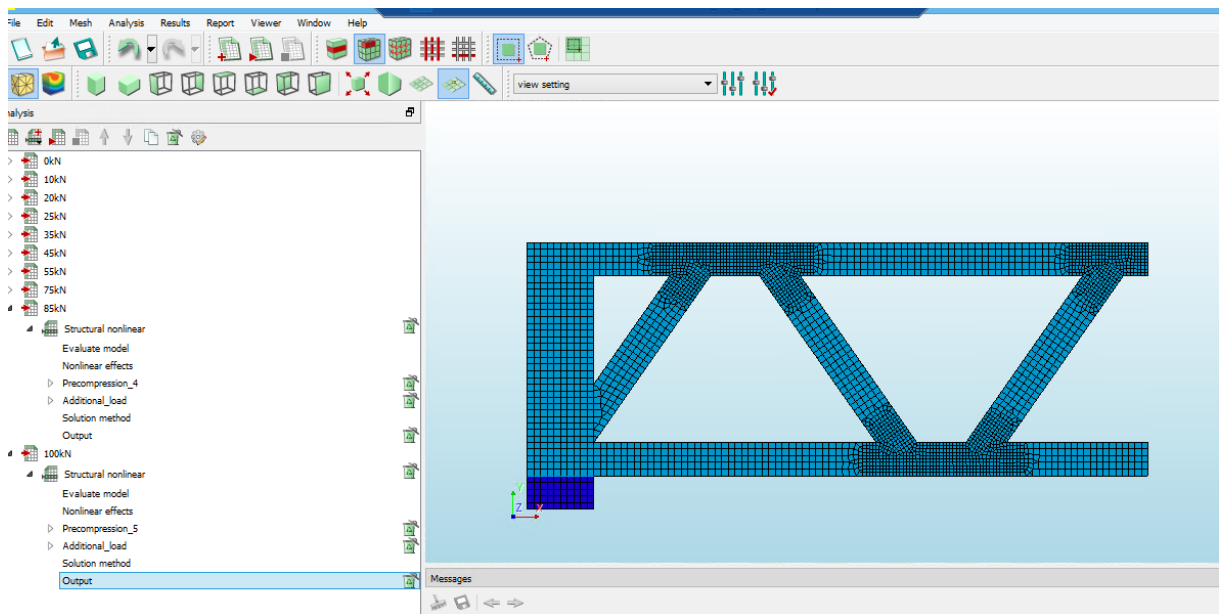
Tokiu būdu supaprastiname analizę, atmetant sluoksnių pasidūdamumą vienas kito atžvilgiu horizontaliomis x-y, y-x plokštumomis. Tai reiškia, jog kontaktas tarp sluoksnių idealiai standus ir elementas veikia kaip monolitinis gelžbetoninis.



2.11 pav. Elemento skaičiuojamojo modelio, armavimas

2.9 ir 2.11 paveiksluose parodytas strypinių BE-ų tinklas, sudarytas iš 1D tipo BE-ų, kurių ilgis 10mm. Tai leidžia tiesiogiai įvesti armavimo geometriją į jau esantį BE-ų tinklą. Šiuo atveju, armavimo geometrija, sugeneruota „AutoCAD“ programoje, buvo tiesiogiai įvesta į jau egzistuojantį plokštelių tipo BE-ų tinklą. Procesas labai paprastas ir veiksmingas. Tolimesniuose skyriuose atsispindi armavimo įvedimo privalumai. Kontaktas tarp šių dviejų elementų yra standus.

Surinkus visą informaciją ir paruošus modelį, jis yra iškeliamas į „DianaFEA“ programos suprantamą formatą, kadangi „MidasFX“ nepalaiko BEM skaičiavimo galimybių.



2.12 pav. Elemento skaičiuojamasis modelis, „DianaFEA“ aplinkoje

Atsidarius modelį „DianaFEA“ aplinkoje (2.12 pav.), koreguojami medžiagų, įtvirtinimų ir apkrovos parametrai. Sukuriamas skaičiavimo sekos „medis“, kuriame aprašoma visa skaičiavimų seka.

Visa analizė susideda iš 9 skirtingų skaičiuotinių sąlygų, t.y., kiekvienas variantas yra skaičiuojamas 9 kartus. Kiekvienas žingsnis susideda iš dviejų dedamųjų: 1) ašinės jėgos apkrovimo X kryptimi (išilgai elemento, sukeliant gniuždymo įrašą), 2) koncentruotos jėgos, kuri, pridėta su ekscentricitetu, sukelia momentą elemente apie z-z ašį.

Pirmiausia, atliekami skaičiavimai, kuriuose neveikia ašinė jėga ir veikia didžiausias lenkimo momentas. Paskiausiai skaičiuojama stadija, kai veikia didžiausia ašinė jėga ir neveikia lenkimo momentas. Tokiu būdu gauname priklausomybę $M - N$ (ašinės jėgos ir momento).

Skaičiavimams taikoma netiesinė analizė, kurioje įvertinamas fizinis medžiagų netiesiškumas (taikoma tik skiediniui, kadangi tik jo medžiaga įvesta netiesiniais parametrais).

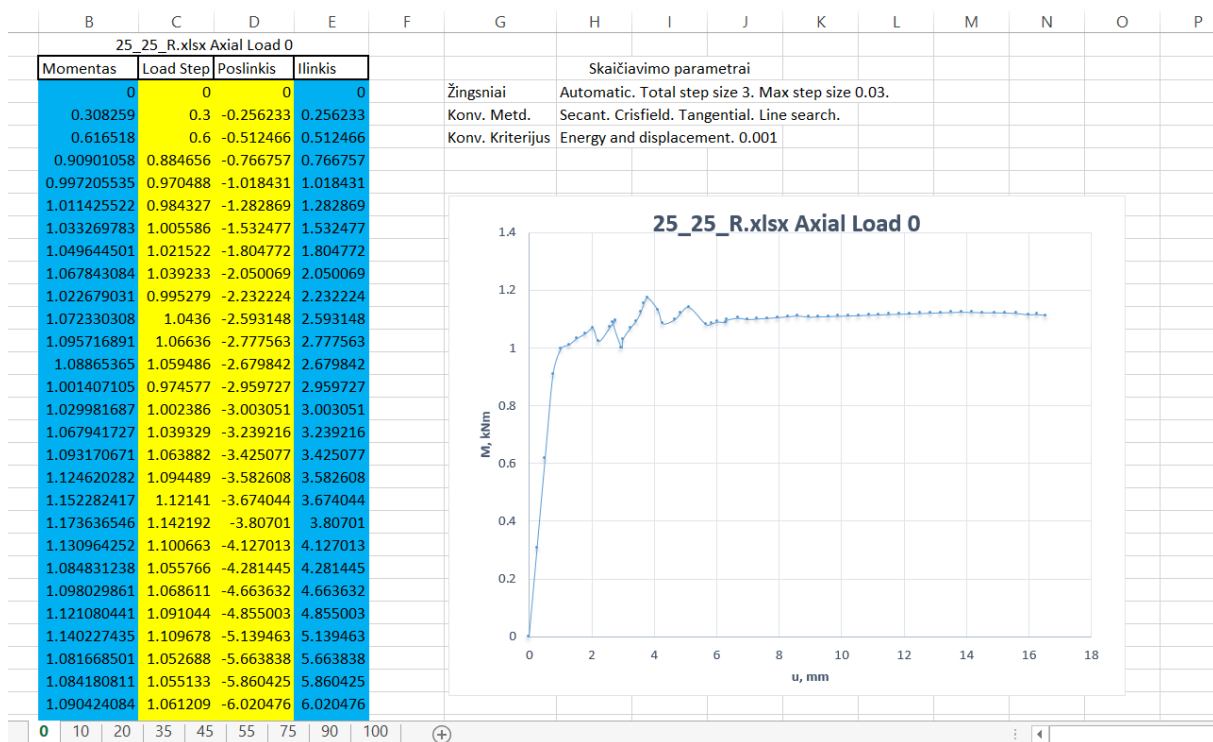
2.4 Lyginamoji rezultatų analizė

Atlikus visų variantų netiesinę analizę, gautus rezultatus buvo nuspręsta saugoti „.xlsx“ formatu (Excel programinės įrangos failų trumpinys). Tokiu būdu buvo sistemiškai sukurta duomenų bazė, kurią rezultatų analizės eigoje apdorojome.

2.13 paveiksle matomi pagrindiniai formatuojami parametrai. Kiekviena diagrama koduojama pagal tokią seką: **25_25_R**, pirmas skaitmuo (**25**) rodo kampo α didumą, antras skaitmuo (**25**) rodo w aikštelės didumą, trečiasis skaitmuo (**R** arba **UR**) rodo elemento armavimą, R – armuotas, UR – nearmuotas. Taip pat kiekvienas Excel failo puslapis užvardintas numeriu, kuris atitinka ašinės

apkrovos dydį. Geltoni langeliai nurodo gautus rezultatus iš „DIANA“ programinio paketo, kuriuos įkopijavus į šiuos Excel failus, buvo perskaičiuojami mums reikalingi ir geriau suprantami dydžiai (Momentas ir įlinkis).

Taip pat čia reikia paminėti, jog tolimesniuose skyreliuose bus analizuojamos (momento ir lenkiamojo standumo) priklausomybių grafikai, kadangi keičiant parametrus (spyrio posvyrio kampas ir aikštelės ilgis), keičiasi mūsų nagrinėjamos konstrukcijos ilgis, todėl lyginimas per įlinkį yra nekorektiškas.



2.13 pav. Rezultatų formato, Excel forma pavyzdys

Taigi tokiu būdu buvo sugeneruotos 288 skirtingos momento ir įlinkio priklausomybių diagramos. Darbo eigoje buvo nuspręsta, jog analizuoti tokį kiekį duomenų bus pakankamai sudėtingas ir imlus laikui darbas, todėl tam tikslui buvo sukurtas programinis algoritmas, efektyviai analizei vykdyti.

Programa sukurta programine kalba *Python* ir veikia tokiu principu: pirmiausia yra nuskaitoma visa sukaupta duomenų bazė, tada pagal kiekvieno failo pavadinimą yra atrenkami mums aktualūs dydžiai ir toliau naudojami analizei. Vartotojas pasirenka kokius dydžius norima kontroliuoti: kampo didumą, aikštelę, apkrovą ir armavimą. Tokiu būdu paspartiname duomenų analizės darbą, eliminuodami didelio kiekio duomenų, mechaninį įvedimą.

2.4.1 Aikštelės ilgio poveikis

Kaip ir minėta 2.3 skyriuje, elemento elgseną buvo nuspręsta vertinti pagal veikiamo momento ir tuo metu esančio elemento standumo priklausomybę. Tokiu būdu panaikinamas elemento ilgio poveikis rezultatams. Šiam tikslui pasiekti, visus gautus rezultatus (momento ir įlinkio diagramas) reikia perskaičiuoti:

$$w = k \cdot \frac{1}{r} \cdot l^2, \quad (11)$$

čia

w – įlinkis, gautas iš netiesinės analizės,

k – koeficientas įvertinantis apkrovimo sąlygas,

$\frac{1}{r}$ – elemento kreivis,

l – elemento ilgis,

$$w = k \cdot \frac{M}{EI} \cdot l^2, \quad (12)$$

čia

M – lenkiamasis momentas,

EI – lenkiamasis standumas,

$$k = \frac{3 - 4(a^2)}{48 \cdot (1 - a)} = \frac{3 - 4 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^2}{48 \cdot (1 - 0.5)} = \frac{1}{12}, \quad (13)$$

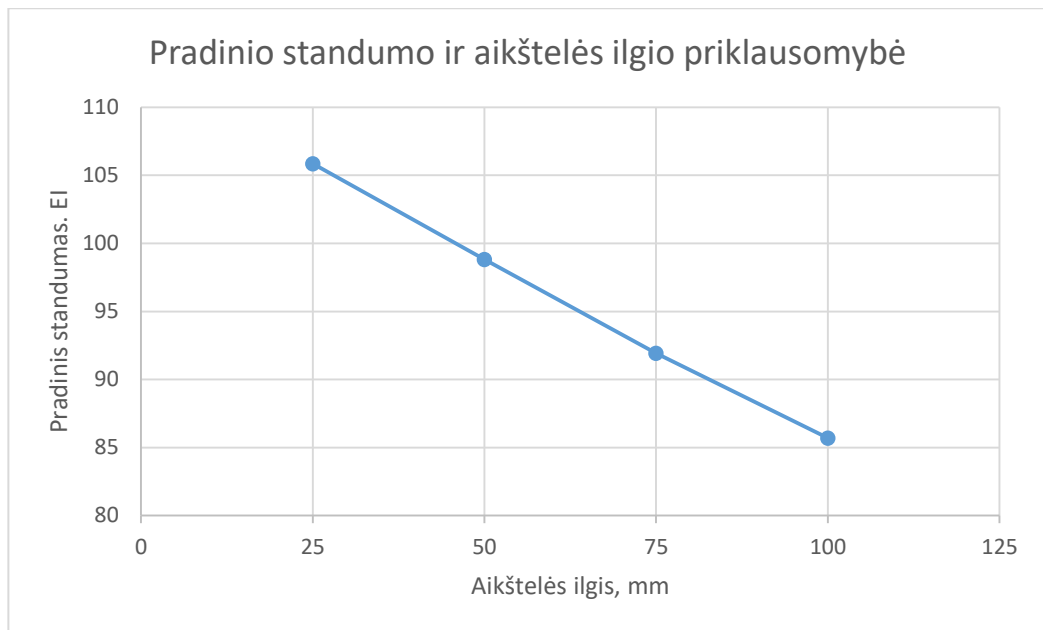
Sustačius visus dydžius, gauname formulę, lenkiamiesiems standžiams persiskaičiuoti:

$$EI = \frac{M \cdot l^2}{12 \cdot w}. \quad (14)$$

Armuoti elementai.

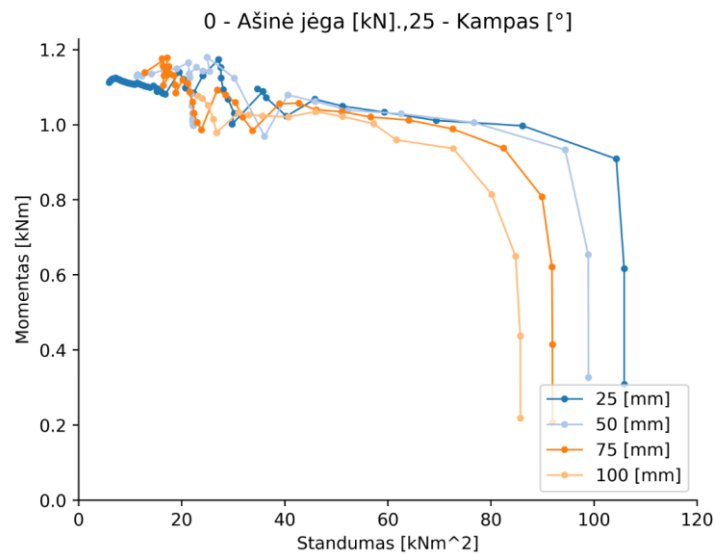
Paveiksluose 2.15-2.16, vaizduojamos momentų ir lenkiamojo standumo priklausomybės skirtingomis geometrinėmis sąlygomis. Aikštelės ilgiui analizuoti pasirinkome pastovų ašinės jėgos dydį (0kN) ir pastovius kampus, (25-55°).

Rezultatai rodo, jog, esant mažiausiam tiriamam kampui $\alpha = 25^\circ$, aikštelės dydis turi įtakos pradiniam elementų lenkiamiesiems standumams, $EI_{25} = 105,849$ $EI_{50} = 98,81$ $EI_{75} = 91,94$ $EI_{100} = 85,70$. Padidinus aikštelę dvigubai, standumas sumažėja 6,55 %, padidinus trigubai – standumas sumažėja 13,14 %. Tai rodo, jog grafiko pradžioje galioja tiesinė priklausomybė tarp dydžių: pradinio EI ir w .



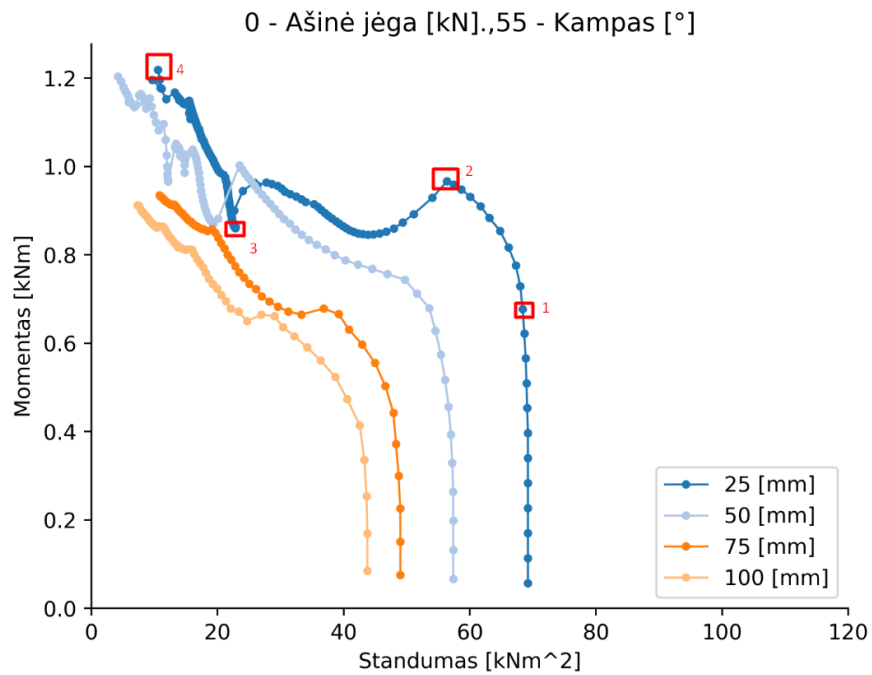
2.14 pav. Armuoto elemento pradinio standumo ir aikštelės ilgio priklausomybė

Taip pat 2.15 pav. matyti, jog prasidėjus elemento netiesiniam darbui (apie 0,9 kNm), visais keturiais atvejais standumo kitimas tampa vienodas, tačiau esant didesniai kampui, (2.16 pav.) aikštelės didumas turi vis didesnę įtaką elemento elgsenai.



2.15 pav. Elemento „25_variable_0_R“ momento ir standumo priklausomybių diagrama

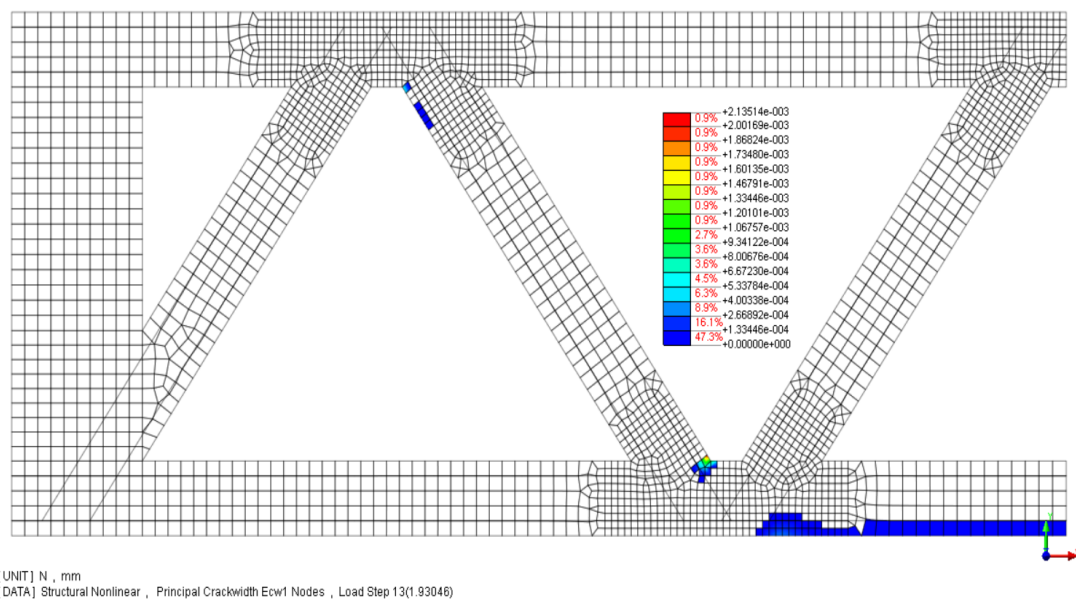
Toliau nagrinėjami 2.16 diagramos taškai, kuriuose gerai atsispindi elemento mechaninis darbas. Šis yra būdingas visiems tiriamiems elemento geometriniais atvejais.



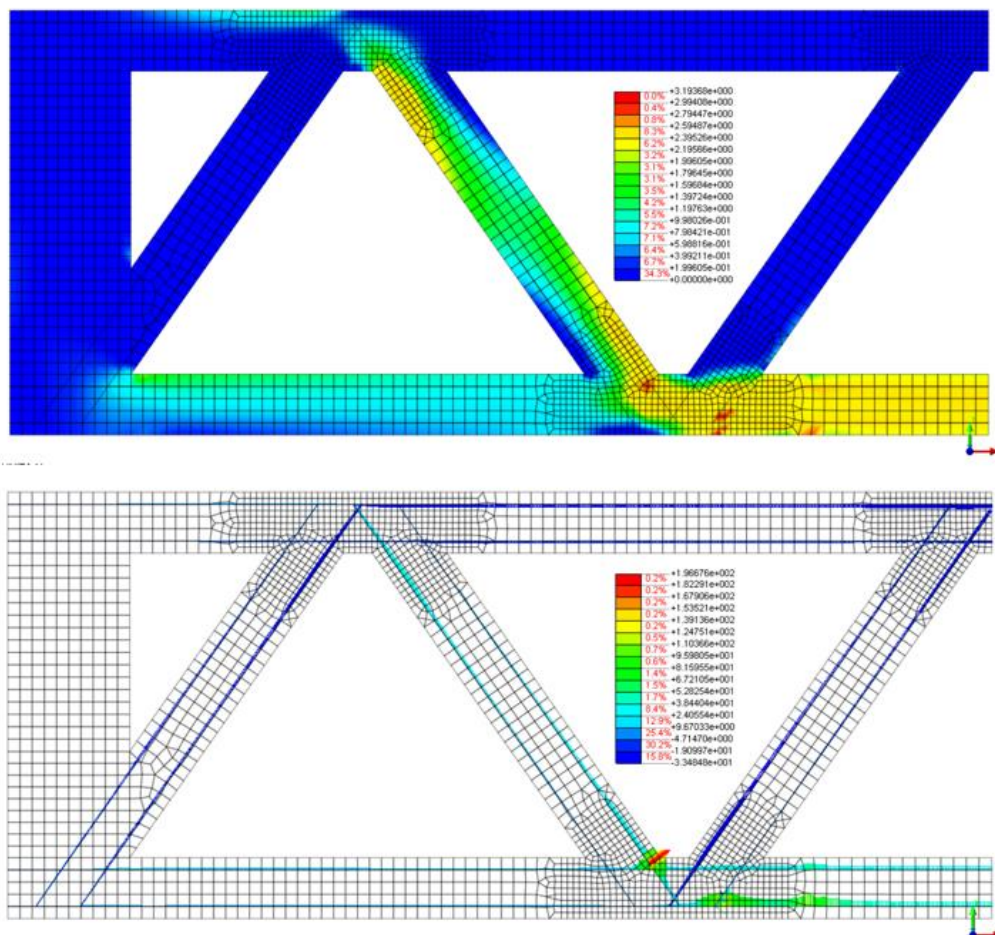
2.16 pav. Elemento „55_variable_0_R“ momento ir standumo priklausomybių diagrama

Pirmame taške (numeravimas iš dešinės į kairę, standumo mažėjimo kryptimi) prasidėjęs pleišėjimas elemento tempiamoje juostoje, netoli nuo jungties taško su spyriu (pav. 2.17). Toliau didėjant lenkiamajam momentui, didėja elemente tempiamieji įtempiai ir antrame taške pasiekiami tokie įtempiai, kurių skiedinio dalis elemente nebegali atlaikyti. Plyšio vystymosi vietoje atsiranda magistralinis plyšys ir tik armatūra perima tempimo įtempius. Tada įvyksta nusikrovimas (pav. 2.18 – 2.19), įtempiai armatūroje išauga, skiedinyje sumažėja, pleišėjimas „persimeta“ į kitą elemento vietą, tačiau pagrindiniai plyšiai išlieka tempiamoje juostoje ir toliau ten vystosi.

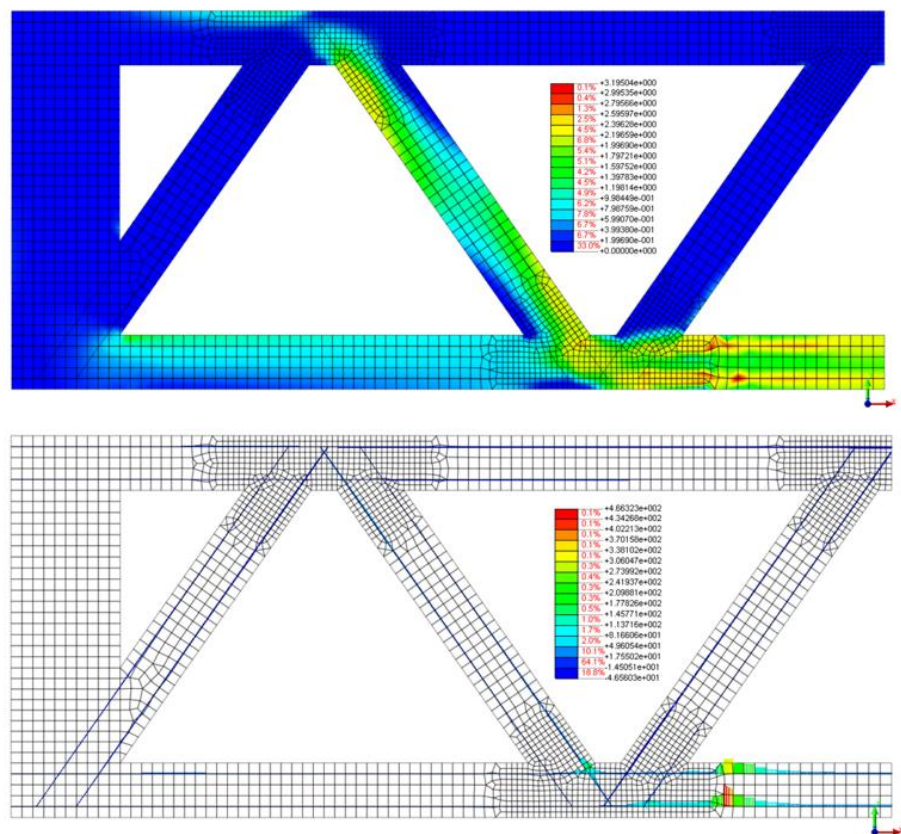
Plyštant skiediniui ir persiskirstant tempimo įtempiams per visą skerspjūvį, elemento laikomoji galia auga iki tol, kol 4 taške tempimo įtempiai pasiekia reikšmę didesnę nei armatūros takumo įtempiai. Pasiekus armatūros takumo įtempius, tolesni skaičiavimai nekonverguoja, todėl tolesni rezultatų taškai grafike nepateikiami.



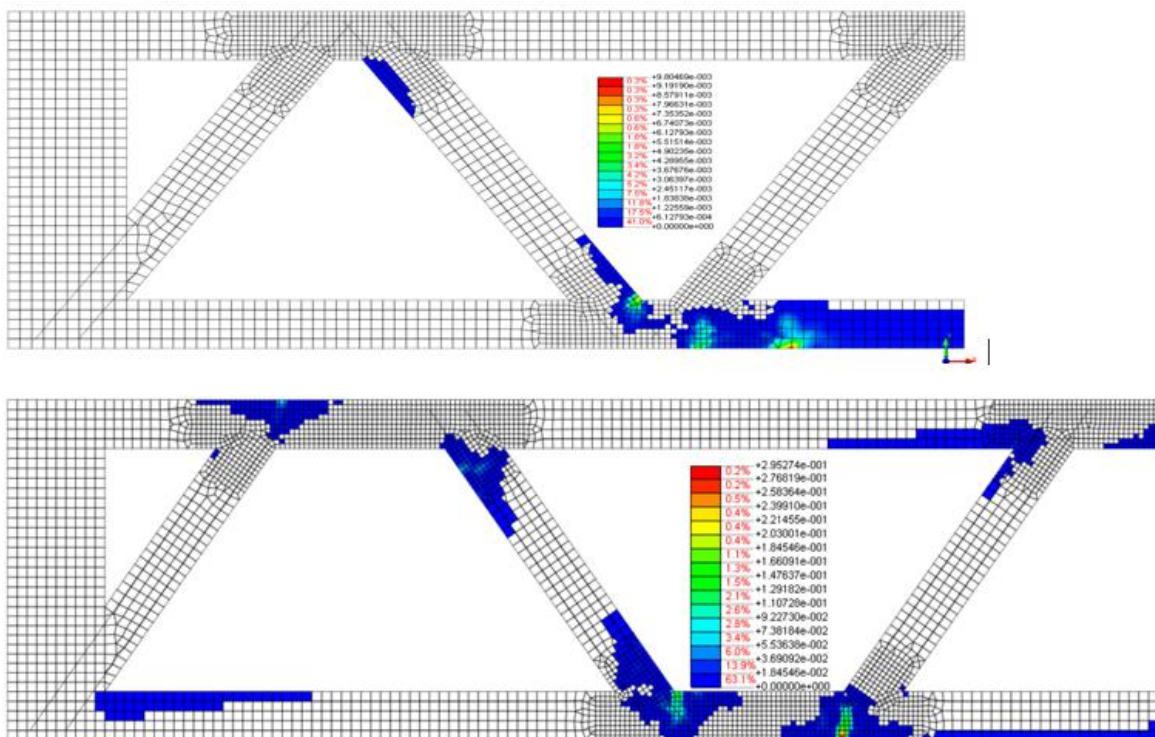
2.17 pav. Elemento „55_25_0_R“ plyšio pločio pasiskirstymas 1 grafiko taške



2.18 pav. Skiedinio (aukščiau) ir armatūros tempimo įtempių pasiskirstymas elemente prieš pirmąjį trūkį



2.19 pav. Skiedinio(aukščiau) ir armatūros tempimo įtempimų pasiskirstymas elemente po pirmojo trūkio



2.20 pav. 55_25 aukščiau, 55_100 elementų pleišėjimo pasiskirstymai prieš pirmą trūkį

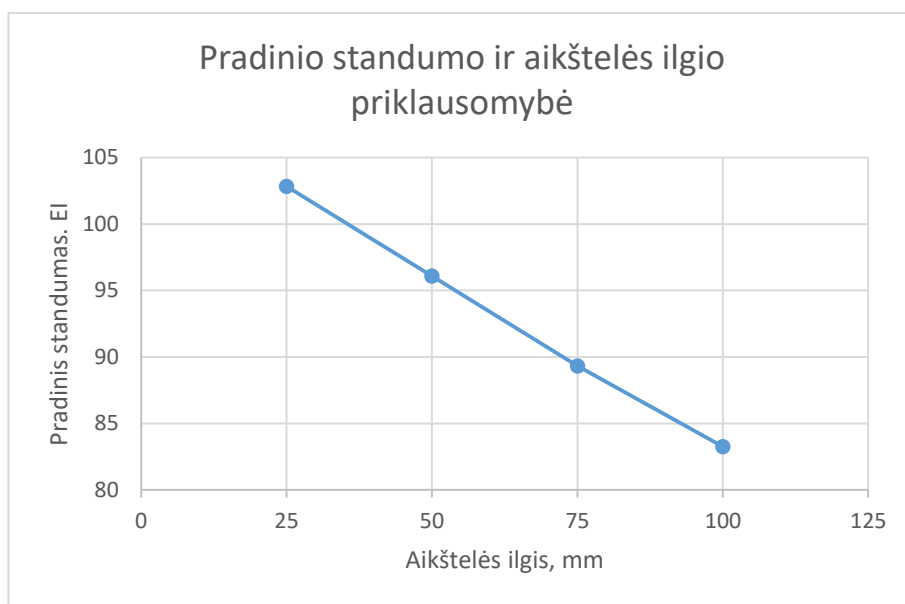
Vertinant aikštelės įtaką, būtina pabrėžti elemento elgsenos (pleišėjimo) pokyčius. Tuo tikslu palyginsime 55° kampo ir 25mm bei 100mm aikštelių atvejus. 2.20 paveiksle matyti, jog padidinus aikštelę tiesiai po spyriais atsiranda akivaizdžios magistralinių plyšių zonos. Šie plyšiai nuskaityti prieš pat abejoms konstrukcijoms nusikraunant (įvykus staigiam laikomosios galios sumažėjimui). Čia matyti, jog elemente, kurio aikštelė didesnė, plyšiai pasiskirsto po visą elementą tankiau nei ten, kur aikštelė mažesnė.

Iš čia galime daryti prielaidą, jog esant tankesniai elemento supleišėjimui, jo standumas gerokai sumažėja. Dėl to laikomoji galia taip pat sumažėja.

Išvada: Didėjant elemento aikštei, laikomoji galia ir standumas mažėja. Padidinus aikštelę dvigubai, standumas sumažėja 6,55 %, padidinus trigubai standumas sumažėja, 13,14 %.

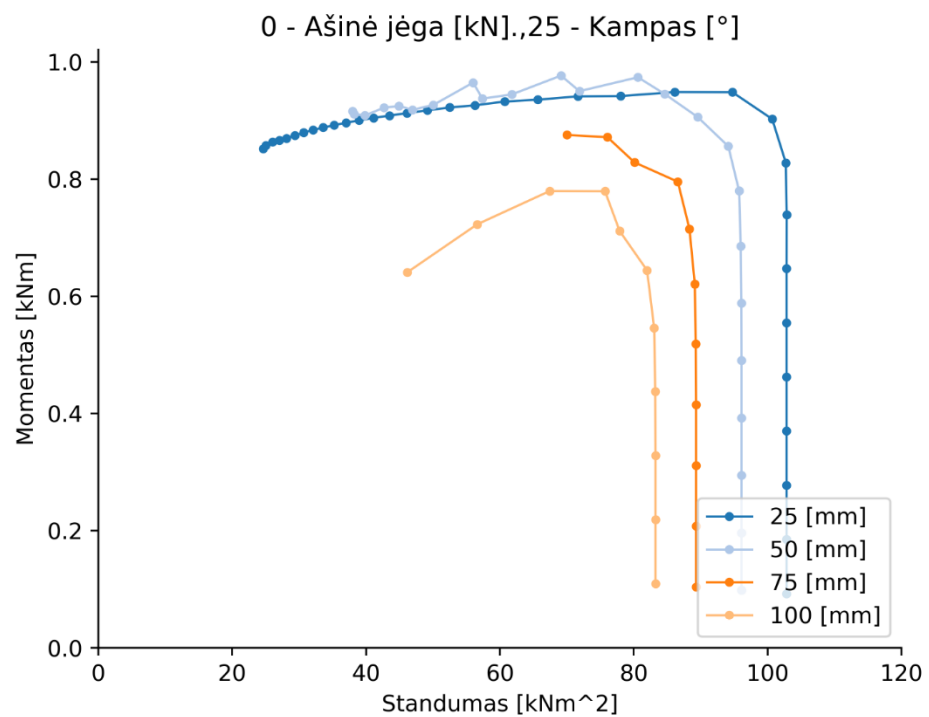
Nearmuoti elementai.

Taip pat kaip ir armuotiems elementams, keičiant elemento aikštelės didumą, keičiasi nearmuoto elemento pradiniai standumai. Rezultatai rodo, jog esant mažiausiam tiriamam kampui $\alpha = 25^\circ$, aikštelės dydis turi įtakos pradiniam elementų lenkiamiesiems standumams, $EI_{25} = 102,83$ $EI_{50} = 96,11$ $EI_{75} = 89,32$ $EI_{100} = 83,25$. Padidinus aikštelę dvigubai, standumas sumažėja 9,21 %, padidinus trigubai standumas sumažėja, 15,62 %. Šią priklausomybę atvaizduojame diagrama:



2.21 pav. Ne armuoto elemento pradinio standumo ir aikštelės ilgio priklausomybė

Pradinių standumų didumai praktiškai identiški. Tai galima būtų paaiškinti tuo, jog pradinėje stadijoje elemento standumas visiškai priklauso nuo betono laikomosios galios. Pagrindinis skirtumas tarp armuoto ir nearmuoto elemento yra tas, jog nearmuotas praktiškai neturi plastinės zonos, t.y. po pleišėjimo jis nebegali perimti įtempių ir jo darbas baigiasi irimu. Tokia elgsena buvo fiksuojama kiekvienu atveju.



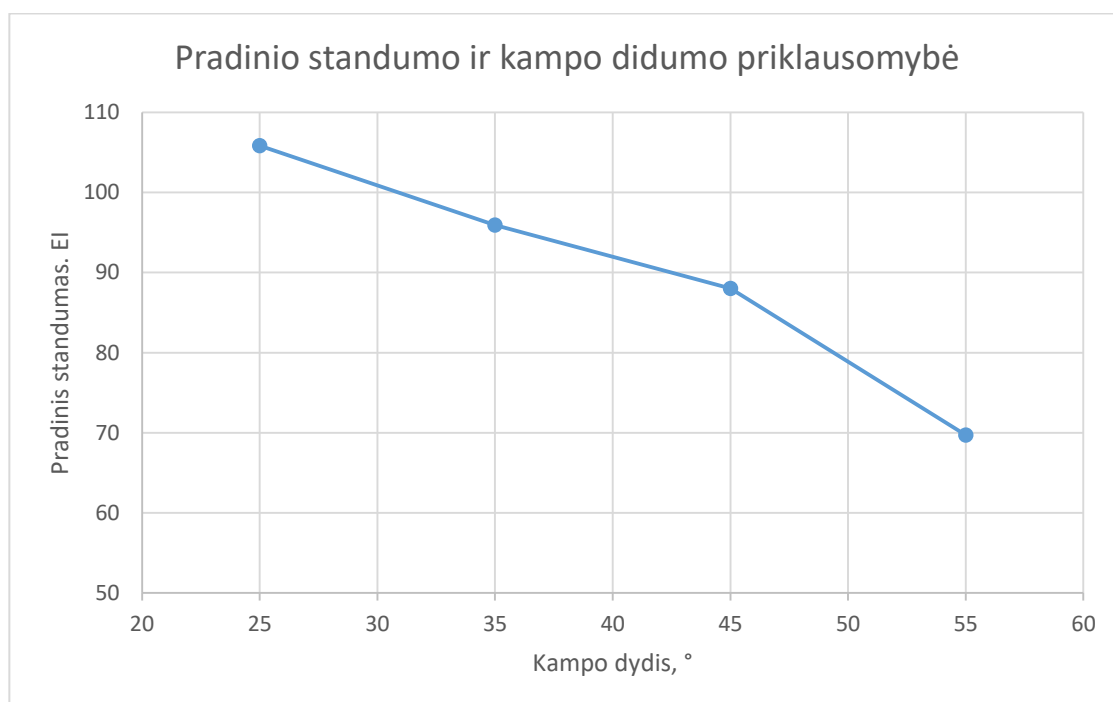
2.22 pav. Elemento „25_variable_0_UR“ momento ir standumo priklausomybių diagrama

2.22 pav. vaizduoja tipinę elemento elgseną, tarpiniai variantai pateikti B priede.

2.4.2 Posvyrio kampo poveikis

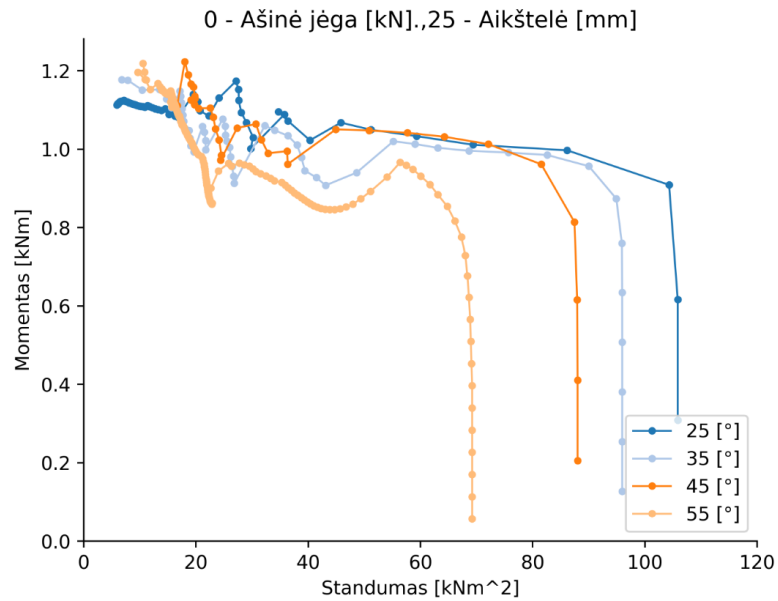
Paveiksluose 2.24–2.25 vaizduojamos momentų ir lenkiamojo standumo priklausomybės skirtingomis geometrinėmis sąlygomis. Spyrio kampui analizuoti, pasirinktas pastovus ašinės jėgos dydis (0 kN) ir pastovus aikštelės ilgis (25–100mm).

Rezultatai rodo, jog, kaip ir aikštelės analizėje, esant mažiausiai tiriamai aikštelės dydžio reikšmei $w = 25\text{mm}$, kampo dydis turi įtakos pradiniam elementų lenkiamiesiems standumams, $EI_{25} = 105,849$ $EI_{35} = 95,94$ $EI_{45} = 88,01$ $EI_{55} = 69,7$. Padidinus kampą 40 %, standumas sumažėja 9,36 %. Padidinus 80 % standumas sumažėja, 16,85 %. Tai rodo jog, galioja tiesinė priklausomybė tarp dydžių: pradinio EI ir α .

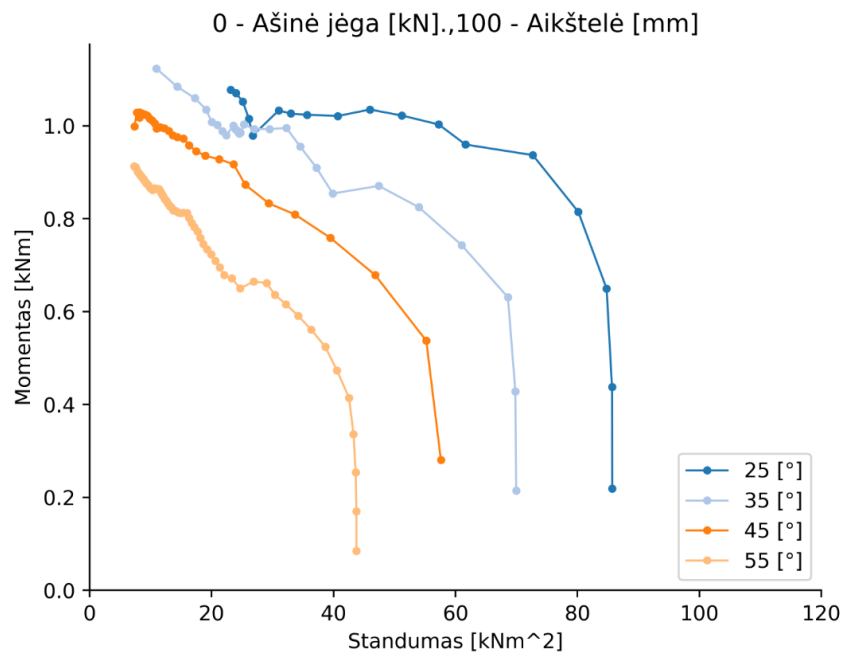


2.23 pav. Armuoto elemento pradinio standumo ir kampo didumo priklausomybė

Taip pat lyginant grafikus 2.24 ir 2.25 matyti, jog pasiekus tam tikrą laikomosios galios ribą (momentą), elementų standumai kinta vienodai. Tai mums sako, jog esant mažiems kampams ir mažoms aikštelėms, elementai dirba nepriklausomai nuo atskirų kintamųjų. Tai reiškia, jog esant mažam kampui, nepaisant kokių atstumų tarp spyrių parinksime, elementas deformuosies vienodai. Panaši elgsena pastebėta analizuojant ir aikštelės ilgio pokytį.

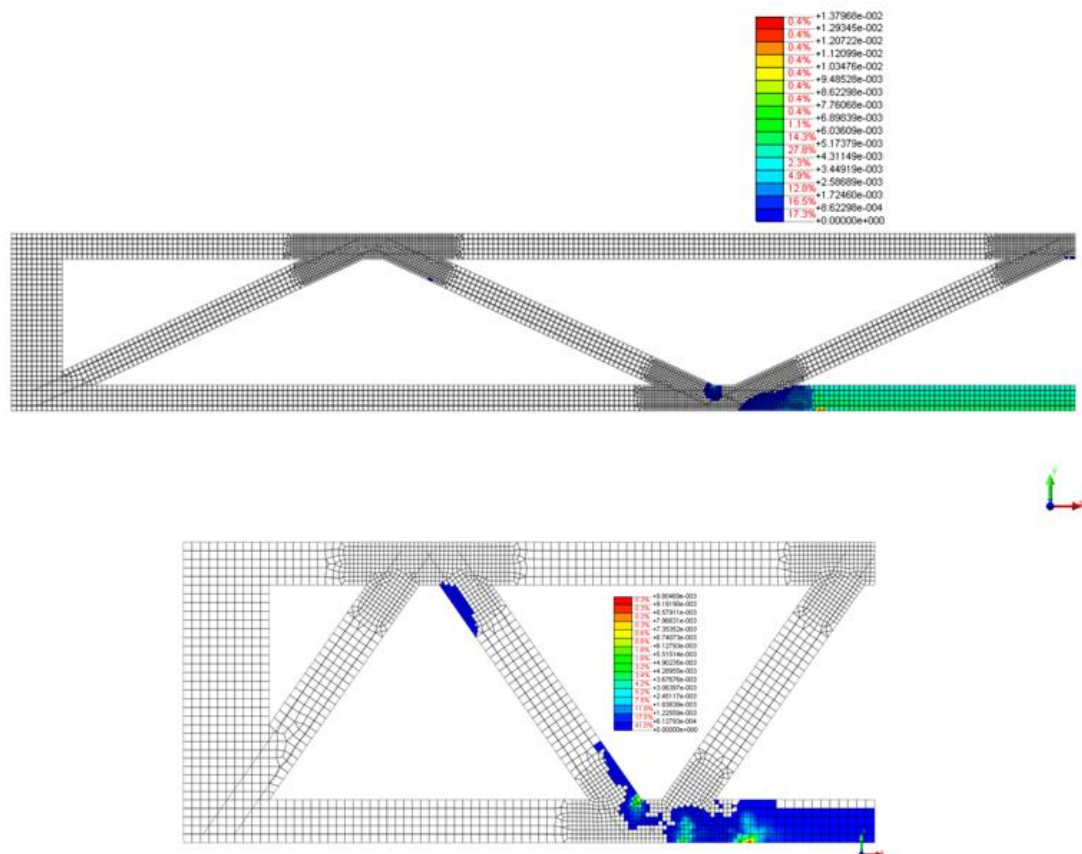


2.24 pav. Elementų „variable_25_0_R“ momento ir standumo priklausomybių diagrama



2.25 pav. Elemento „variable_100_0_R“ momento ir standumo priklausomybių diagrama

Iš aikštelės analizės nustatėme, kad laikomosios galios ir standumo pokytį apsprendžia elemento pleišėjimo charakteris. Toliau analizuojamas spyrio posvyrio kampo poveikis elemento laikomajai galiai ir elemento pleišėjimo charakteriui. Tam tikslui nagrinėjome du kraštutinius variantus esant didžiausiam ir mažiausiam kampui.



2.26 pav. 25_25 aukščiau, 55_25 elementų pleišėjimo pasiskirstymai, prieš pirmą trūkį

2.26 paveiksle matyti, jog padidinus kampą, pleišėjimo charakteris praktiškai nepakinta, magistraliniai plyšiai vystosi netoli spyrio ir juostos jungimosi vietose, ne taip kaip esant kintamai aikštelei.

Galima teigti, kad keičiantis spyrio posvyrio kampui konstrukcijos pradinis standumas kinta greičiau negu keičiant aikštelės ilgį, tačiau keičiant aikštelės ilgį, keičiasi pleišėjimo charakteris. Didesnį poveikį elemento laikomajai galiai turi spyrio posvyrio kampo kitimas. 7.2 lentelė rodo, jog vienodai didinat kampą ir aikštelę pradinis elemento standumas kinta žymiai greičiau keičiant kampą nei aikštelės ilgį.

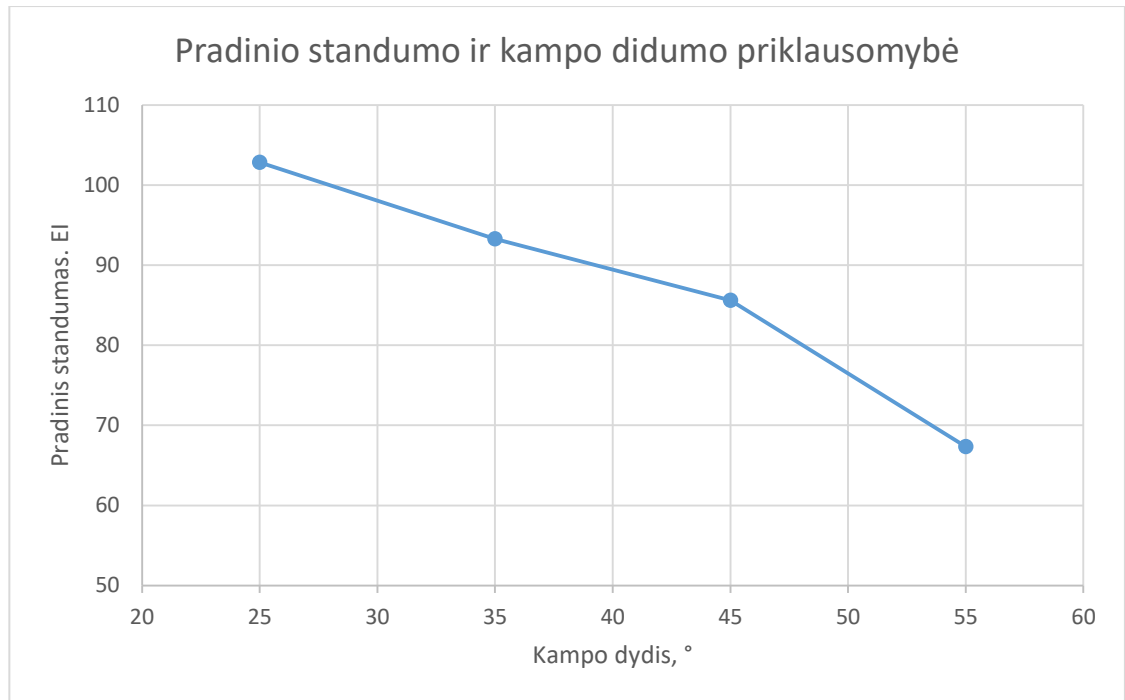
2.2 lentelė. Kampo ir aikštelės įtakos palyginimas.

Kintamasis	°, mm	Pradiniai standumai EI	Standumų pokytis %	Kintamojo pokytis %
Kampas	50	78.855	-25.50 %	100.00 %
Aikštelė	50	98.81	-6.65 %	100.00 %

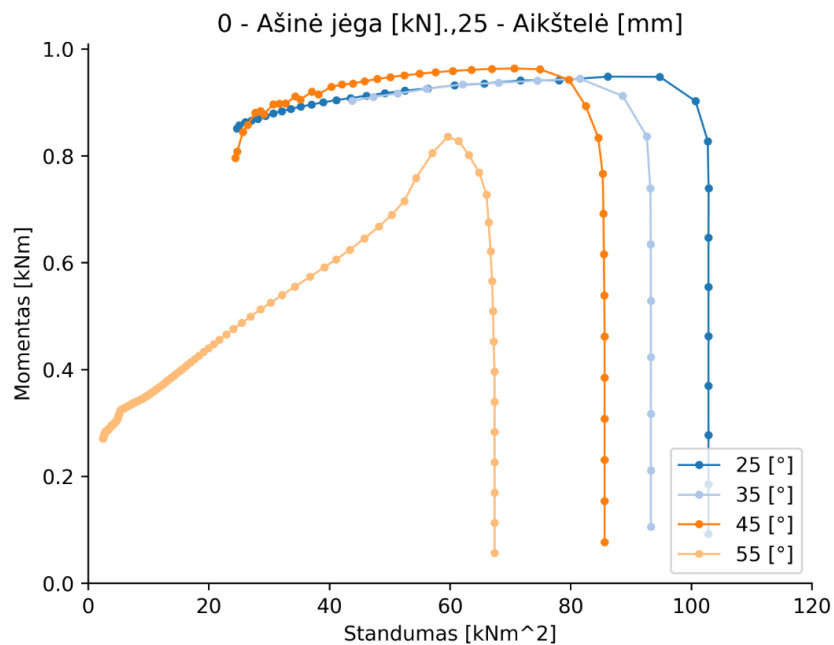
Nearmuoti elementai.

Taip pat kaip ir armuotiems elementams, keičiant elemento kampo didumą keičiasi nearmuoto elemento pradiniai standumai. Rezultatai rodo, kad esant mažiausiam tiriamam kampui $\alpha = 25^\circ$,

aikštelės dydis turi įtakos pradiniam elementų lenkiamiesiems standumams, $EI_{25} = 102,83 EI_{50} = 96,11 EI_{75} = 89,32 EI_{100} = 83,25$. Padidinus aikštelę dvigubai, standumas sumažėja 9,21 %, padidinus trigubai standumas sumažėja, 15,62 %. Šią priklausomybę atvaizduojame diagrama:



2.27 pav. Ne armuoto elemento pradinio standumo ir kampo priklausomybė

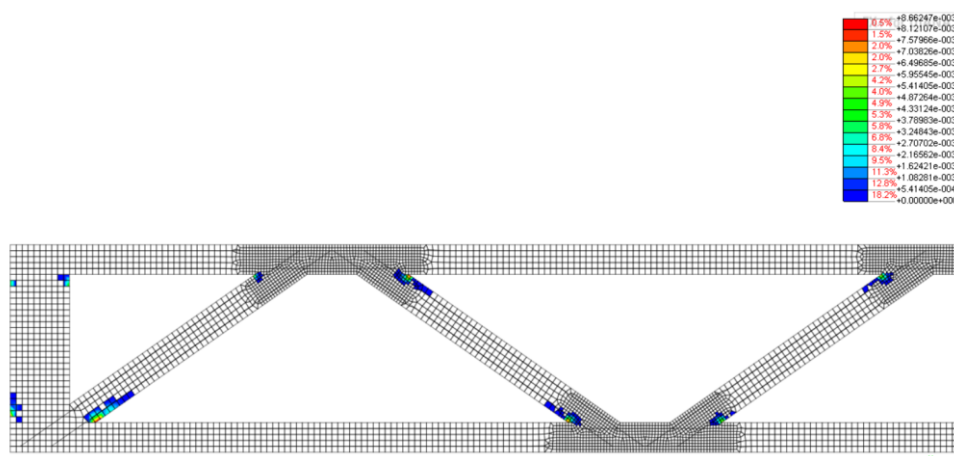


2.28 pav. Tipinė ne armuoto elemento momento ir standumo priklausomybė

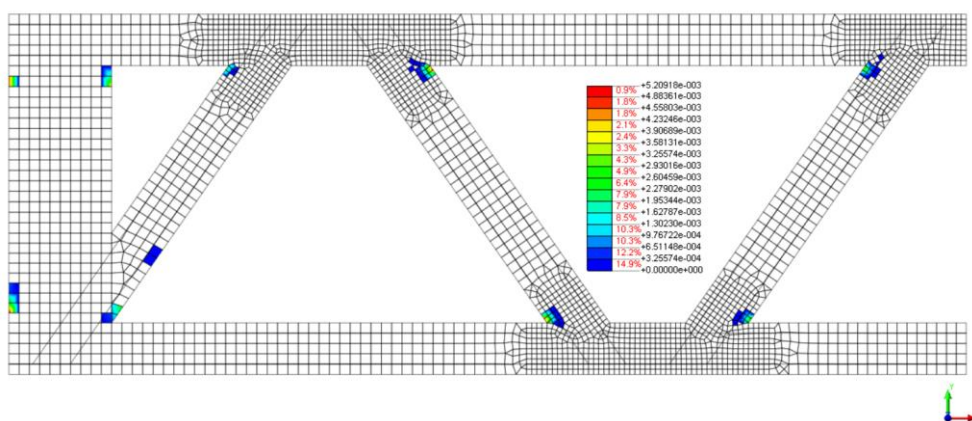
2.4.3 Ašinės jėgos poveikis

Armuoti elementai.

Kiekvienas elementas, prieš apkraunant jį koncentruota jėga, kuri sukelia momentą, yra apkraunamas ašine jėga, kuri generuoja gniuždymo įrašas elemento juostose, bet turi neigiamą poveikį elemento pleišėjimui. Priekrova sukelia pradinius plyšius juostos ir spyrio sujungimuose (2.29 pav.). Esant pakankamai didelei ašinei jėgai, pradinių plyšių pasiskirstymas yra pakankamai žymus. Reikia paminėti, jog spyrio posvyrio kampo didumas ir aikštelės ilginimas, taip pat turi įtakos pradiniam plyšio pasiskirstymui. Didesnis kampas nulemia plyšių pasiskirstymą spyrio ir juostos jungimo vietose (2.29 – 2.30 pav.).



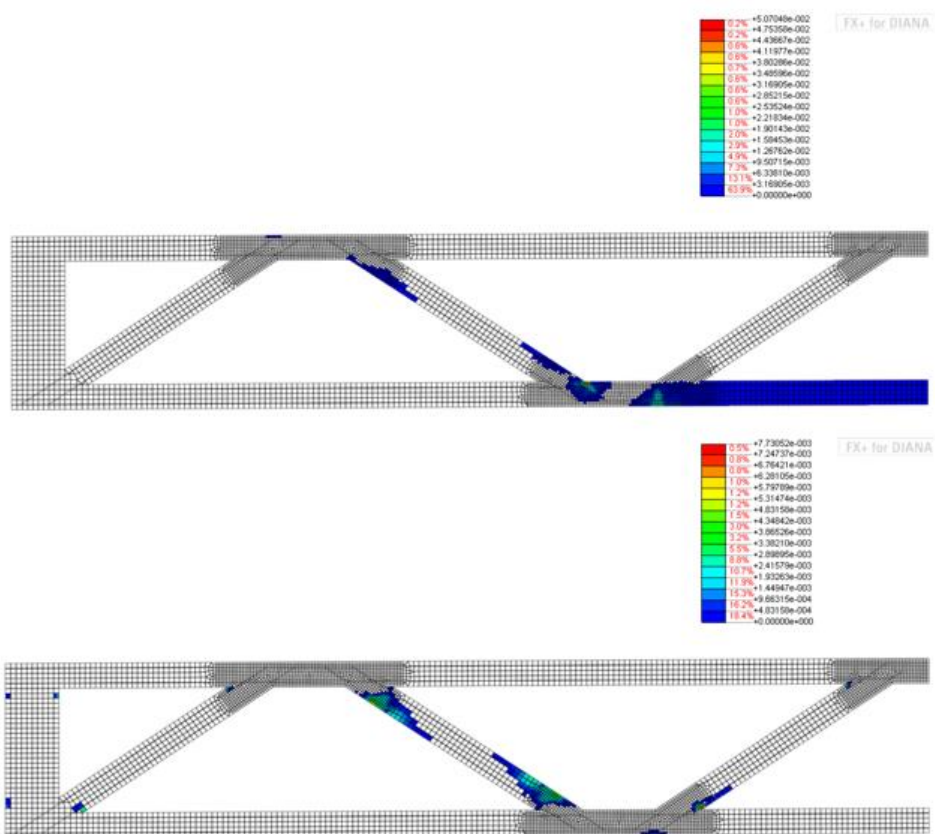
2.29 pav. Elemento 35_50_75_R plyšių pločio pasiskirstymo diagrama



2.30 pav. Elemento 55_50_75_R plyšių pločio pasiskirstymo diagrama

Tačiau iš esmės, pradinių gniuždymo įtempių atsiradimas elemente pagerina tolimesnę elemento elgseną, pakeičiant pačio elemento darbą. Kadangi konstrukcija iš esmės yra statiskai neišsprendžiamas uždavinys, nes elementas yra kompozitinis (vyksta įrašų persiskirstymas ir pan.),

todėl trūkinėjant spyriams paliekama didesnė atsarga juostoms. 2.31 paveiksle matyti kaip skiriasi elemento pleišėjimo charakteris esant skirtingiems išankstiniams apkrovimams.



2.31 pav. 35_75_R elemento pleišėjimo pasiskirstymas. Esant 0kN (aukščiau) ir 45kN ašinei jėgai

Tam, kad galėtume skaitiškai įvertinti, kaip keičiasi elementų laikomosios galios nuo priekrovos didumo, buvo atlikta palyginamoji analizė. Buvo vertinami maksimalūs elemento atlaikomieji momentai priekrovai.

2.3 lentelė. Maksimalių momentų kampo, aikštelės ir priekrovos priklausomybės, veikiant 0 kN ašinei jėgai

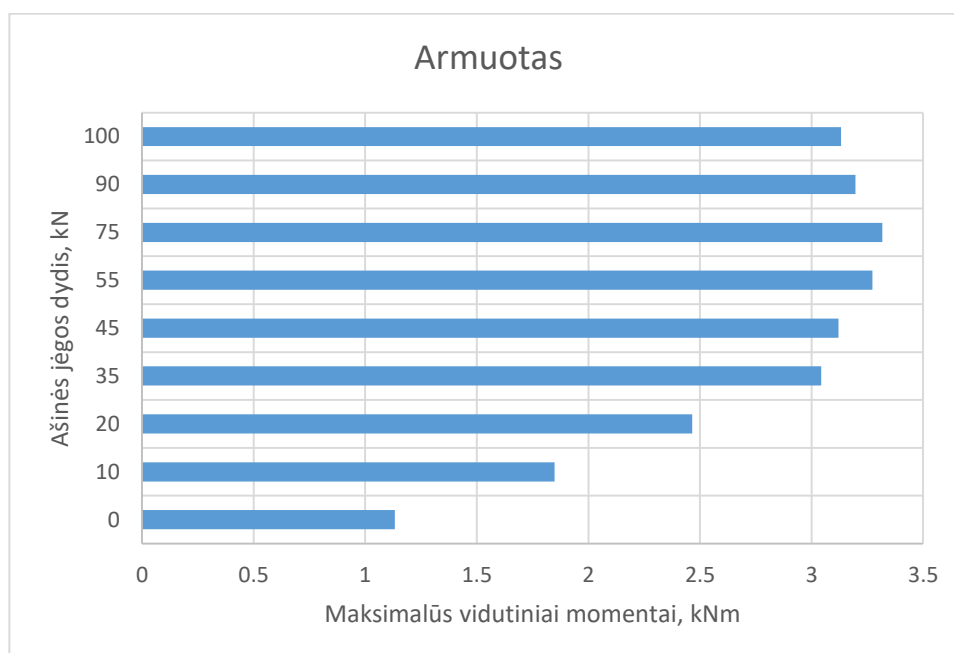
	Maksimalūs momentai. Priekrova 0 kN. Armuotas			
	25°	35°	45°	55°
25mm	1.173636546	1.177385794	1.223068164	1.218824174
50mm	1.179735109	1.162509993	1.314099648	1.203767648
75mm	1.178773108	1.136756557	1.068170775	0.935242346
100mm	1.077011013	1.123302856	1.028861205	0.91230324

Tokiu principu buvo įvertinti visi galimi konstrukciniai variantai (tarpiniai rezultatai pateikti prieduose) ir gauta kita priklausomybė, kuri rodo vidutinį momento padidėjimą keičiantis priekrovai.

Taip pat reikia paminėti, jog geriausios konstrukcijos elgsenos rezultatai buvo pastebėti elementą veikiant 75 kN veikiančiai ašinei jėgai 2.4 lentelė.

2.4 lentelė. Maksimalių momentų kampo, aikštelės ir priekrovos priklausomybės, veikiant 75 kN ašinei jėgai

Maksimalūs momentai. Priekrova 75 kN. Armuotas				
	25°	35°	45°	55°
25mm	3.910988796	3.734928283	3.308076889	2.296739334
50mm	4.387211606	3.562120233	3.137826816	3.016640419
75mm	3.968216111	3.401105479	3.392593313	2.005719437
100mm	3.869691419	3.376510718	3.18220352	2.51533593



2.32 pav. Priekrovos ir laikomosios galios priklausomybė, armuotiems elementams

Paveiksle 2.32 atsispindi akivaizdi tendencija, kuri yra panaši gelžbetoninėms konstrukcijoms, Čia vaizduojama momentų ir ašinių jėgų priklausomybė, kuri rodo, jog didėjant ašinei jėgai didėja ir atlaikomas lenkiamasis momentas iki tam tikros ribinės reikšmės, kuri gelžbetonio mechanikoje vadinama subalansuoto irimo riba. Tai galima paaiškinti tuo, jog gniuždymo įtempiai, sukurti apkraunant elementą ašinę apkrovą, eliminuoja tempimo įtempius atsirandančius elementą lenkiant.

Nearmuoti elementai.

Nagrinėjant nearmuotų elementų rezultatus, buvo laikytasi tos pačios analizės principų. Lyginant maksimalius momentus veikiančius elemento skerspjūvyje, skirtingoms geometrijos parametrų kombinacijoms.

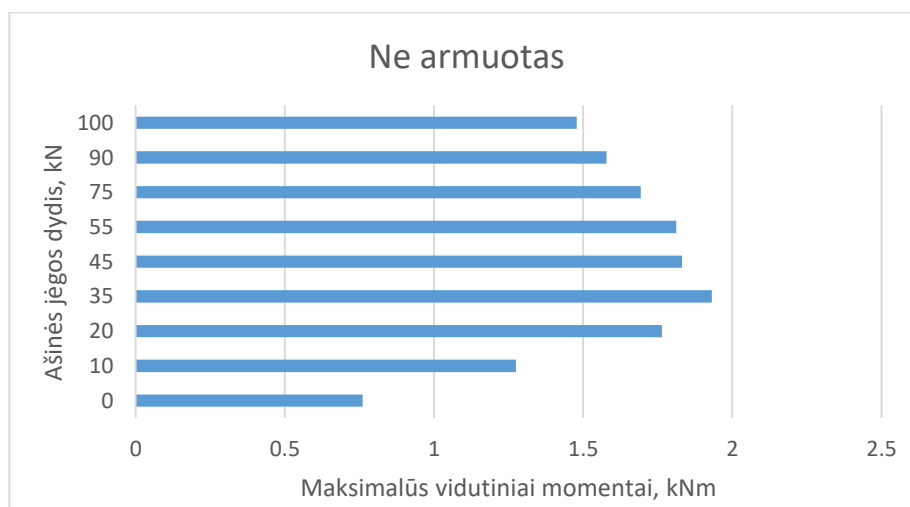
2.5 lentelė. Nearmuoto elemento maksimalių momentų kampo, aikštelės ir priekrovos priklausomybės, veikiant 0 kN ašinei jėgai

	Maksimalūs momentai. Priekrova 0kN. Ne armuotas			
	25°	35°	45°	55°
25mm	0.94853658	0.9445939	0.963829744	0.8360531
50mm	0.97662764	0.82245991	0.78060096	0.6735051
75mm	0.87528545	0.7020996	0.641441025	0.54209243
100mm	0.77963318	0.62215805	0.572764668	0.48772382

Nagrinėjant ne armuotus elementus taip pat pastebėta akivaizdi tendencija, kuri rodo, jog geriausiai išnaudojamos konstrukcijos geometrinės savybės yra tos, kurių parametrai maži pvz.: kampas 25° ir aikštelė 25mm. Tačiau didėjant veikiančiai išankstinei apkrovai, pasikeitė elemente veikiančios įrašos, kas davė kitokį geometrinių parametrų rezultatą 2.5 ir 2.6 lentelės. Tarpiniai rezultatai patiekiami A priede.

2.6 lentelė. Ne armuoto elemento maksimalių momentų kampo, aikštelės ir priekrovos priklausomybės, veikiant 75 kN ašinei jėgai

	Maksimalūs momentai. Priekrova 75kN. Ne armuotas			
	25°	35°	45°	55°
25mm	1.4870558	1.62684034	1.676881492	1.56145388
50mm	1.53326781	2.31024484	1.822873536	1.66207774
75mm	2.58937417	1.87509618	1.424030925	1.15001275
100mm	2.44877967	1.57061818	1.329255127	1.01449762



2.33 pav. Priekrovos ir laikomosios galios priklausomybė nearmuotiems elementams

Apibendrinant gautus rezultatus, sudaryta diagrama vaizduojanti panašią tendenciją kaip ir armuoto varianto, kuriame fiksuojamas subalansuotas irimas. Tiesa, rezultatai gerokai mažesni dėl armavimo nebūvimo. 2.33 pav., teoriškai gaunama subalansuoto irimo riba, veikiant 35kN iš anksto pridėtai ašinei jėgai.

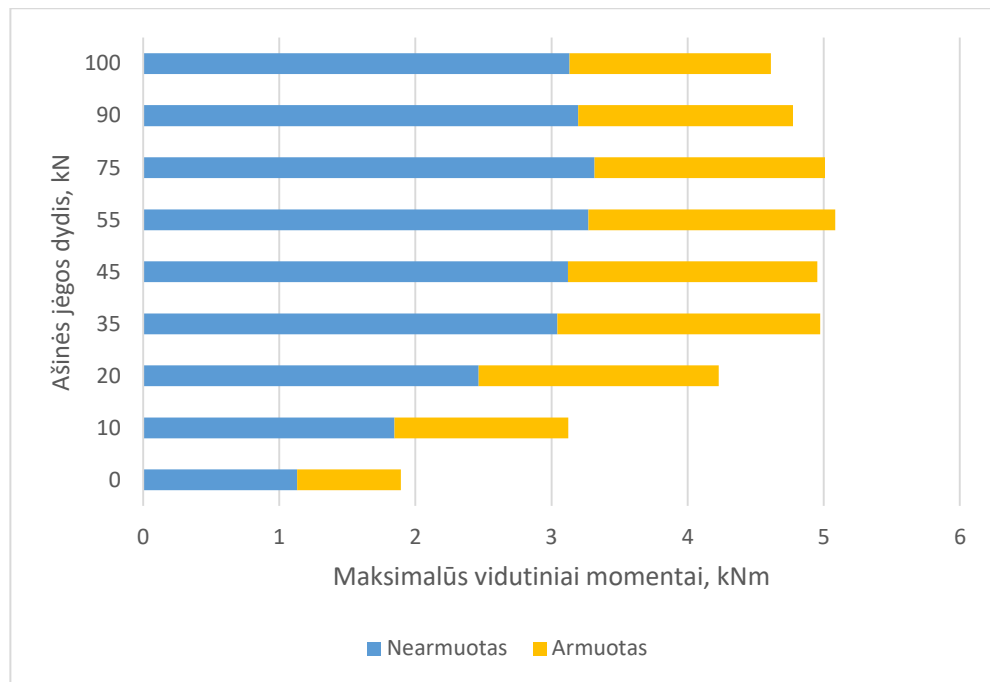
Išvada.

Kaip ir gelžbetoninėms konstrukcijoms, taip ir šiam elementui galioja subalansuotas irimas, kuris šiuo atveju yra teoriškai gaunamas veikiant 75kN armuotam elementui ir 35kN nearmuotam iš anksto pridėtai ašinei jėgai. Šiame taške elemento irimas yra subalansuotas. Tai reiškia jog elemente yra maksimaliai išnaudojama tempiamoji ir gniuždomosios galios (tempiamosios galios ribą apsprendžia veikiantis momentas, o gniuždomąją galią – ašinė jėga).

2.7 lentelė rodo visų galimų geometrijos variantų, maksimalių momentų vidurkius ties skirtinga priekrova, t.y. priede A pateiktų atitinkamų lentelių skaitinių reikšmių aritmetinius vidurkius.

2.7 lentelė. Armuotų ir nearmuotų elementų lyginimas

Priekrova [kN]	Maksimalių momentų vidurkis [kNm]		Momentų padidėjimas
0	1.132090511	0.760587822	67 %
10	1.847723965	1.274885386	69 %
20	2.465304177	1.763658275	72 %
35	3.042957364	1.931496896	63 %
45	3.120604421	1.831287302	59 %
55	3.272452524	1.811685449	55 %
75	3.316619269	1.692647503	51 %
90	3.196594212	1.577695848	49 %
100	3.132183029	1.478390438	47 %



2.34 pav. Priekrovos ir vidutinių momentų priklausomybė

Kalbant apie skaitines vertes, kaip keičiasi laikomoji galia įvedant armavimą, pateikiame 2.7 lentelę ir 2.34 paveikslą. Šiose vizualizacijose akivaizdžiai matoma armavimo nauda. Įvedant armavimą, kurio armavimo procentas vos 0,0628 % galima išgauti vidutiniškai 59 % momento prieaugį.

2.4.4 Racionalių geometrijos parametrų parinkimas

Atlikus visų tiriamų elementų skaičiavimus, buvo padaryta apibendrinimo analizė, kurioje elementai buvo įvertinti konstrukciniu ir ekonominiu požiūriu.

Reikia paminėti tokius faktus: esant mažesnėms apkrovoms 0kN – 45kN konstrukciniu požiūriu geriausias variantas 45 – kampas, 50 – aikštelė, esant didesnėms apkrovoms 45kN – 100kN, geriausias variantas 25 – kampas, 25 – aikštelė. Didėjant apkrovai pastebėta, jog įtempių pasiskirstymas iš labiausiai tempiamos juostos persiskirsto į tempiamą spyrį, ko pasekoje elemento irimas prasideda pleišėjant spyriui, po to juostoms iki galutinio suirimo.

2.8 lentelė. Santykinis plotas 1m elementui

Plotas, 1 metrui, m ²				
	25°	35°	45°	55°
25mm	0.070862113	0.072385009	0.074634169	0.0784
50mm	0.069894532	0.0706347	0.072238769	0.0746
75mm	0.068838586	0.069112978	0.070012075	0.0717
100mm	0.067874305	0.067811238	0.068272039	0.0694

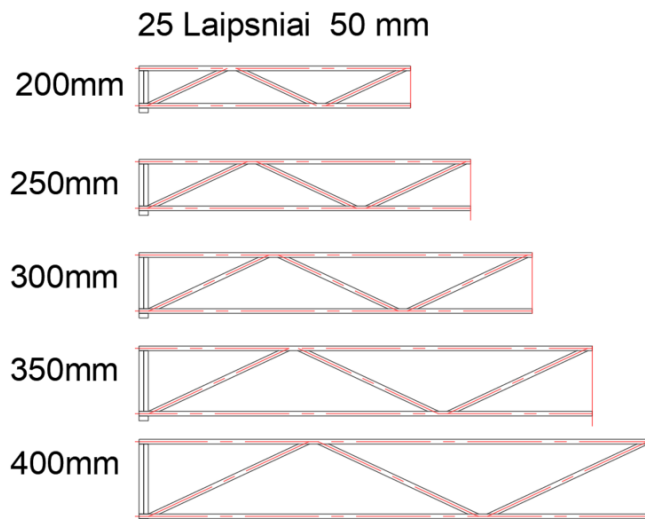
Ekonominis rodiklis buvo priimtas paprasčiausia santykinu dydžiu maksimalaus momento ir elemento ploto santykiu. Kadangi esant mažiausiam elemento plotui bus gaunamas mažiausia elemento masė ir tūris, o pagrindinis ekonominis faktorius nulemiantis betoninių elementų kainą yra tūris arba masė. Esant geriausiam santykiui buvo priimta racionaliausia elemento geometrija, 25° kampas ir 50mm ilgio aikštelė.

2.9 lentelė. Maksimalaus momento ir elemento ploto santykiai

Momentų ir ploto santykis, 75kN - armuotas				
	25°	35°	45°	55°
25mm	55.19153	51.59809	44.32389	29.28535
50mm	62.76902	50.43017	43.43688	40.43414
75mm	57.64523	49.21081	48.45726	27.97715
100mm	57.01261	49.79279	46.61064	36.24138

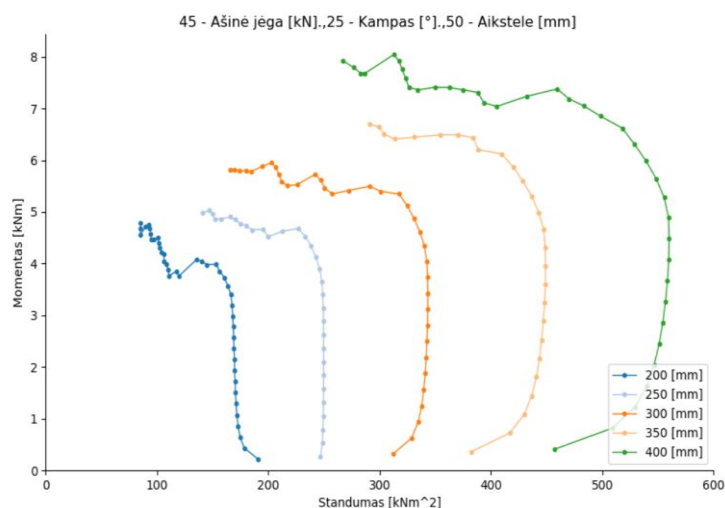
2.4.5 Elemento aukščio poveikis

Išanalizavus nusistatytus parametrus ir parinkus racionalią elemento formą, buvo sukurti papildomi 5 modeliai skirtingo aukščio elementams analizuoti 2.35 pav. Skačiuojamoji schema ir analizės metodika identiška, skyrėsi tik geometrija.



2.35 pav. Aukščio poveikio analizės tiriami geometrijos variantai

Racionali forma pasirinkta atitinkamai pritaikius konstrukcines ir ekonomines prielaidas. Ekonomiškai racionaliausia forma, tai tokia kurios skerspjūvio plotas bus mažiausias, o konstrukciškai – tokia, kurios geometriniai parametrai duoda geriausius atlaikomojo momento rezultatus. Įvedus santykinį dydį (momento ir ploto santykis) buvo gauta racionali forma, kurios parametrai: kampas 25° ir aikštelė 50mm.



2.36 pav. Elemento atlaikomojo momento ir standumo priklausomybės grafikas.

Atlikus skaičiavimus sudarytas grafikas 2.36 , kuriame vaizduojama elemento atlaikomojo momento ir jo aukščio priklausomybė vienas kito atžvilgiu. Paveiksluose pateikti grafikai yra elemento veikiamo 45kN ašinė jėga, tačiau visi skaičiavimai atlikti ta pačia metodika kaip ankstesniuose skyreliuose. Tiesiog pasirinktas grafikas atspindi pasikartojantį dėsningumą per visus apkrovimo atvejus. Tarpiniai variantai pateikti prieduose.

Iš grafikų matyti, jog priklausomybė tarp momento ir aukščio iš dalies yra tiesinė. 2.10 lentelė rodo, jog padidinus skerspjūvio aukštį 25 % ar 50 %, elemento standumas išauga +50 % ir +100 %. Prasčiau tariant, tai tik dar kartą įrodo, kad dėsnis tarp geometrinių dedamųjų, šiuo atveju aukščio, ir mechaninių savybių yra tiesinis:

$$h_{i+1} = h_i + \Delta h_i, \quad (15)$$

$$EI_{i+1} = EI_i + \Delta EI_i, \quad (16)$$

$$k = \frac{\Delta EI_{i+1}}{\Delta EI_i} = \frac{\Delta h_{i+1}}{\Delta h_i}. \quad (17)$$

Čia

Δh_i ir ΔEI_i – aukščio ir standumo i-tieji pokyčiai.

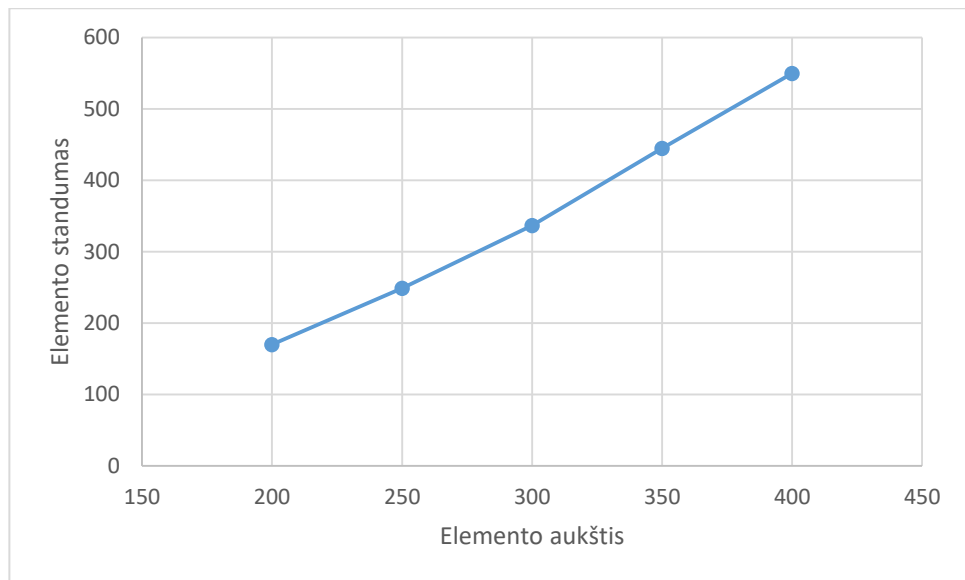
Δh_{i+1} ir ΔEI_{i+1} – aukščio ir standumo paskesni pokyčiai.

k – proporcingumo koeficientas.

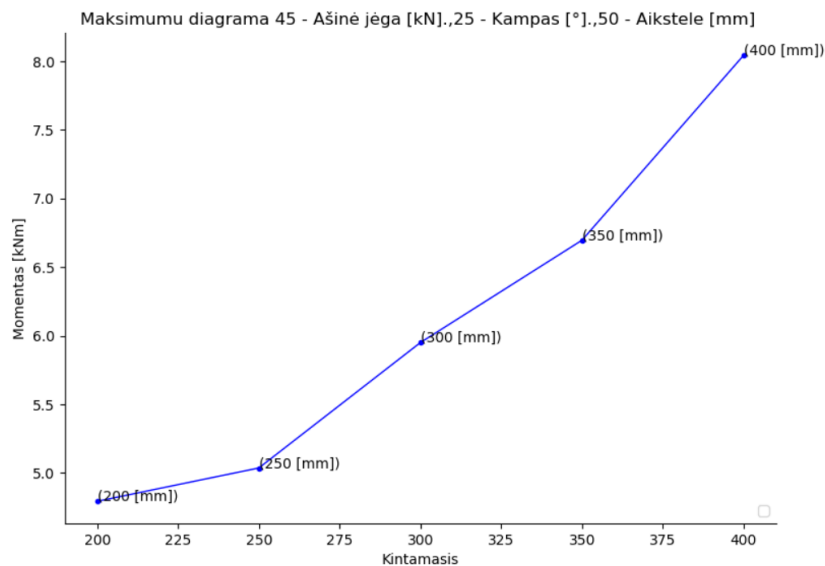
2.10 lentelė. Elemento aukščio ir standumų priklausomybės

Aukštis [mm]	Pradiniai standumai EI, kNm ²	Standumų pokytis %	Aukščio pokytis %	k
200	170	0.00 %	0.00 %	0
250	249	46.47 %	25.00 %	1.86
300	337	98.24 %	50.00 %	1.96
350	445	161.76 %	75.00 %	2.16
400	550	223.53 %	100.00 %	2.24

Reikia paminėti, jog (15 - 17) priklausomybės formuluojamos vien tik 2.10 lentelės ir atliktos 2.4.5 skyriaus analizės pagrindu. Formulės galioja tik pradinei apkrovos stadijai, t.y. tol, kol betonas dirba tampriai.



2.37 pav. Elemento aukščio ir pradinių standumų priklausomybės diagrama



2.38 pav. Tipinė elemento atlaikomųjų momentų maksimumų ir elemento aukščio priklausomybė

Priimant, jog egzistuoja (15 - 17) priklausomybės, negalime atmesti ir to, jog šios tiesinės lygtys galėtų net ir elementui pleišėjant, ką patvirtintų suaprosimuota 2.38 diagrama, kadangi grafikas rodo maksimalių momentų (kurie pasiekiami elementui yrant, pleišėjant) ir aukščių priklausomybę. Tiesa, 2.38 grafiko taškai ties 200mm ir 400mm negula į vieną tiesę kaip 250–350mm, tačiau remiantis priede D pateiktais duomenimis 15 - 17 priklausomybės yra patvirtinamos.

IŠVADOS IR PASIŪLYMAI

1. Išanalizavus literatūrą nustatyta, jog 3D spausdinimo technologija sparčiai braunasi į rinką ir reikalauja detalesnės analizės geometriniams parametrams. Literatūroje niekas nekalba apie santvaros tipo 3D spausdinamų elementų geometrinių parametrų poveikį elemento elgsenai.
2. Skaitiškai įvertinti aikštelės ilgio w , spyrio posvyrio kampo α bei elemento aukščio h , poveikiai galutinei elemento elgsenai. Nustatyta, jog didžiausią poveikį elemento elgsenai daro aukščio kitimas: padidinus kampą, standumas sumažėja 25,50 %; padidinus aikštelę, standumas sumažėja 6,65 %; padidinus aukštį standumas išauga 224 %.
3. Įvertintas armatūros poveikis konstrukcijai. Įvedus armavimą, kurio procentas vos 0,0628 % gauta vidutiniškai 59 % atlaikomojo momento prieaugio.
4. Pastebėta, jog egzistuoja tiesinis ryšys tarp pradinio elemento standumo bei tiriamų geometrinių parametrų. Kaip ir gelžbetoninėms konstrukcijoms, taip ir šiam elementui galioja subalansuotas irimas.
5. Nustatyta tiriamos konstrukcijos racionalūs geometriniai parametrai – spyrio posvyrio kampas $\alpha = 25^\circ$, ir aikštelės ilgis $w = 50mm$.
6. Mūsų atlikta analizė buvo atlikta remiantis rezultatais, gautais sprendžiant 2D plokštuminio įtempių būvio uždavinius. Būtų racionalu ir praktiška atlikti erdvinio kūno įtempių analizę taikant skaitinį modeliavimą.
7. Darbe trumpai aptarti esminiai, didžiausią poveikį elemento elgsenai darantys geometriniai ir mechaniniai parametrai, tačiau ne visus juos praktiškai patikrinome ir analizavome. Tolimesniuose darbuose reikėtų išsamiau nagrinėti spausdinamos medžiagos (mūsų atveju, skiedinio) elgseną pradinėje stadijoje. Įvertinti sukibties poveikį eksploatacinėje elemento stadijoje.

LITERATŪRA IR ŠALTINIAI

- „WinSun“. (2019). En:Product. Prieiga per internetą: <http://www.winsun3d.com/En/Product/>
- „World's First 3D-printed Bridge“ (2017). Prieiga per internetą: <https://digitalconstruction.witteveenbos.com/projects/worlds-first-3d-printed-bridge/>
- Asprone, D., Menna, C et al. (2018). Rethinking reinforcement for digital fabrication with concrete. *Cement and Concrete Research*, 111-121. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.05.020>.
- Barauskas, B., Balevičius, R., Kačinauskas, R. (2004). *Baigtinių elementų metodo pagrindai: vadovėlis*. Vilnius: Technika.
- Bester, F. (2018). Benchmark structures for 3D printing.
- „123rf“, (2019). Prieiga per internetą: https://www.123rf.com/photo_54613151_man-with-concrete-vibrator-for-compacting-concrete.html.
- Bos, F. et al. (2016). Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing, *Virtual and Physical Prototyping*. Taylor & Francis, 11(3), pp. 209–225. Prieiga per internetą: <http://dx.doi.org/10.1080/17452759.2016.1209867>
- Bos, F., Ahmed, Z., Jutinov, E., Salet, T. (2017). Experimental exploration of metal cable as reinforcement in 3D printed concrete. *Materials (Basel)* 10, 1314. Prieiga per internetą: <http://dx.doi.org/10.3390/ma10111314>.
- Bos, F.P., Bosco, E., Salet, T.A.M. (2018) Ductility of 3D printed concrete reinforced with short straight steel fibers. *Virtual and Physical Prototyping*, 160-174. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1080/17452759.2018.1548069>.
- C. Gosselin, R. Duballet, P. Roux, N. Gaudillière, J. Dirrenberger, P. Morel. (2016). Largescale 3D printing of ultra-high performance concrete - a new processing route for architects and builders, *Mater.* 102–109.
- Cesaretti, G., et al., (2014). Building components for an outpost on the Lunar soil by means of a novel 3D printing technology. *Acta Astronautica*, 93, 430–450. Prieiga per internetą: <http://dx.doi.org/10.1016/j.actaastro.2013.07.034>.
- DFAB HOUSE, 2018. Prieiga per internetą: <http://dfabhouse.ch/dfab-house/>.
- Feng, P., Meng, X., Chen, J. F., Ye, L. (2015). Mechanical properties of structures 3D printed with cementitious powders. *Construction and Building Materials*, 93, 486–497.
- Flatt, R., Bowen, J., Yodel, P. (2016). A Yield Stress Model for Suspensions. *J Am Ceram Soc* 89, 1244-1256. Prieiga per internetą: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1551-2916.2005.00888.x>.

- Gaynor, T. A., Guest, K. J., Moen, D. C. (2013). Reinforced Concrete Force Visualization and Design Using Bilinear Truss - Continuum Topology Optimization. *JOURNAL OF STRUCTURAL ENGINEERING* © ASCE, p.607-618.
- Gelardi, G., Flatt, R. J. (2016) 11 - Working mechanisms of water reducers and superplasticizers. *Sci. Technol. Concr. Admix. Woodhead Publishing*, 257-278. Prieiga per internetą: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-100693-1.00011-4>.
- Kazemian, A., Yuan, X., Cochran, E., Khoshnevis, B. (2017). Cementitious materials for construction – scale 3D printing: Laboratory testing of fresh printing mixture. *Construction and Building Materials*, Prieiga per internetą: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.015>
- Le, T. T. et al. (2012). Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 45(8), 1221–1232. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9828-z>.
- Lloret-Fritsch, E. (2016). Smart Dynamic Casting – A Digital Fabrication Method for Nonsynchronous Concrete Structures, Doctoral Thesis, ETH Zurich. Prieiga per internetą: <http://dx.doi.org/10.3929/ethz-a-010782581>.
- Mörsch, E. (1909). Concrete-steel construction, E. P. Goodrich, translator, McGraw-Hill, New York.
- Nerella, V. N., Krause, M., Näther, M., Mechtcherine, V. (2016) Studying printability of fresh concrete for formwork free Concrete onsite 3D Printing technology (CONPrint3D). *Proceeding for the 25th Conference on Rheology of Building Materials, Regensburg, Germany*.
- Patrick P., Wangler T., Falcon J. M., Flatt R. J., Kaufmann W. (2018). “Potentials of Steel Fibres for Mesh Mould Elements.” Edited by Timothy Wangler and Robert J Flatt. *1st RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication, Digital Concrete 2018, Zurich, Switzerland, September 10-12, 2018*. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000297641>.
- Paul, S. C et al. (2017). Fresh and hardened properties of 3D printable cementitious materials for building and construction. *Singapore Centre for 3D Printing, School of Mechanical & Aerospace Engineering, Nanyang Technological University*. Prieiga per internetą: <http://dx.doi.org/10.1016/j.acme.2017.02.008>.
- Paul, S. C. et al. (2018). A review of 3D concrete printing systems and materials properties: current status and future research prospects. *Rapid Prototyping Journal*, 0. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1108/RPJ-09-2016-0154>.
- Perrot, A et al. (2012). Yield stress and bleeding of fresh cement pastes. *Cem Concr Res* (2012) 42, 937-944. Prieiga per internetą: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.03.015>.

- Ritter, W. (1899). "Die Bauweise Hennebique." *Schweizerische Bauzeitung*, 33(7), 59–61.
- Roussel, N. (2018). Rheological requirements for printable concretes. *Cement and Concrete Research. Elsevier*, (January), 1–10. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.04.005>.
- Roussel, N., Cussigh, F. (2008). Distinct-layer casting of SCC: The mechanical consequences of thixotropy. *Cem Concr Res* 38, 624-632. Prieiga per internetą: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.09.023>
- Sagatauskas, A. (2018). Pramonės robotizacija: ar darbuotojai Lietuvoje tam pasiruošę? Prieiga per internetą: <https://www.alfa.lt/straipsnis/50346910/pramones-robotizacija-ar-darbuotojai-lietuvoje-tam-pasiruose>.
- Schlaich, J., Schaefer, K., and Jennewein, M. (1987). "Toward a consistent design of structural concrete." *PCI J.*, 32(3), 74–150.
- Schowalter, W. R., Christensen, G. (1998). Toward a rationalization of the slump test for fresh concrete: Comparisons of calculations and experiments.
- Schuteer, G., D., Lesage, K., Mechtcherine, V., Nerella, V., N., Habert, G., Augusti-Juan, I. (2018). Vision of 3D printing with concrete — Technical, economic and environmental potentials. *Cement and Concrete Research*, 112, 25-36. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.06.001>.
- STR 2.05.05:2005 BETONINIŲ IR GELŽBETONINIŲ KONSTRUKCIJŲ PROJEKTAVIMAS. Vilnius, 2005.
- Wangler, T. et al. (2016). Digital Concrete: Opportunities and Challenges. *RILEM Technical Letters*, 67-75. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2016.16>.
- Williams, C., Deschenes, D., Bayrak, O. (2012). Strut and Tie Model Design Examples for Bridges: Final Report. *Texas Department of Transportation*, 276. ID no.: 5-5253-01.
- Wolfs, R. J. M. Bos, F. P. and Salet, T. A. M. (2018). Early age mechanical behaviour of 3D printed concrete: Numerical modelling and experimental testing. *Cement and Concrete Research. Elsevier*, 106, 103–116. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.02.001>.
- Wolfs, R.J.M., Salet, T.A.M., and Hendriks, L.N. (2015). 3D printing of sustainable concrete structures. *Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2015*, Amsterdam.
- XtreeE, Lisa Ricciotti. (2017). Post in Aix-en-Provence. Prieiga per internetą: <http://www.xtreee.eu/post-in-aixen-provence>.

Zareiyan, B., Khoshnevis, B. (2017). Effects of interlocking on interlayer adhesion and strenght of strcutures in 3D printing concrete. *Automation in Construction*, 212-221. Prieiga per internetą: <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2017.08.019>.

Zavalis, R. (2013). *Stress state analysis of calcium silicate hollow block masonry under compression*. Vilnius: Technika.

PRIEDAI

A priedas. Maksimalių elemento atlaikomųjų momentų diagramos.

Pateikiami skirtingų elementų matricos [kampai, aikštelės], maksimalių atlaikomųjų momentų pasiskirstymai, esant skirtingiems apkrovimams ir armavimui.

NE ARMUOTI

	Maksimalūs momentai. Priekrova 0kN. Ne armuotas			
	25°	35°	45°	55°
25mm	0.948536576	0.944593903	0.963829744	0.836053102
50mm	0.976627639	0.822459908	0.78060096	0.673505104
75mm	0.875285451	0.702099596	0.641441025	0.542092433
100mm	0.77963318	0.622158047	0.572764668	0.48772382

	Maksimalūs momentai. Priekrova 10kN. Ne armuotas			
	25°	35°	45°	55°
25mm	1.701887664	1.645477847	1.517304178	1.319563877
50mm	1.661890259	1.387755893	1.23548256	1.061039559
75mm	1.527739599	1.213090229	1.035712462	0.887171145
100mm	1.363976156	1.086501849	0.967598011	0.78597489

	Maksimalūs momentai. Priekrova 35kN. Ne armuotas			
	25°	35°	45°	55°
25mm	2.20269757	2.43664548	2.159715786	1.65186976
50mm	2.70190423	2.40600044	1.61298432	1.67906057
75mm	2.6391116	1.65080469	1.332774075	1.69503481
100mm	2.29251397	1.46261375	1.511067889	1.46915142

	Maksimalūs momentai. Priekrova 45kN. Ne armuotas			
	25°	35°	45°	55°
25mm	1.78166098	2.09762753	1.5405	1.68914065
50mm	2.6776358	2.37987475	2.0814647	1.71795748
75mm	2.58129378	1.75348531	1.28028169	1.31599274
100mm	2.23936525	1.56176919	1.34142799	1.26111899

	Maksimalūs momentai. Priekrova 55kN. Ne armuotas			
	25°	35°	45°	55°
25mm	1.6121319	1.89800731	2.32798871	1.781608754
50mm	2.4849556	2.32431772	2.02031424	1.34942237
75mm	2.5138904	1.76659527	1.32101921	1.274579915
100mm	2.3558554	1.58062853	1.16481174	1.2108402

	Maksimalūs momentai. Priekrova 75kN. Ne armuotas			
	25°	35°	45°	55°
25mm	1.4870558	1.62684034	1.676881492	1.56145388
50mm	1.53326781	2.31024484	1.822873536	1.66207774
75mm	2.58937417	1.87509618	1.424030925	1.15001275
100mm	2.44877967	1.57061818	1.329255127	1.01449762

	Maksimalūs momentai. Priekrova 90kN. Ne armuotas			
	25°	35°	45°	55°
25mm	1.34556492	1.4295394	1.37892466	1.25236292
50mm	1.50764447	2.0234654	1.81046304	1.50170844
75mm	2.15568174	1.92744804	1.44735769	1.15913837
100mm	2.32456508	1.6360416	1.34572652	0.99750128

	Maksimalūs momentai. Priekrova 100kN. Ne armuotas			
	25°	35°	45°	55°
25mm	1.2243246	1.31170774	1.29654539	1.061974987
50mm	1.4471195	1.60593619	1.8607657	1.399891144
75mm	1.5881495	1.93307158	1.4417649	1.18137719
100mm	2.5763752	1.59976012	1.2088023	0.91668101

ARMUOTI

	Maksimalūs momentai. Priekrova 0kN. Armuotas			
	25°	35°	45°	55°
25mm	1.17363655	1.17738579	1.223068164	1.21882417
50mm	1.17973511	1.16250999	1.314099648	1.20376765
75mm	1.17877311	1.13675656	1.068170775	0.93524235
100mm	1.07701101	1.12330286	1.028861205	0.91230324

Maksimalus momentai 10kN - armuotas				
	25°	35°	45°	55°
25mm	2.01347894	1.98486036	2.0012656	1.887975
50mm	2.03817406	2.02335488	2.07611194	1.79176978
75mm	1.97437955	1.85681594	1.87249369	1.27948775
100mm	1.9368309	1.76292679	1.62013297	1.44352528

Maksimalus momentai 20kN - armuotas				
	25°	35°	45°	55°
25mm	2.77598	2.79357	2.83421	2.62962
50mm	2.78839	2.49615	2.56698	2.19938
75mm	2.68952	2.49083	2.49669	2.066
100mm	2.41886	2.41079	1.90434	1.88356

Maksimalus momentai 35kN - armuotas				
	25°	35°	45°	55°
25mm	3.48251906	3.59721238	3.219394412	2.62987819
50mm	3.40843552	3.61689134	3.329146368	2.69965892
75mm	3.60648535	3.11723305	2.54578995	1.94506275
100mm	3.23299089	3.13565185	2.674865285	2.44610253

Maksimalus momentai 45kN - armuotas				
	25°	35°	45°	55°
25mm	3.36672362	3.33942027	3.55966621	2.643165
50mm	3.54994975	3.43250253	3.32632051	2.91220852
75mm	3.44117682	3.52321777	2.88779723	1.93154345
100mm	3.46834102	3.3091761	2.73290388	2.50555804

Maksimalus momentai 55kN - armuotas				
	25°	35°	45°	55°
25mm	4.27753	3.69976	3.61224	2.64316
50mm	4.16969	3.34252	3.19675	2.98541
75mm	3.61723	3.48961	3.17451	1.74613
100mm	3.64211	3.31627	2.69915	2.74717

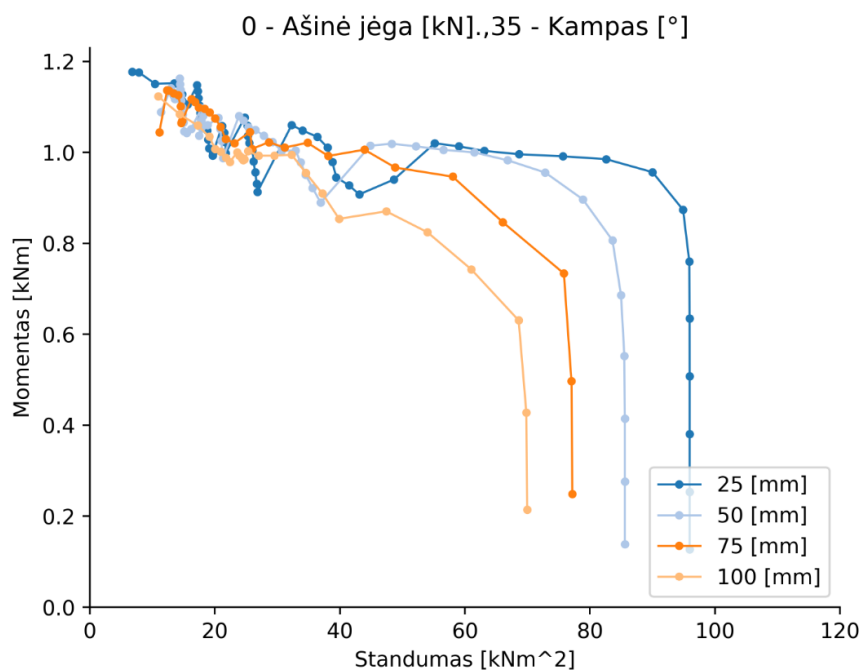
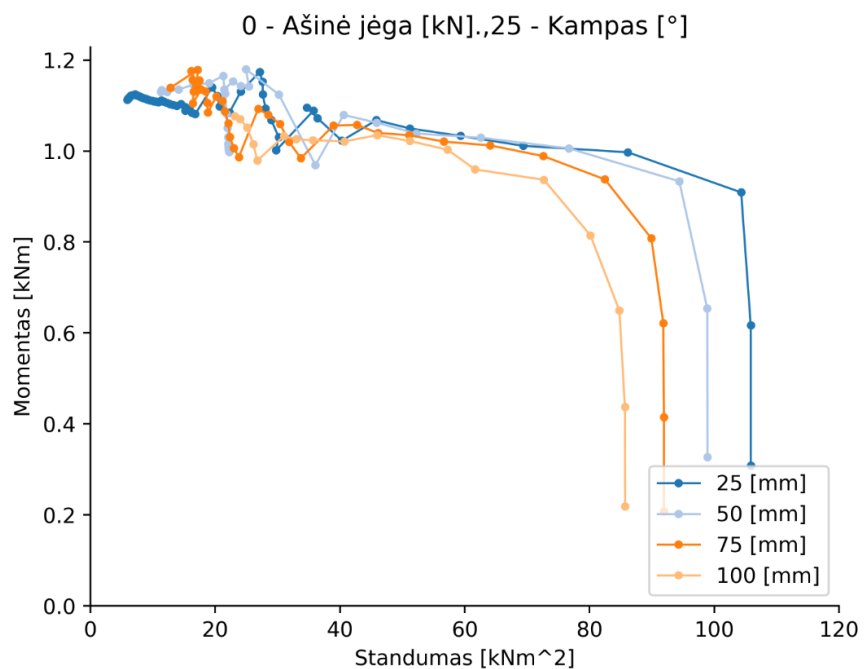
Maksimalus momentai 75kN - armuotas				
	25°	35°	45°	55°
25mm	3.9109888	3.73492828	3.308076889	2.29673933
50mm	4.38721161	3.56212023	3.137826816	3.01664042
75mm	3.96821611	3.40110548	3.392593313	2.00571944
100mm	3.86969142	3.37651072	3.18220352	2.51533593

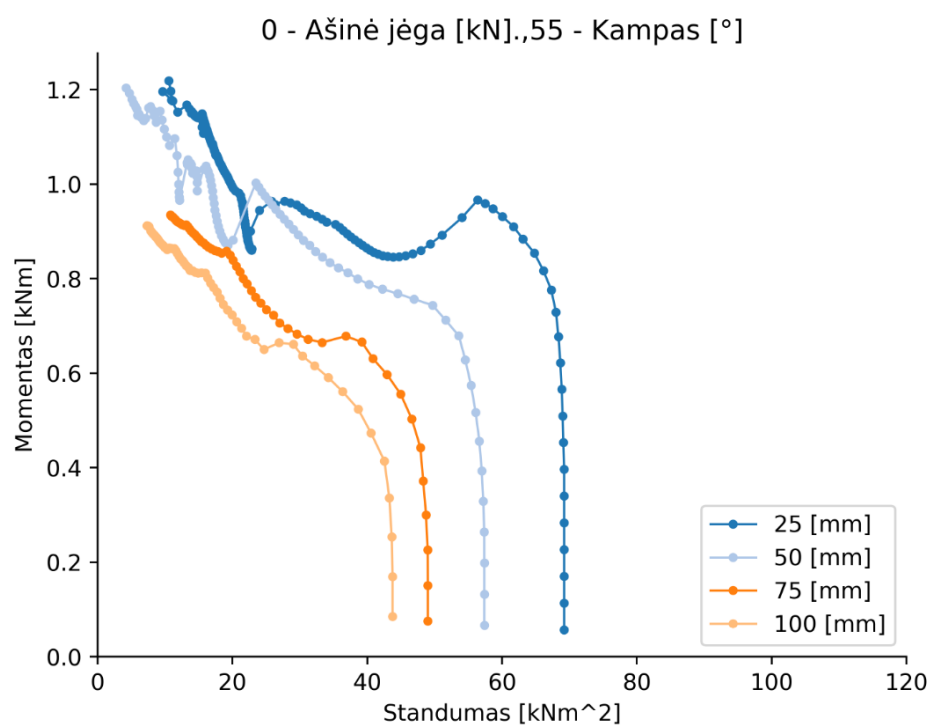
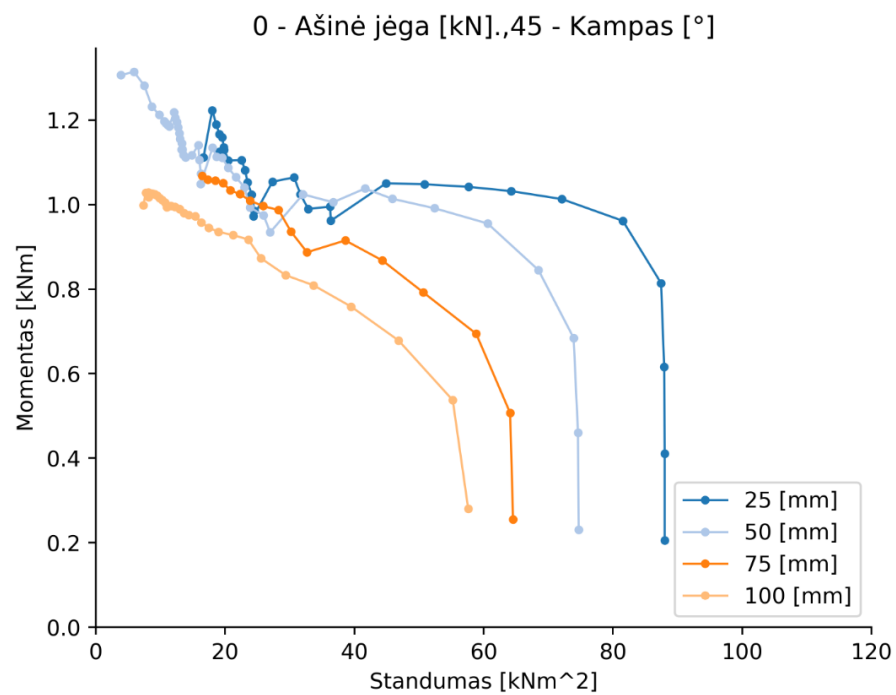
Maksimalus momentai 90kN - armuotas				
	25°	35°	45°	55°
25mm	3.94016243	3.48450727	2.68309193	2.13486171
50mm	3.76510314	3.97260456	3.0455879	2.61557612
75mm	4.29215311	3.57785591	2.82520493	1.62803739
100mm	3.47264805	3.70668519	3.24448597	2.7569418

Maksimalus momentai 100kN - armuotas				
	25°	35°	45°	55°
25mm	4.22568	3.22284	2.48379	3.02076
50mm	3.61976	3.70819	3.60021	2.19555
75mm	4.10572	2.87025	2.97776	1.60941
100mm	3.71106	3.37045	3.14233	2.25116

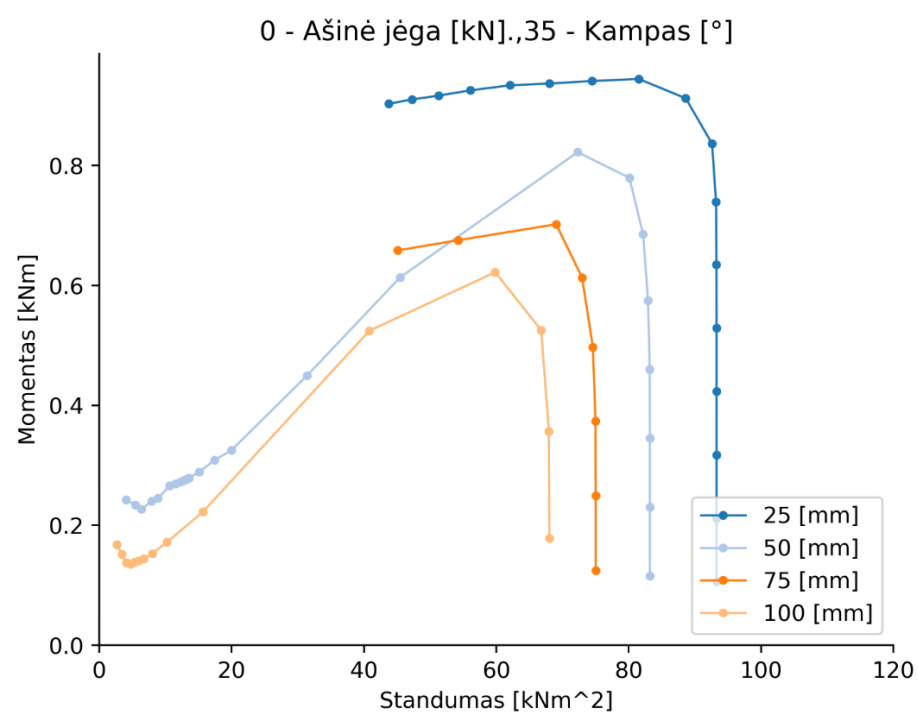
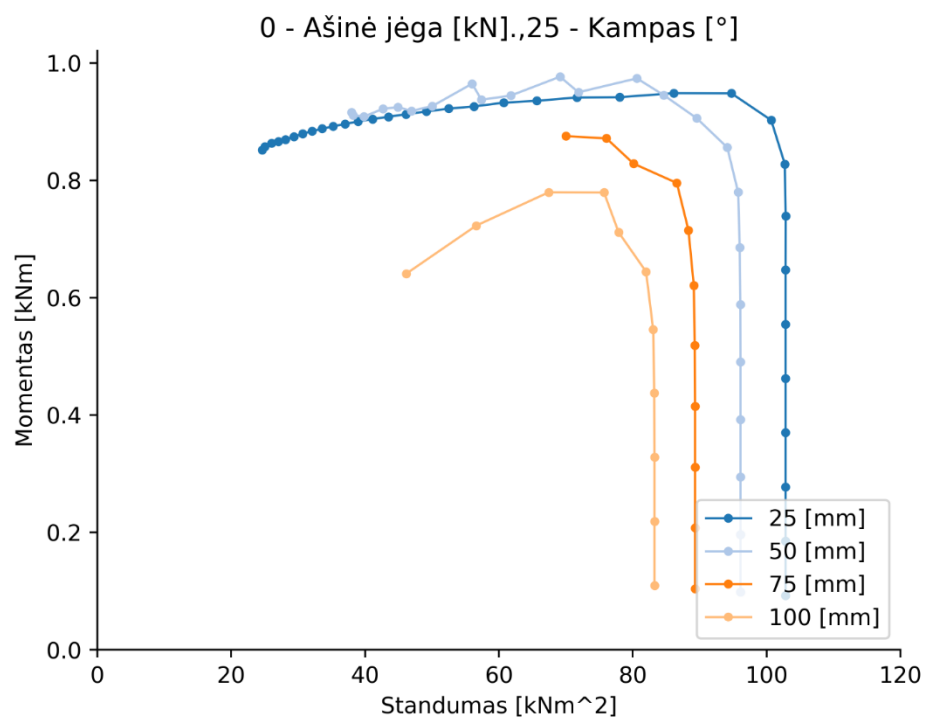
B priedas. Elementų standumų ir momentų priklausomybės.

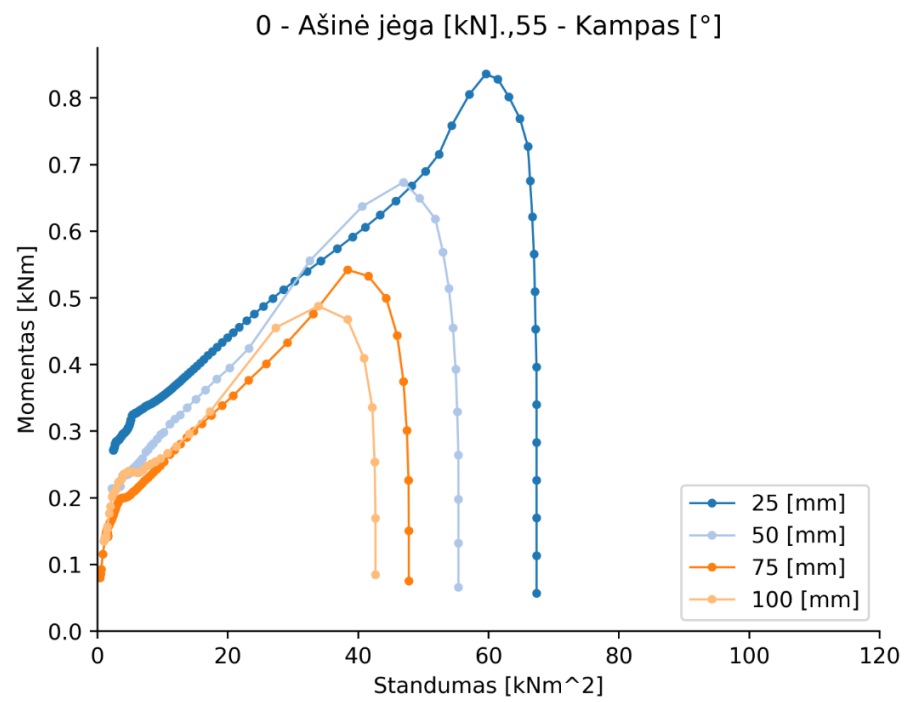
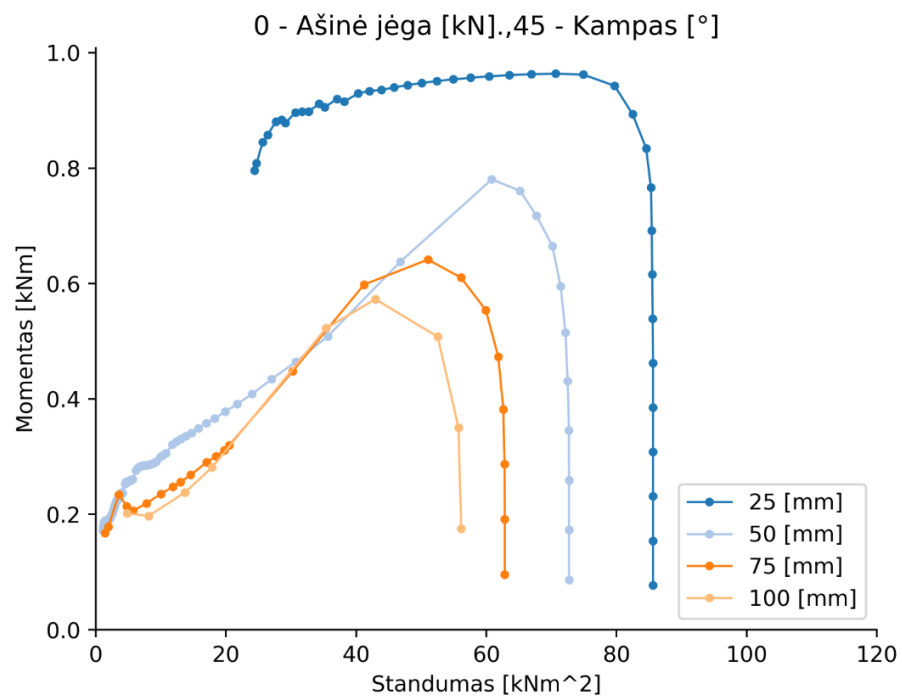
Pastovaus kampo armuoti elementai.



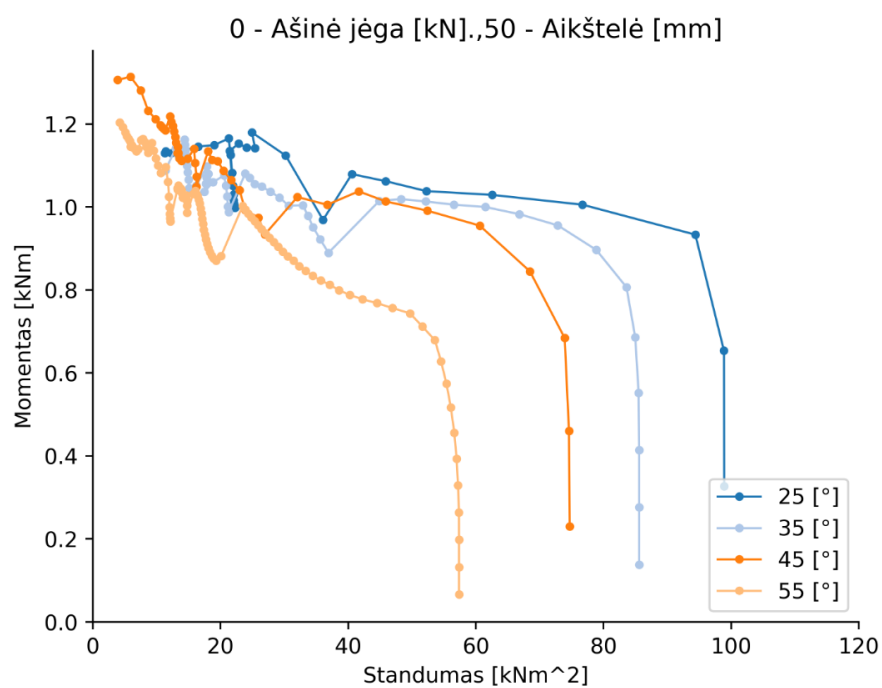
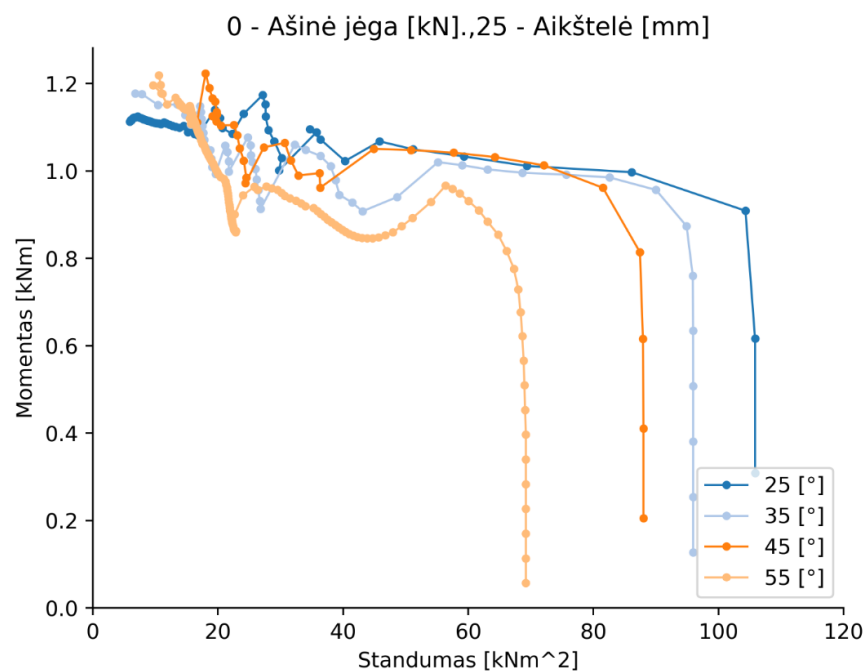


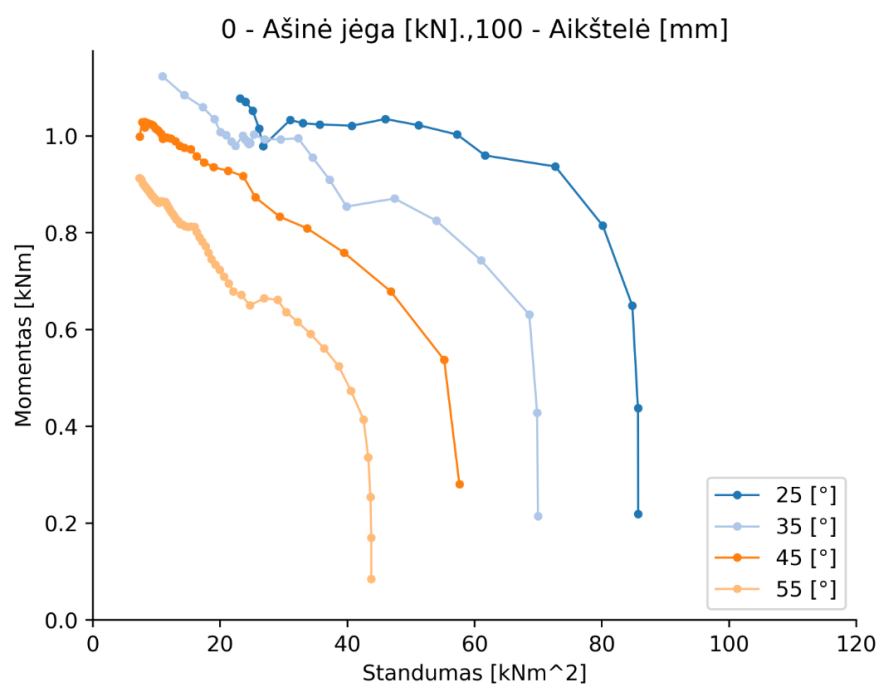
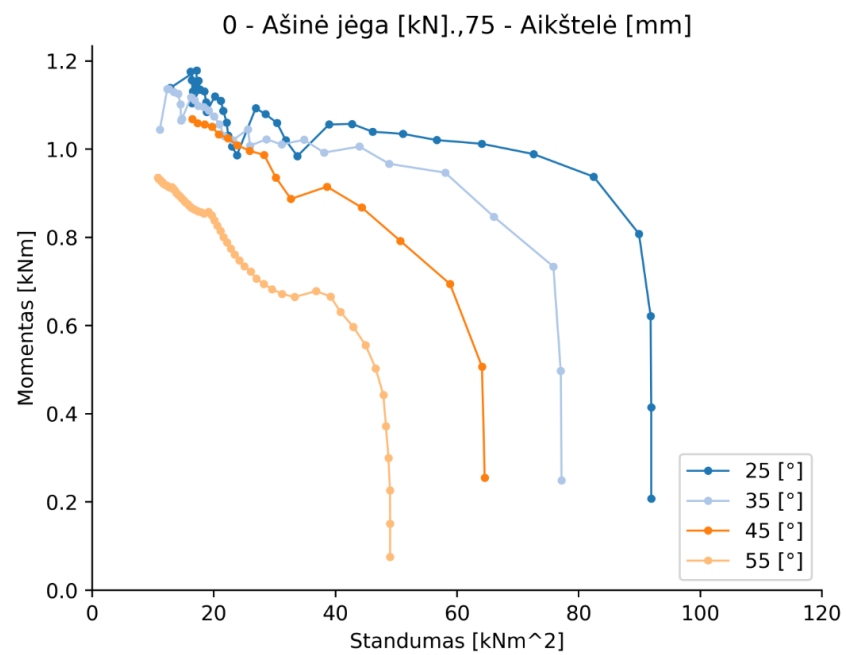
Pastovaus kampo ne armuoti elementai.



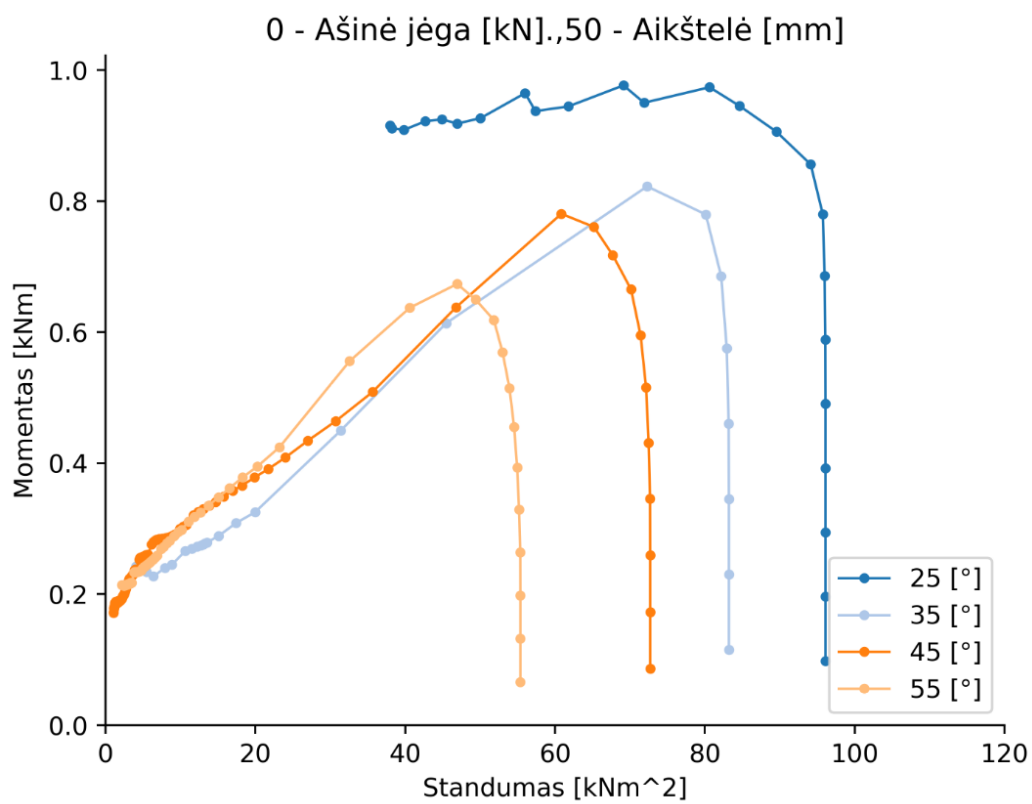
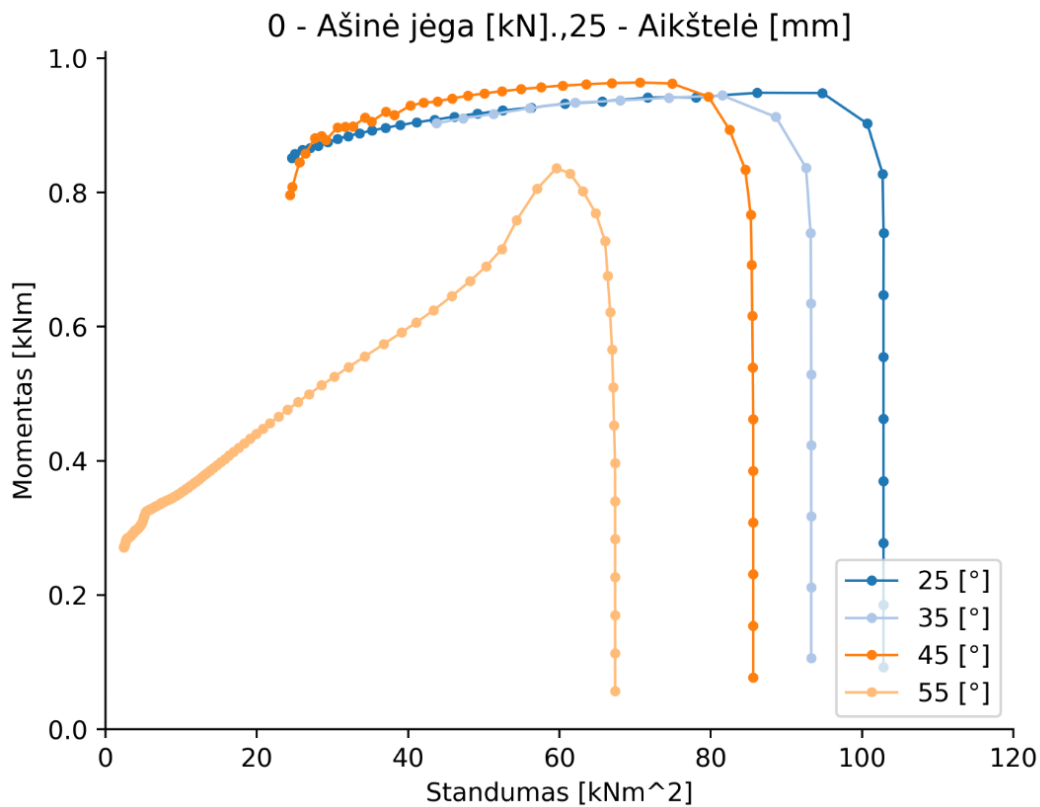


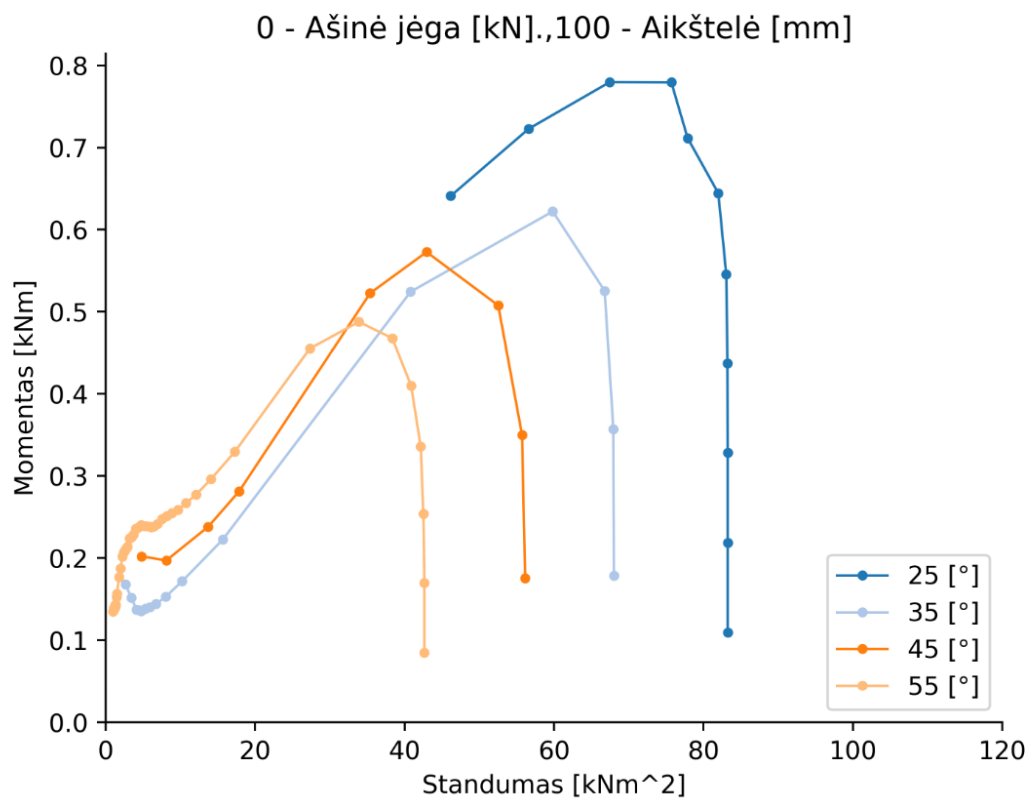
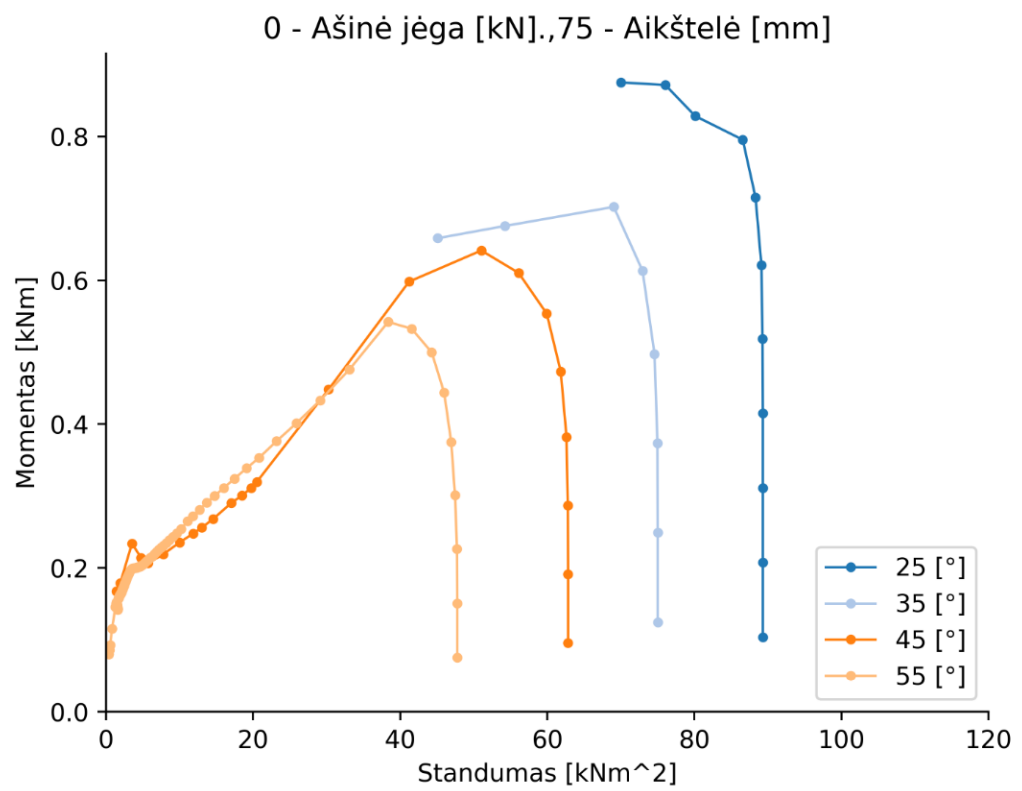
Pastovios aikštelė armuoti elementai.



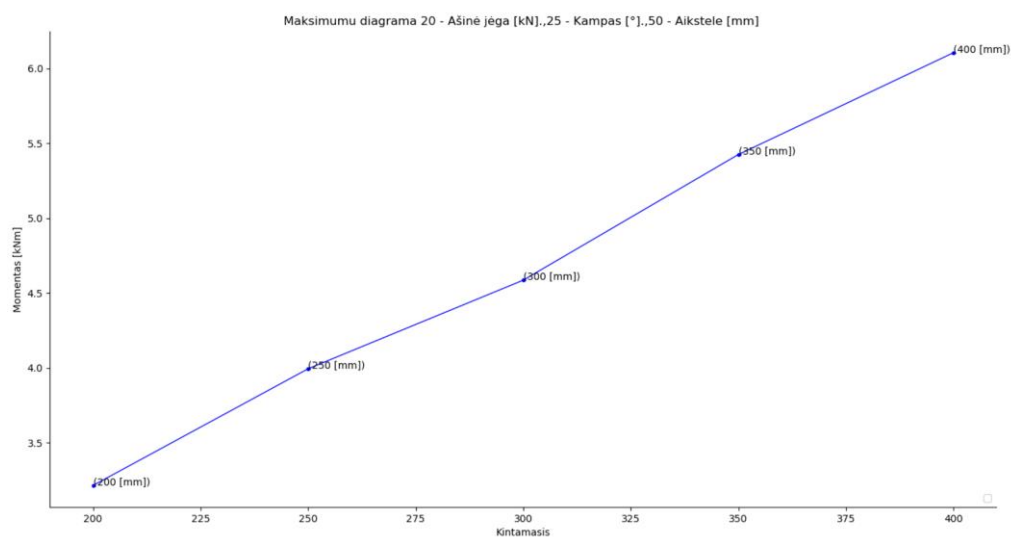
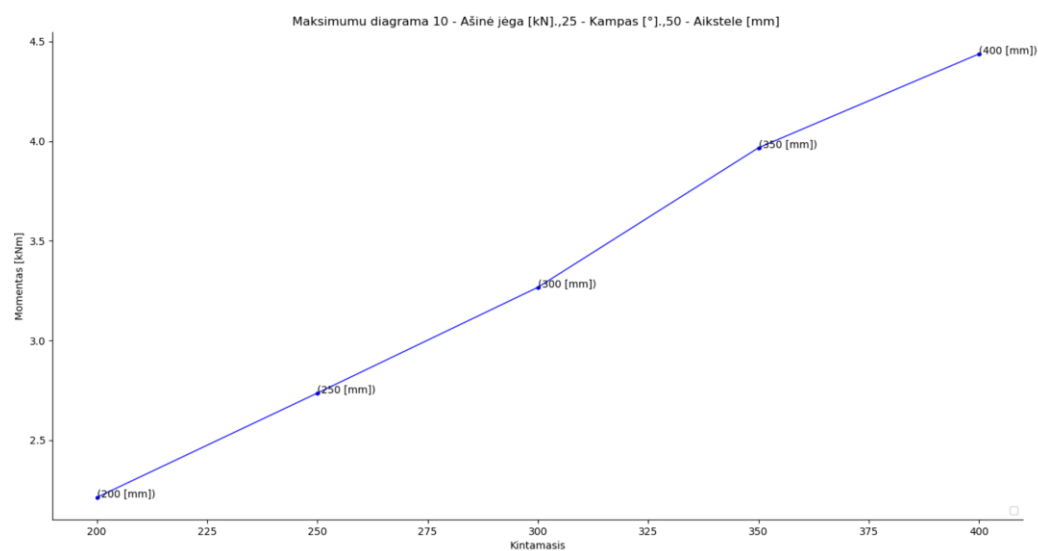
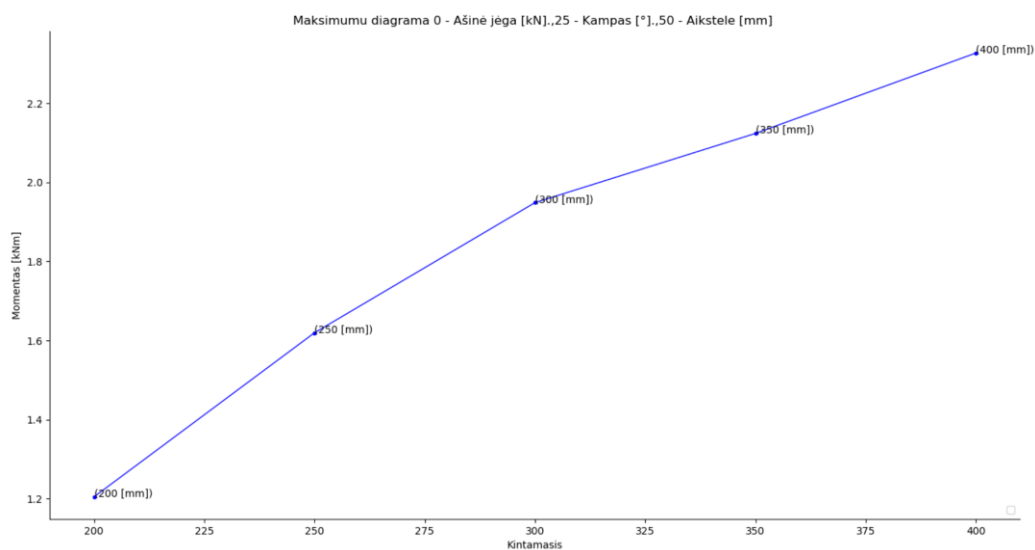


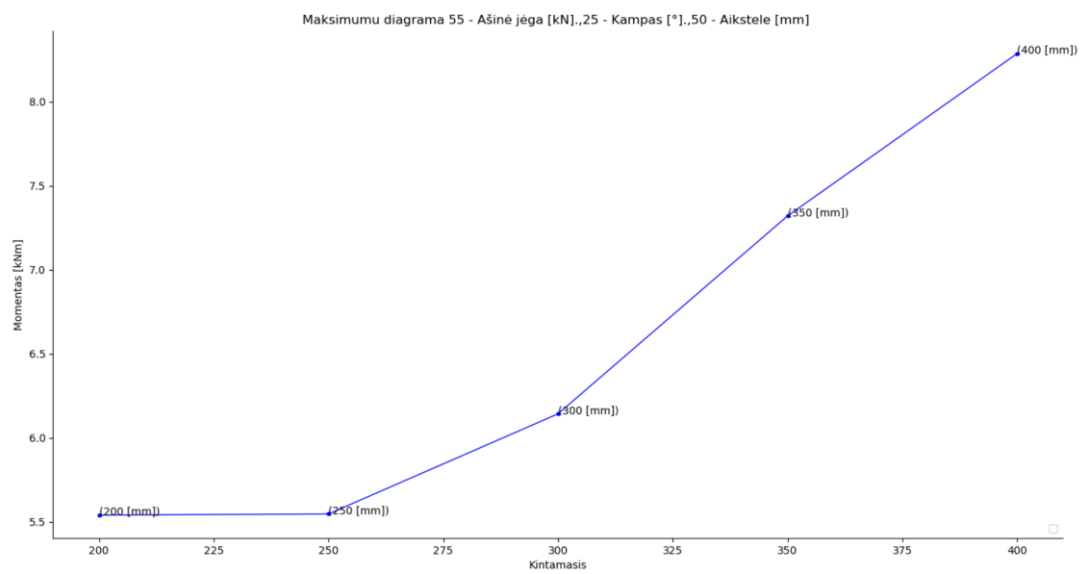
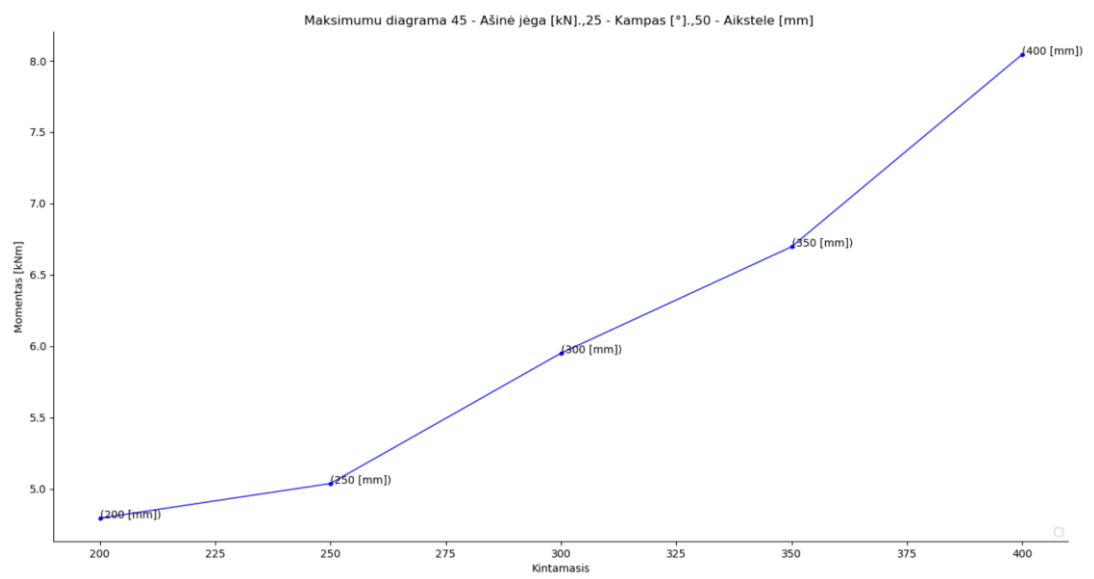
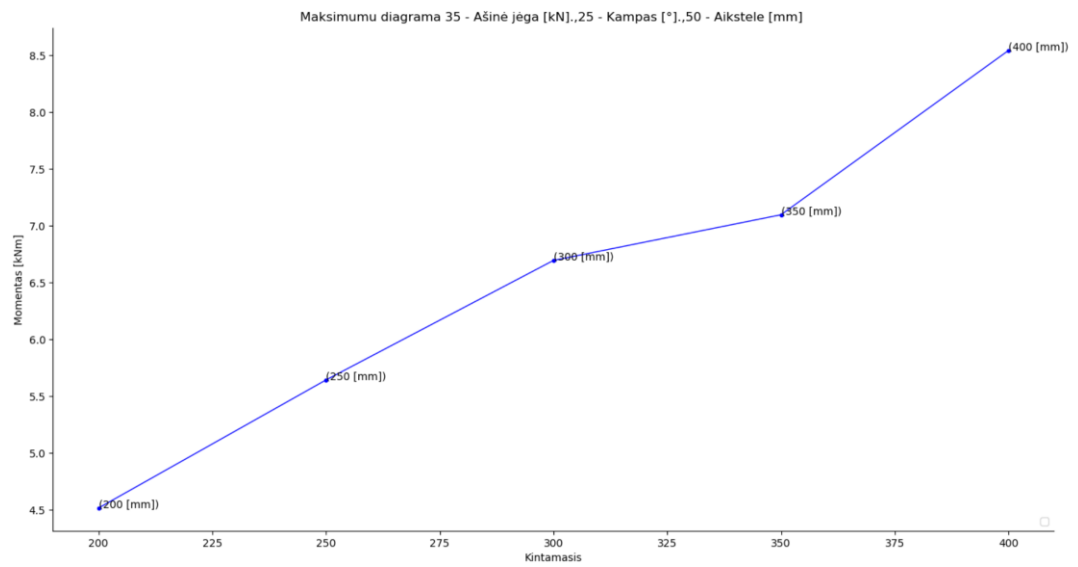
Pastovios aikštelės ne armuoti elementai.

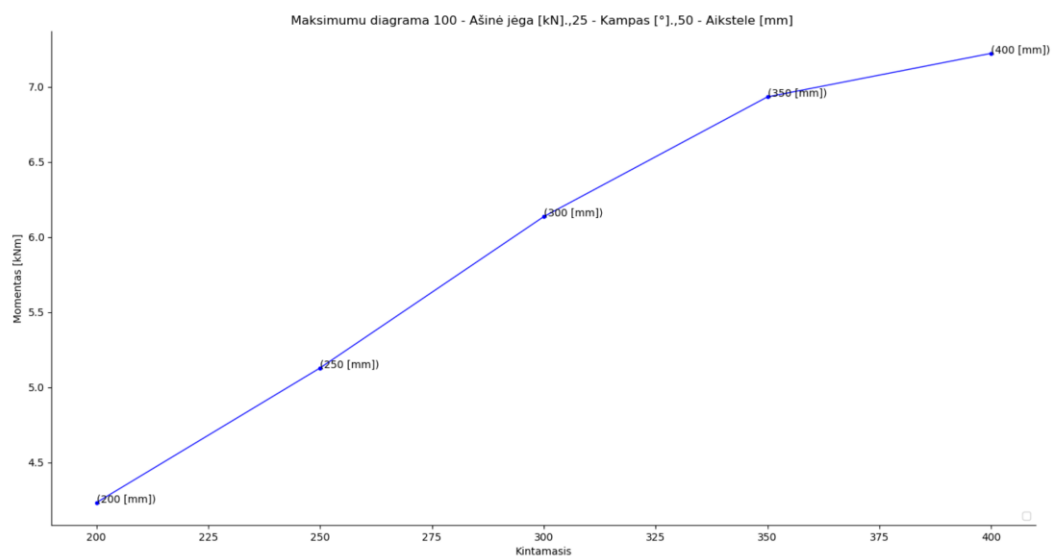
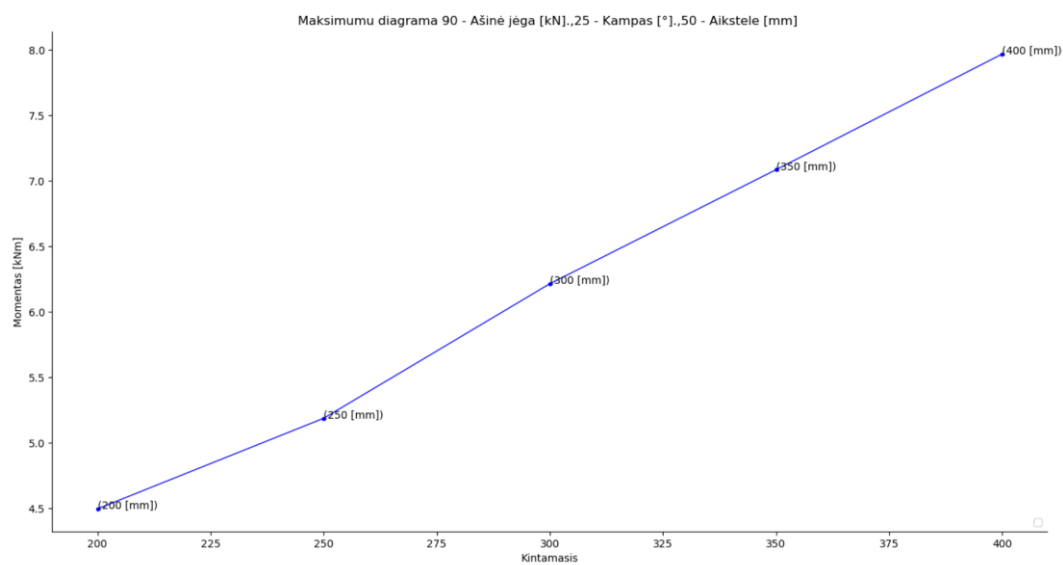
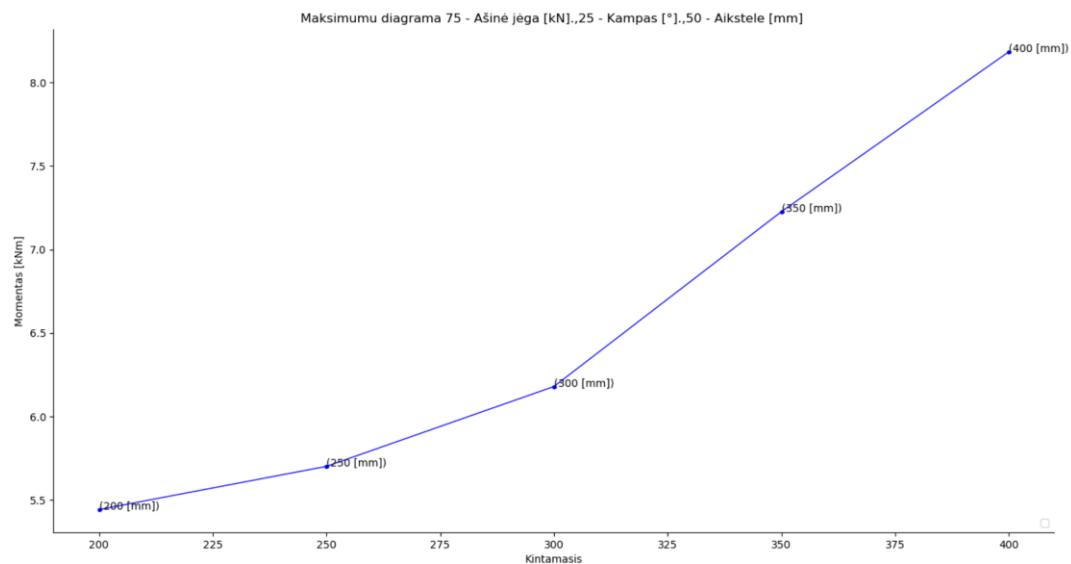




C priedas. Elementų maksimalių momentų ir aukščio priklausomybės







D priedas. Duomenų analizės kodas, „Python“ programavimo kalbai.

```
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np

class graphs:
    def __init__(self, alfa, w, N, R):
        # Spyrio posvyrio kampas
        self.alfa = alfa
        # Atstumas tarp spyrių, jungties vietoje
        self.w = w
        # Ašinė jėga
        self.N = N
        # Armavimas
        self.R = R
        # Momentai
        self.M = []
        # Poslinkiai ( atitinka ilinkius )
        self.I = []
        # Elementu ilgiai {'Kampas_aikstele' : ilgis}
        self.length = {
            '55_25': 0.377595, '55_50': 0.440095, '55_75': 0.50295, '55_100': 0.565,
            '45_25': 0.5135, '45_50': 0.576, '45_75': 0.6375, '45_100': 0.701,
            '35_25': 0.705165, '35_50': 0.7675, '35_75': 0.830, '35_100': 0.8926,
            '25_25': 1.02753, '25_50': 1.09, '25_75': 1.15253, '25_100': 1.2153,
        }
        # Elementu standumai, perskaiciuoti is ilinkio
        self.standumai_temp = []
        self.EI = []
        # Diagramų parametrai
        self.diagram_title = ""
        self.diagram_directory = ""
        self.diagram_label = {}
```

```

self.diagram_data = {}
self.parsed_data = {}
self.variable = []

# Patikrina ar aikštelės dydžio kintamasis įvestas ar ne, jeigu neįvestas, reiškias jis yra
kintamas.
if self.w == None:
    self.w = [25, 50, 75, 100]
    self.variable = self.w
    self.diagram_directory = 'Pastovus_kampas'
    self.diagram_title = "{0} - Ašinė jėga [kN], {1} - Kampas [°]".format(self.N, self.alfa)
    self.name = "{0}_variable_{2}_{3}".format(self.alfa, self.w, self.N, self.R)
    for i in range(4):
        self.diagram_label["label{0}".format(i)] = "{} [mm]".format(self.w[i])
    # Nuskaito duomenis iš excelio failų, atitinkamai esant pastoviam kampui, armavimui ir
    kintamai aikštelei.
    # Svarbu nustatyti reikiama failu direktorija.
    self.diagram_data["test{0}".format(i)] =\
        pd.ExcelFile('D:\\ZYBA\\Pyth\\Grafiku_analize_dir\\'
            '{0}_{1}_{2}.xlsx'.format(self.alfa, self.w[i], self.R))
    # Paskaiciuoja atitinkamus standumus.
    self.standumai_temp.append\
        (self.length['{0}_{1}'.format(self.alfa, self.w[i])])
    # Patikrina ar kampo dydžio kintamasis įvestas ar ne, jeigu neįvestas, reiškias jis yra kintamas.
elif self.alfa == None:
    self.alfa = [25, 35, 45, 55]
    self.variable = self.alfa
    self.diagram_directory = 'Pastovi_aikštelė'
    self.diagram_title = "{0} - Ašinė jėga [kN], {1} - Aikštelė [mm]".format(self.N, self.w)
    self.name = "variable_{1}_{2}_{3}".format(self.alfa, self.w, self.N, self.R)
    for i in range(4):
        self.diagram_label["label{0}".format(i)] = "{} [°]".format(self.alfa[i])
    # Nuskaito duomenis iš excelio failų, atitinkamai esant pastoviai aikštelei, armavimui

```

```

# Svarbu nustatyti reikiama failu direktorija.
self.diagram_data["test{0}".format(i)] = \
    pd.ExcelFile('D:\\ZYBA\\Pyth\\Grafiku_analize_dir\\'
                 '{0}_{1}_{2}.xlsx'.format(self.alfa[i],self.w,self.R))

# Paskaiciuoja atitinkamus standumus.
self.standumai_temp.append\
    (self.length['{0}_{1}'.format(self.alfa[i], self.w)])

# Nuskaito duomenis iš atitinkamų excelio failų, pagal jų puslaidų numeraciją, puslapio
pavadinimas,
# atitinka ašinės jėgos dydį
for i in range(4):
    self.parsed_data["parse{0}".format(i)] = self.diagram_data['test{0}'.format(i)].parse(
        '{0}'.format(self.N))

    # Papildo tuščią M (momentų) sąrašą, naujais duomenimis iš atitinkamų excelio puslaidų.
    Čia svabru nepamiršti, turint tam tikrą excelio duomenų pasiskirstymą, būtina persižiūrėti excelio
    langelių lokacijas ir atitinkamai jas pakoreguoti savo reikmėms (funkcija .iloc[eilučių masyvas,
    stulpelių masyvas ])
    self.M.append(np.array(self.parsed_data['parse{0}'.format(i)].iloc[2:200, 1]))

    # Papildo tuščią I (įlinkių) sąrašą, naujais duomenimis iš atitinkamų excelio puslaidų.
    self.I.append(np.array(self.parsed_data['parse{0}'.format(i)].iloc[2:200, 4]))

    # paskaičiuos standumus
    self.EI.append(1000*(((self.standumai_temp[i]**2) * self.M[i]) / (12 * self.I[i])))

def combined_diagrams(self):
    chart_colors = [(31, 119, 180), (174, 199, 232), (255, 127, 14), (255, 187, 120),
                    (44, 160, 44), (152, 223, 138), (214, 39, 40), (255, 152, 150),
                    (148, 103, 189), (197, 176, 213), (140, 86, 75), (196, 156, 148),
                    (227, 119, 194), (247, 182, 210), (127, 127, 127), (199, 199, 199),
                    (188, 189, 34), (219, 219, 141), (23, 190, 207), (158, 218, 229)]

    # Scale the RGB values to the [0, 1] range, which is the format matplotlib accepts.
    for i in range(len(chart_colors)):
        r, g, b = chart_colors[i]
        chart_colors[i] = (r / 255., g / 255., b / 255.)

    # Digramų kiekis vienoje figūroje

```

```

ax = plt.subplot(111)
# Diagramos rėmelių nustatymai
ax.spines["top"].set_visible(False)
ax.spines["bottom"].set_visible(True)
ax.spines["right"].set_visible(False)
ax.spines["left"].set_visible(True)
#Diagramos duomenys X ir Y.
for i in range(4):
    plt.plot(self.EI[i], self.M[i], color=chart_colors[i],
             label=self.diagram_label['label{0}'.format(i)], marker='.', linewidth=1)
# Legendos nustatymai
plt.legend(loc=4)
# Ašių nustatymai
axes = plt.gca()
axes.set_xlim([0, 120])
axes.set_ylim([0, None])
plt.xlabel('Standumas [kNm^2]')
plt.ylabel('Momentas [kNm]')
# Diagramos pavadinimas
plt.title(self.diagram_title)
# Diagramos išsaugojimo parametrai
plt.savefig('{0}/CD_{1}.png'.format(self.diagram_directory, self.name), dpi=500)
plt.show()

def maximum_diagram(self):
    # Kodas, reikalingas nustatyti moementų maksimumą ir jį atitinkanti poslinki.
    max_moments = []
    for i in range(4):
        max_moments.append(max(self.M[i]))
    # Maksimumu diagramos nustatymai
    # Digramų kiekis vienoje figūroje
    ax = plt.subplot(111)
    # Diagramos rėmelių nustatymai
    ax.spines["top"].set_visible(False)

```

```

ax.spines["bottom"].set_visible(True)
ax.spines["right"].set_visible(False)
ax.spines["left"].set_visible(True)
# Diagramos X ir Y.
plt.plot(self.variable, max_moments, label="", color='b', marker='.', linewidth=1 )
# Labeliai ant taškų
label_names = []
for i in range(4):
    label_names.append("{}".format(self.diagram_label['label{0}'.format(i)]))
for i,txt in enumerate(label_names):
    ax.annotate(txt, (self.variable[i], max_moments[i]))
# Legendos nustatymai
plt.legend(loc=4)
# Ašių nustatymai
plt.xlabel('Kintamasis')
plt.ylabel('Momentas [kNm]')
# Diagramos pavadinimas
plt.title('Maksimumu diagrama ' + self.diagram_title)
plt.show()

def crack_moment(self):
    crack_mom = {}
    for i in range(4):
        crack_mom["test{0}".format(i)] = self.M[i]
    first_max_mom = []
    for g in range(4):
        for i in range(len(crack_mom["test{0}".format(g)])):
            if crack_mom["test{0}".format(g)][i] > crack_mom["test{0}".format(g)][i+1]:
                first_max_mom.append(crack_mom["test{0}".format(g)][i])
                break
    # Maksimumu diagramos nustatymai
    # Digramų kiekis vienoje figūroje
    ax = plt.subplot(111)
    # Diagramos rėmelių nustatymai

```

```

ax.spines["top"].set_visible(False)
ax.spines["bottom"].set_visible(True)
ax.spines["right"].set_visible(False)
ax.spines["left"].set_visible(True)
# Diagramos X ir Y.
plt.plot(self.variable, first_max_mom, label="", color='b', marker='.', linewidth=1 )
# Labeliai ant taškų
label_names = []
for i in range(4):
    label_names.append("{}".format(self.diagram_label['label{0}'.format(i)]))
for i,txt in enumerate(label_names):
    ax.annotate(txt, (self.variable[i], first_max_mom[i]))
# Legendos nustatymai
plt.legend(loc=4)
# Ašių nustatymai
plt.xlabel('Kintamasis')
plt.ylabel('Momentas [kNm]')
# Diagramos pavadinimas
plt.title('Pirmas trūkio momentas ' + self.diagram_title)
plt.show()

```

class analysis:

```

def __init__(self, N, R):
    self.R = R
    self.N = N
    self.alfa = [25,35,45,55]
    self.w = [25,50,75,100]
    # All parsed data
    self.all_data = {}

```

```

for i in self.w:

```

```

    for x in self.alfa:

```

Nuskaito duomenis iš excelio failų, atitinkamai esant pastoviam kampui, armavimui ir kintamai aikštelei.

```

self.all_data["{0}_{1}_{2}_{3}".format(x,i,N,R)] = \
    np.array(((pd.ExcelFile('D:\\ZYBA\\Pyth\\Grafiku_analize_dir\\{0}_{1}_{2}.xlsx'.for
mat(x, i, R))).\
        parse('{0}'.format(self.N))).iloc[2:200,1])

def eval_table(self):
    # Kodas, reikalingas nustatyti moementų maksimumą ir ji atitinkanti poslinki.
    max_moments = []
    for i in self.w:
        for x in self.alfa:
            max_moments.append(max(self.all_data["{0}_{1}_{2}_{3}".format(x,i,self.N,self.R)]))
    print(max_moments)

# pastovus_kampas_25 = graphs(25,None,10,'R')
# pastovus_kampas_25.maximum_diagram()
#

```