

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS  
STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS**

**Audrė Rugytė**

**KOMPOZICINIŲ KONSTRUKCIJŲ – KOLONŲ IR SIJŲ  
ĮRENGIMO TECHNOLOGIJŲ TYRIMAI**

Baigiamasis magistro projektas

**Vadovas**

Prof. dr. Mindaugas Daukšys

**KAUNAS, 2017**

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**  
**STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS**  
**STATYBOS TECHNOLOGIJŲ KATEDRA**

TVIRTINU

Katedros vedėjas  
Prof. dr. Mindaugas Daukšys

**KOMPOZICINIŲ KONSTRUKCIJŲ – KOLONŲ IR SIJŲ**  
**ĮRENGIMO TECHNOLOGIJŲ TYRIMAI**

Baigiamasis magistro projektas  
Statybos inžinerija (M6026N21)

**Vadovas**

Prof. dr. Mindaugas Daukšys

**Recenzentas**

Dr. Žymantas Rudžionis

**Projektą atliko**

Audrė Rugytė

**KAUNAS, 2017**



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Statybos ir architektūros

---

(Fakultetas)

Audrė Rugytė

---

(Studento vardas, pavardė)

Statybos inžinerija (M6026N21)

---

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Kompozicinių konstrukcijų – kolonų ir sijų įrengimo technologiniai tyrimai“

**AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA**

20 17 m. gegužės 15 d.  
Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Audrės Rugytės** baigiamasis projektas tema „Kompozicinių konstrukcijų – kolonų ir sijų įrengimo technologiniai tyrimai“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

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

---

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

---

(parašas)

Rugytė, A. Kompozicinių konstrukcijų – kolonų ir sijų įrengimo technologiniai tyrimai. Statybos inžinerijos magistro baigiamasis projektas / vadovas prof. dr. Mindaugas Daukšys; Kauno technologijos universitetas, Statybos ir architektūros fakultetas, Statybos technologijų katedra.

Mokslo kryptis ir sritis: statybos inžinerija, statybos technologijos

Reikšminiai žodžiai: kompozitinės konstrukcijos, įrengimo technologijos, mišinys-plienas sąlyčio trintis, tribologija

Kaunas, 2017. 65 psl.

## SANTRAUKA

Baigiamajame magistro projekte analizuojamos Lietuvoje bei užsienio šalyse taikomos kompozicinių konstrukcijų (plieno ir betono) - kolonų ir sijų įrengimo technologijos. Apžvelgta kompozicinių sijų ir kolonų panaudojimo galimybės, įrengimo būdai bei atliktas įrengimo technologijų palyginimas su kitomis konstrukcijomis, tokiomis kaip gelžbetonis ir metalas. Pateiktos kompozicinių konstrukcijų sudedamosios dalys, naudojamos medžiagos bei šioje srityje atlikti moksliniai tyrimai.

Tiriamojame dalyje ištirta atskirų betono mišinio sudedamųjų dalių, tai yra santykio tarp stambiojo užpildo (4/16 fr. žvirgždas) ir bendro užpildų mišinio kiekio, įtaka mišinio-plieno sąlyčio paviršiaus trinties parametrų.

Taip pat atliktas pasirinktų lyginamųjų variantų - kompozicinio karkaso, gelžbetoninio karkaso ir metalinio karkaso įrengimo technologijų alternatyvių sprendimų vertinimas, remiantis sudaryta kriterijų vertinimo sistema ir naudojant daugiakriterinį vertinimo metodą. Pasiūlytas racionalus inžinerinis sprendimas pastato karkaso įrengimui, naudojant daugiakriterinį vertinimo metodą (COPRAS), atsižvelgiant į užsiduotą sąlygą, kad visos konstrukcijos jungiamos varžtinėmis jungtimis.

Darbas susideda iš įvado, 4 skyrių, išvadų. Darbo apimtis – 65 puslapiai, 47 paveikslai, 24 lentelės, 38 literatūros šaltinių.

Rugytė, A. Researches of installation technologies on composite structures - columns and beams. Civil engineering master's degree final project / academic supervisor prof. dr. Mindaugas Daukšys; Kaunas University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Department of civil engineering technologies.

Research area and field: civil engineering, construction technologies

Key words: composite structures, installation technologies, concrete-steel interface friction, tribology

Kaunas, 2017. 65 pages

## SUMMARY

This master's thesis analyzes various technologies used for pile composite construction (steel and concrete) – column and beam installation in Lithuania and other countries. Reviewed composite beams and columns use, installation techniques and installation technologies are compared with other structures such as concrete and metal. This thesis presents composite structures components, materials with research in this area.

The practical research part of this thesis contains of analysis to various components of concrete mix, including parameters like: ratio of the large aggregates (4/16 fraction gravel) between total aggregates of a mixture the influence on on-steel contact surface friction parameters.

Evaluations were made of chosen composite frame, reinforced concrete frame and the metal frame installation technology compared to alternative technologies, based on composed relevant criteria system and also using multi-criteria evaluation.

By using multi-criteria evaluation system COPRAS, a rational engineering solution of the frame was determined taking into account that all structures are connected using screw connections.

This master's thesis consists of introduction, 4 chapters, conclusions and annexes. Scope of the work – 65 pages, 47 pictures, 24 tables, 38 references.

## TURINYS

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS .....	8
LENTELIŲ SĄRAŠAS .....	10
SANTRUMPOS .....	11
ĮVADAS .....	12
1. Kompozitinių, plieno ir gelžbetonio konstrukcijų – kolonų ir sijų įrengimo technologijų palyginimas .....	14
1.1. Gelžbetonio konstrukcija .....	14
1.1.1. Betonas .....	14
1.1.2. Gelžbetonio konstrukcijų įrengimo technologija. ....	15
1.1.3. Gelžbetoninių elementų montavimas .....	17
1.2. Metalo konstrukcija .....	20
1.2.1. Metalas.....	20
1.2.2. Metalo konstrukcijų įrengimo technologija.....	21
1.3. Kompozicinės konstrukcijos .....	22
1.3.1. Kompozicinės sijos.....	23
1.3.2. Kompozicinės kolonos .....	29
2. Mišinių reologinės savybės .....	30
2.1. Cementinių mišinių reologinės savybės .....	30
2.1.1. Reologija.....	30
2.1.2. Medžiagos savybės .....	31
2.2. Tribologiniai tyrimai .....	34
3. Tiriamoji dalis.....	36
3.1. Naudotos medžiagos .....	36
3.1.1. Cementas .....	36
3.1.2. Smulkusis užpildas .....	36
3.1.3. Stambusis užpildas .....	36
3.1.4. Betono mišinio įmaišos .....	37
3.2. Tyrimų metodika .....	37
3.2.1. Betono mišinio ruošimas .....	37
3.2.2. Betono mišinio technologinių savybių nustatymas .....	38
3.3. Betono mišinio-plieno sąlyčio paviršiaus trinties parametrų nustatymas .....	40
3.4. Tyrimų rezultatai .....	42
3.4.1. Betono mišinio technologinių savybių kitimas .....	42

3.4.2. Betono mišinio sudedamųjų dalių įtaka mišinio-plieno sąlyčio paviršiaus trinties parametrams .....	45
4. Optimaliausio varianto parinkimas daugiakriteriniais metodais .....	52
4.1. Entropijos metodu randamas teorinis bei kompleksinis kriterijų reikšmingumas	53
4.2. Artumo idealiam taškui metodo pritaikymas	57
Išvados .....	62
Literatūra.....	63

## PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Montavimas prie pamato inkarinių varžtų [2].....	15
1.2 pav. Montavimas į taurės tipo pamatus [2].....	15
1.3 pav. Montavimas prie pamato inkarinių varžtų ir inkarinės armatūros [2] .....	15
1.4 pav. Sijų montavimo ant kolonų gembų schema [2] .....	16
1.5 pav. Kolonos sandėliavimo schema [2] .....	17
1.6 pav. Gaminio prilaikymas su stropais [2] .....	17
1.7 pav. Sijos pakėlimas į projektinę padėtį .....	18
1.8 pav. Sijų ant kolonos montavimo schema .....	19
1.9 pav. Konsolės gaminy, kuris montuojasi į koloną .....	23
1.10 pav. Sijos tvirtamos ant kolonos viršaus.....	23
1.11 pav. Jungimas varžtais .....	23
1.12 pav. Kompozicinių sijų schemas [7].....	24
1.13 pav. Kompozitinės sijos metalinis karkasas (Gaminamas Švedijoje)[8].....	24
1.14 pav. Kompozitinės sijos metalinis karkasas (gaminamas Lietuvoje „Deltabeam“)[9]	24
1.15 pav. Kompozicinių sijų karkasų sandėliavimas .....	25
1.16 pav. Kompozicinės sijos karkaso pakėlimas.....	25
1.17 pav. Įdėtinė detalė/gembė kolonoje .....	27
1.18 pav. Įdėtinė detalė kolonoje (kolonos viduryje) .....	27
1.19 pav. Įdėtinė detalė kolonoje (kolonos viršuje).....	27
1.20 pav. Jungimas inkaravimo būdu .....	27
1.21 pav. Varžtinė jungtis .....	27
1.22 pav. Lenktų formų sijų pavyzdžiai .....	28
1.23 pav. Įvairių formų ir plieninio karkaso kompozicinės kolonos schemas [10].....	29
2.1 pav. Skirtumas tarp plastiškos ir klampios medžiagos [12].....	31
2.3 pav. BTRHEOM viskozimetras .....	33
3.1 pav. Įprastos betono mišinio sudėties modifikavimo atskiromis sudedamosiomis dalimis eiga, vertinant įtaka mišinio-plieno sąlyčio paviršiaus trinties parametrams.....	37
3.2 pav. Oro kiekio betono mišinyje nustatymo slėgio metodu prietaisas .....	38
3.3 pav. Betono mišinio slankumo matavimas [24].....	40
3.4 pav. BTRHEOM tribometras ir jo veikimo supaprastinta schema .....	41
3.5 pav. Santykio tarp stambiojo užpildo (4/16 fr. žvirgždas) ir bendro užpildų mišinio kiekio įtaka oro kiekio kitimui .....	43
3.6 pav. Santykio tarp stambiojo užpildo (4/16 fr. žvirgždas) ir bendro užpildų mišinio kiekio įtaka oro mišinio tankiui.....	43



3.7 pav. Santykio tarp stambiojo užpildo (4/16 fr. žvirgždas) ir bendro užpildų mišinio kiekio įtaka mišinio slankumui .....	44
3.8 pav. Šlyties įtempių priklausomybė nuo sukimosi greičio, kuomet santykis tarp stambiojo užpildo (4/16 fr. žvirgždas) ir bendro užpildų mišinio kiekio kinta ribose nuo 0,22 iki 0,82.....	46
3.9 pav. Santykio tarp stambiojo užpildo (4/16 fr. žvirgždas) ir bendro užpildų mišinio kiekio įtaka ribiniai šlyčiai sąlyčio paviršiuje .....	46
3.10 pav. Santykio tarp stambiojo užpildo (4/16 fr. žvirgždas) ir bendro užpildų mišinio kiekio įtaka klampos konstantai .....	47
3.11 pav. Ribinės šlyties sąlyčio paviršiuje priklausomybė nuo klampos konstantos, kuomet santykis tarp stambiojo užpildo (4/16 fr. žvirgždas) ir bendro užpildų mišinio kiekio kinta ribose nuo 0,22 iki 0,62.....	47
3.12 pav. Ribinės šlyties sąlyčio paviršiuje ir klampos konstantos kitimas, kuomet santykis tarp stambiojo užpildo (4/16 fr. žvirgždas) ir bendro užpildų mišinio kiekio kinta ribose nuo 0,22 iki 0,62.....	48
3.13 pav. Kompozitinių konstrukcijų – plieninių kolonų vidinio paviršiaus šiurkštumo matavimas.....	49
3.14 pav. Betono mišinys į kompozitines kolonas paduodamas iš apačios į viršų [29].....	49
3.15 pav. Ribinės šlyties sąlyčio paviršiuje ir klampos konstantos kitimas, kuomet santykis tarp stambiojo užpildo (4/16 fr. žvirgždas) ir bendro užpildų mišinio kiekio kinta ribose nuo 0,22 iki 0,62 (paviršiaus šiurkštumas 48,0 μm) .....	50
3.16 pav. Ribinės šlyties sąlyčio paviršiuje ir klampos konstantos kitimas, kuomet santykis tarp stambiojo užpildo (4/16 fr. žvirgždas) ir bendro užpildų mišinio kiekio kinta ribose nuo 0,22 iki 0,62 (paviršiaus šiurkštumas 434,4 μm) .....	50
4.1 pav. Teorinis kriterijų reikšmingumas .....	56
4.2 pav. Kompleksinis kriterijų reikšmingumas .....	56
4.3 pav. Grafinis kompleksinio reikšmingumo variantų palyginimas .....	60
4.4 pav. Grafinis teorinio reikšmingumo variantų palyginimas .....	61

## LENTELIŲ SĄRAŠAS

3.1 lent. CEM I 42,5 R fizikinės, mechaninės savybės bei cheminė sudėtis.....	36
3.2 lent. Smulkiojo ir stambiojo užpildų granulimetrinė sudėtis.....	36
3.3 lent. Betono įmaišos techniniai duomenys .....	37
3.4 lent. Betono mišinio sudėtys BT1-0 – BT1-6.....	42
3.5 lent. Ribinė šlytis sąlyčio paviršiuje, klampos konstanta bei ribinę šlytį sąlyčio paviršiuje $\dot{\gamma}$ nuo klampos konstantos aprašanti lygtis, empirinis ir koreliacijos koeficientai. ....	45
3.6 lent. Kompozitinių konstrukcijų – plieninių kolonų vidinio paviršiaus šiurkštumas. ...	48
4.1 lent. Pradiniai duomenys.....	54
4.2 lent. Normalizuota matrica $P$ .....	54
4.3 lent. Papildoma matrica $P_{ij} \cdot \ln P_{ij}$ .....	55
4.4 lent. Entropijos lygiai.....	55
4.5 lent. Kriterijų kitimo lygiai .....	55
4.6 lent. Teorinis kriterijų reikšmingumas.....	55
4.7 lent. Subjektyvus kriterijų reikšmingumas .....	56
4.8 lent. Kompleksinis kriterijų reikšmingumas .....	56
4.9 lent. Pradiniai duomenys.....	57
4.10 lent. Matrica $P$ .....	58
4.11 lent. Svertinė normalizuota matrica $P^*$ .....	58
4.12 lent. Idealus teigiamas variantas .....	59
4.13 lent. Idealus neigiamas variantas .....	59
4.14 lent. Santykinio lyginamų variantų artumo idealiam $K_{bit,i}$ nustatymas.....	59
4.15 lent. Svertinė normalizuota matrica $P^*$ .....	60
4.16 lent. Idealus teigiamas variantas .....	60
4.17 lent. Idealus neigiamas variantas .....	61
4.18 lent. Santykinio lyginamų variantų artumo idealiam $K_{bit,i}$ nustatymas.....	61

## SANTRUMPOS

pav. – paveikslas;

lent. – lentelė;

ang. – angliškai;

kt. – kita;

t.y. – tai yra;

BL – boundary layer;

mm – milimetrai;

V/C – vandens ir cemento santykis;

t – tona;

Pa – matavimo vienetas, Paskalis;

MPa – matavimo vienetas, megapaskalis;

s – sekundė;

m<sup>2</sup> – kvadratinis metras;

kg – kilogramai;

% – procentai;

min – minutė;

cm<sup>3</sup> – kūbinis centimetras;

g – gramas;

m – metras;

fr – frakcija.

## IVADAS

Žinomos statybinės medžiagos, tokios kaip betonas ir metalas, vis sparčiau panaudojamos įvairių statinių konstrukcijų statyboje. Šiuolaikinės statybos be minėtų medžiagų tapo neįsivaizduojamos. Tačiau vystantis inovacijoms ir tobulėjant technologijoms imtasi įvairių variantų, kurie pagerina šių medžiagų savybes. Statybinės medžiagos tampa ekologiškesnės, pradedamos gaminti konstrukcijos derinat skirtingų medžiagų fizikines ir mechanines savybes. Taip atsirado kompozicinės konstrukcijos, pagamintos apjungiant dvi ar daugiau medžiagų (nagrinėjamu konkrečiu atveju tai betono ir metalo junginys – kompozicinė konstrukcija).

Mokslas, kuris nagrinėja tarpusavyje sąveikaujančių paviršių judėjimą vienas kito atžvilgiu, trintį tarp atskirų paviršių, dilimą ir paviršių sutepimą vadinamas tribologija. Bet kuris gaminys, kuomet bent viena medžiaga slysta kitos paviršiaus atžvilgiu ir/arba trinasi su kitu paviršiumi yra veikiamas sudėtinių tribologinių sąveikų. Baigiamojo projekto tiriamojoje dalyje remiamasi tribologijos mokslu nagrinėjant betono mišinio kontaktą su kietuoju paviršiumi – plienu. Imituojamas betono mišinio trinties į kompozitinės konstrukcijos tam tikro šiurkštumo plieno paviršių procesas.

**Baigiamojo projekto tikslas** – atlikti kompozicinių konstrukcijų įrengimo technologijų palyginimą su plieno ir gelžbetonio konstrukcijomis ir ištirti stambiojo užpildo kiekio bendrame užpildų mišinyje įtaką mišinio-plieno sąlyčio paviršiaus trinties parametrams.

### **Projekto įgyvendinimui keliami uždaviniai:**

- Išanalizuoti Lietuvoje bei užsienio šalyse taikomas kompozicinių konstrukcijų įrengimo technologijas ir aprašyti šioje srityje atliktus mokslinius tyrimus.
- Atlikti kompozicinių, plieno ir gelžbetonio konstrukcijų – kolonų ir sijų įrengimo technologijų palyginimą ir išskirti privalumus bei trūkumus.
- Ištirti stambiojo užpildo kiekio bendrame užpildų mišinyje įtaką mišinio-plieno sąlyčio paviršiaus trinties parametrams.
- Remiantis sudaryta kriterijų vertinimo sistema bei taikant daugiakriterinius metodus atlikti kompozicinių, plieno ir gelžbetonio konstrukcijų įrengimo technologijų techninį – ekonominį įvertinimą ir parinkti racionalų inžinerinį sprendimą.

### **Mokslinio darbo praktinė vertė**

Atsižvelgiant į betono mišinio pagrindines reologines savybes, tokias kaip **ribiniai šlyties įtempiai** (tarp betono mišinio ir metalinio paviršiaus) ir betono mišinio **klampa**, galima pasiūlyti optimalią mišinio sudėtį statybos metu (lyginant užpildų skirtingų dydžių santykį), kai betono mišinys turi sąlytį su skirtingo šiurkštumo metaliniu paviršiumi (kompozitinė konstrukcija, metaliniai klojiniai).

Daugelis statybos inžinerijoje sprendžiamų uždavinių yra susiję su konstrukcijų problemomis, kurias sukelia trintis. Šios srities uždaviniams spręsti buvo sukurtas specialus įrenginys – tribometras, skirtas skystos medžiagos trinčiai į atitinkamą paviršių įvertinti. Tribometro veikimo principas pagrįstas tangentinių jėgų matavimu, kai tekėdamas betono mišinys sąveikauja su metaliniu paviršiumi.

Sparčiai vystantys betono mišinio klojimo į klojinius technologijoms vis dažniau susiduriama su tam tikromis problemomis, betono mišinius tiekiant betono siurbliais. Būtent tribometro panaudojimas leidžia nagrinėti, kas vyksta betono mišinio – plieno sąlyčio zonoje, kuomet betono mišinys betono siurbliu paduodamas į plieninę kompozicinę koloną iš apačios į viršų. Pastarojo tyrimo metu nustatyti trinties parametrai yra integruojami į modelį, kuris nagrinėja mišinio tekėjimo greičio priklausomybę nuo slėgio, pumpuojant mišinius betono siurbliu.

# 1. KOMPOZITINIŲ, PLIENO IR GELŽBETONIO KONSTRUKCIJŲ – KOLONŲ IR SIJŲ ĮRENGIMO TECHNOLOGIJŲ PALYGINIMAS

## 1.1. Gelžbetonio konstrukcija

### 1.1.1. Betonas

Statyboje betonas naudojamas nuo seno, o ypač šiuo metu jis naudojamas labai plačiai. Kvalifikuotai jį projektuojant, galima ne tik gauti praktiškai bet kurios formos ir reikiamų savybių gaminį, bet ir spręsti ekologines problemas, panaudojant antrines žaliavas. Priklausomai nuo betonui keliamų reikalavimų jie skirstomi į daugybę modifikacijų.

Statybos pramonėje sparčiai augant originalių ir sudėtingų konstrukcijų projektavimui, keliami vis griežtesni reikalavimai jas užpildomam betonui. Dabar siekiama ne tik didelio betono gniuždymo stiprio, ilgaamžiškumo, bet ir labai geros betono paviršiaus kokybės.

Betono mišinys susideda iš šių komponentų:

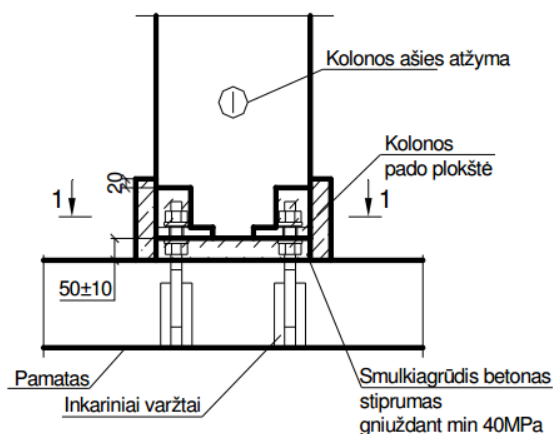
- *Cementas* gali būti įvairios sudėties, priklausomai nuo to, kokioje aplinkoje bus eksploatuojamas. Cementas skirstomas į 5 klases: CEM I, CEM II, CEM III, CEM IV, CEM V. Priklausomai nuo cemento savitojo paviršiaus jis gali būti greitai arba lėtai kietėjantis, gali turėti įvairių priedų (klinčių, šlako), gali būti spalvotas ir kt. [1].
- *Užpildai* gali būti stambūs (žvirgždas, įvairi skalda) arba smulkūs (smėlis). Mikroužpildai tai smulčiausios dalelės, kurių skersmuo apytiksliai  $\leq 0,125$  mm. Užpildų kiekis apskaičiuojamas formulėmis, tačiau paprastai jie sudaro apie 80% viso betono mišinio tūrio. Atitinkamai šį kiekį sudaro apie 40% stambaus ir apie 60% smulkaus užpildo, galimi ir kiti santykiai. Tai priklauso nuo daugelio priežasčių – viena jų stambaus užpildo tuštymėtumas. Projektuojant betono mišinio sudėtį visuomet norima pasiekti optimaliausią užpildų dalelių išsidėstymą tūryje – didžiausią tankį.
- *Vandens kiekis* normuojamas atsižvelgiant į norimą betono mišinio konsistenciją, aplinką, kurioje bus eksploatuojamas ir kt.
- *Betono įmaišos* naudojamos siekiant išgauti reikiamas betono mišinio ar sukietėjusio betono savybes, pavyzdžiui, reikiamą mišinio konsistenciją - standumą, slankumą; tankį ir gniuždymo stiprį; atsparumą šalčiui; nelaidumą vandeniui; spalvą ir kt. Šios įmaišos palengvina statybininkų darbą statybos aikštelėje įrengiant betono monolitines konstrukcijas arba pagerina (gali ir pabloginti, jei naudojamos ne pagal paskirtį) reikiamas konstrukcijos savybes.

### 1.1.2. Gelžbetonio konstrukcijų įrengimo technologija.

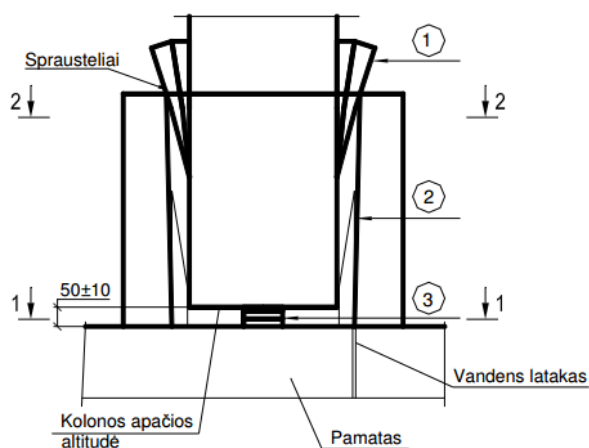
Gelžbetoninės surenkamos konstrukcijos, transportuojamos į statybvietę pagamintos gamykloje, todėl greitesnė statyba, nes belieka jas pastatyti į projektinę padėtį ir sumontuoti.

Gelžbetoninės kolonos prie pamato montuojamos:

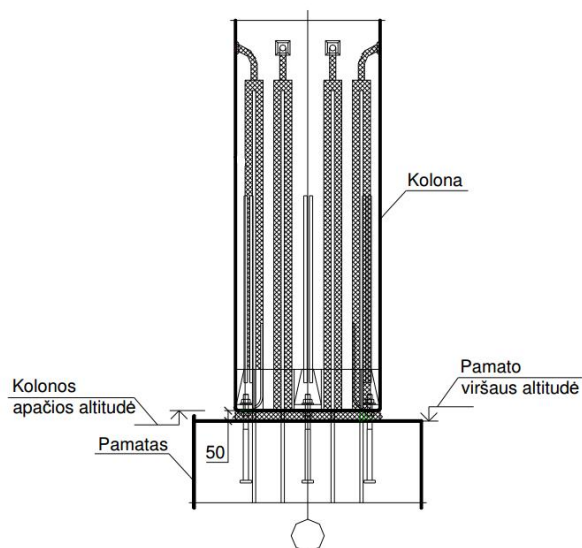
- 1) prie pamato inkarinių varžtų (1.1 pav.);
- 2) montuojamos į pamato lizdą (1.2 pav.);
- 3) prie pamato inkarinių varžtų ir inkarinės armatūros (1.3 pav.) [2].



1.1 pav. Montavimas prie pamato inkarinių varžtų [2]



1.2 pav. Montavimas į taurės tipo pamatus [2]



1.3 pav. Montavimas prie pamato inkarinių varžtų ir inkarinės armatūros [2]

Šie jungimo būdai yra skirtingi, priklauso ant kokių pamatų teks montuoti koloną, pavyzdžiui, jei numatomi poliniai pamatai, tai šis pamatas neturės lizdo ir bus neįmanomas antras jungimas (1.2 pav.). Pirmasis variantas (1.1 pav.) naudojamas dažniausiai. Trečiajam variantui (1.3 pav.), būdingas sudėtingesnis betonavimas, kuriam naudojamas susitankinantis

betono mišinys, kuris paduodamas per tam skirtą angą kolonoje arba klojinius (žiūrėti 1.3.2. skyrių).

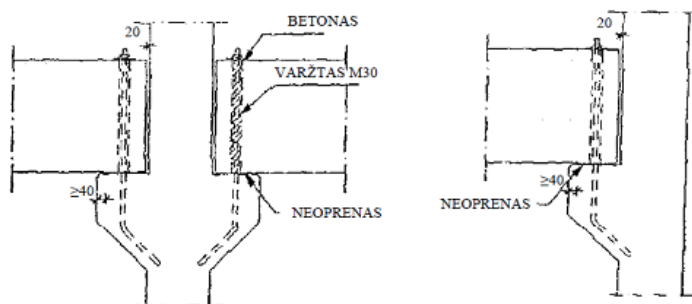
Susitankinantis betonas sukurtas Japonijoje 1980 m., per 1990 šis betonas įžengė į Europą (Nyderlanduose ir Skandinavijos šalyse), nuo to laiko susitankinančio betono panaudojimas didėja įvairiose šalyse. Susitankinantis betonas tapęs populiarus statybose, kadangi turi daug privalumų. Susitankinantis betonas gali tekėti lengvai sudėtingos konfigūracijos klojinių formomis; pagerina tvirtumą ir ilgaamžiškumą; sumažina darbų apimtį; trumpina darbo sąnaudas apdailos metu. Vis dėlto susitankinančio betono mišinio slėgis į klojinio sienelės yra didesnis nei įprasto betono, todėl reikalingi tvirtesni klojiniai. Siekiant sumažinti didžiausią slėgį į klojinių sienelės, pirmiausia reikia numanyti ir prognozuoti slėgio kitimą bėgant laikui [3].

Susitankinantis betonas – tai specialiai parinktos sudėties betono mišinys, kurio nereikia vibruoti ar tankinti kitais būdais, yra veikiamas tik sunkio jėgos, tolygiai, be užpildų išsisluoksniavimo bei vandens atsiskyrimo užpildo formas ar klojinius. Šio betono mišinio panaudojimas leidžia betonavimo metu užpildyti tarpus, kurie yra sunkiai prieinami arba visai neprieinami arba dažniausiai naudojamas betonuojant iš apačios į viršų (plačiau žiūrėti 1.3.2 skyrių) [4].

Gelžbetoninių surenkamų sijų gamyba gamykloje bei statybvietėje yra tokia pat kaip ir kolonų, tik surenkama sija montuojama iš ilgio horizontaliai tarp kolonų. Surenkamos sijos galuose, kurie remiasi ant kolonos konsolės yra angos, kurios uždedamos ant kolonos konsolėje esančių strypų, arba jungiasi per įdėtinės detalės.

Surenkamuose gelžbetoniniuose elementuose kolonų ir sijų jungimas:

- Sandūrose sijos guli ant kolonos gembės (1.4 pav.);
- Sandūrose sijos guldamos ant kolonos kaklelio arba ant laikinų montavimo staliukų [5].



1.4 pav. Sijų montavimo ant kolonų gembių schema [2]



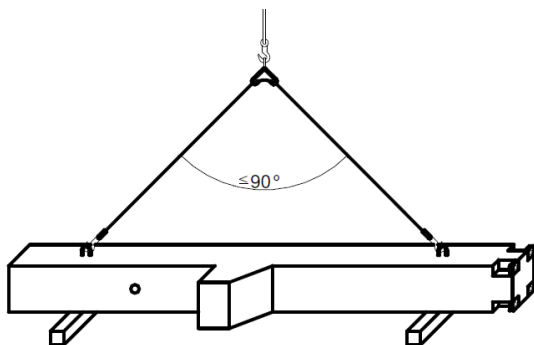
### 1.1.3. Gelžbetoninių elementų montavimas

Statinio konstrukcijų montavimo darbai vykdomi pagal projekto sprendinius, statybos darbų technologinius projektus ir šių statybos taisyklių reikalavimus.

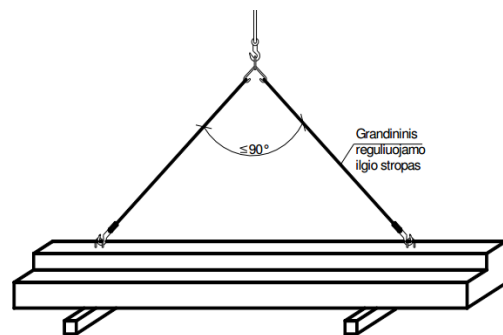
Surenkamieji betono ir gelžbetonio gaminiai į statybvietes transportuojami darbo padėtyje (išskyrus kolonas). Jei galima, dar neiškrovus gaminių iš transporto priemonės, statybos vadovas patikrina ar gaminiai atitinka važtaraštyje pateiktą informaciją: gaminių marke, jų kiekį, kokybę, techninės kontrolės antspaudus. Tuo atveju, kai pastebima gaminių defektų, surašomas defektų aktas ir informuojamas gamyklos atstovas. Sprendžiamas defektuoto gaminio pakeitimo klausimas.

Montuojant surenkamąsias konstrukcijas, esant visoms montavimo stadijoms reikia užtikrinti jau sumontuoto statinio dalies pastovumą. Montuojant atskirus elementus, prieš atkabinant juos nuo kėlimo mechanizmo kablo, būtina laikinai įtvirtinti. Laikinas įtvirtinimas turi būti toks, kad esant reikalui, būtų galima patikslinti montuojamos konstrukcijos padėtį ir pagal projekto reikalavimus įrengti sujungimo mazgus [6].

Kolonas ir sijos iškraunamos iš transporto priemonės dvišakiais stropais, kuriu kėlimo galia atitinka kolonos ar sijos svorį. Būtina, kad, keliant gamini, kampas tarp stropo šakų būtų  $<90^\circ$ . Kolonos ir sijos sandėliuojamos ant lygaus tvirto pagrindo, atramas dedant dvejuose rėmimo taškuose, po kėlimo kilpomis (1.5 pav.).



1.5 pav. Kolonos sandėliavimo schema [2]



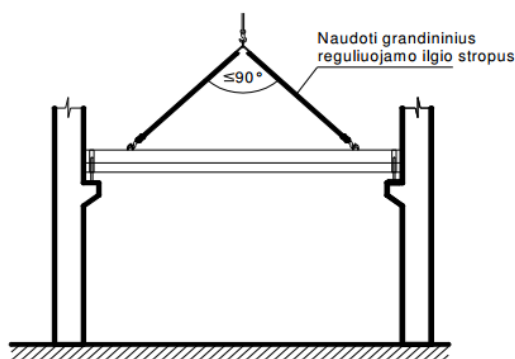
1.6 pav. Gaminio prilaikymas su stropais [2]

Ypatingai ilgose ir liaunose kolonose ( $L > H_{\text{skerspjūvio}} \times 35$ ) ar ilgose sijose (virš 15m ilgio), gaminiuose gali būti suprojektuotos keturios kėlimo kilpos. Jos iškraunamos specialiomis traversomis ar dviem kranais. Tokios kolonos ir sijos sandėliuojamos ant trijų atramų. Kolonos ir sijos laikinai sandėliuojamos, šalia montavimo vietos. Todėl, jas iškraunant, reikia atkreipti dėmesį į tai, kad montavimo kiaurymę (kėlimo įrangai prakišti per koloną) būtų horizontalioje padėtyje ir kolona iš sandėliavimo vietos galėtų iškart kelti į vertikalią padėtį. Kad pakeltas

gaminys neįsisiūbuotų, jo galuose reikia pririšti virves, kuriomis būtų galima jį prilaikyti ir pakreipti reikiama kryptimi (1.6 pav.) [2].

Galima gaminius sandėliuoti arba pasirinkti montavimą be sandėliavimo. Tada iš karto atvežtus gaminius keliame į projektinę padėtį ir užtvirtiname. Šiuo atveju yra sutrumpinamas montavimo laikas bei neužimama papildomai vietos statybos aikštelėje sandėliuojant gaminius.

Prieš montuojant sijas reikia nuvalyti rėmimo vietas ir patikrinti kolonų konsolių altitudes. Montavimo darbai pradami nuo teisingo gaminio pakėlimo į projektinę padėtį. Pasirinkus reikiamos kėlimo galios ir ilgio kėlimo grandines, gaminį pakeliame nuo žemės ir įsitikiname ar jis kabo horizontalioje padėtyje. Jei pakėlus siją pastebime, kad ji kabo ne horizontaliai, grandininių stropų pagalba sureguliuojame jo horizontalumą. To nepadarius, montuojant siją ant kolonos varžtų, gali būti pažeisti varžtai arba net nuskilti kolonos konsolės dalis (1.7 pav.) [2].

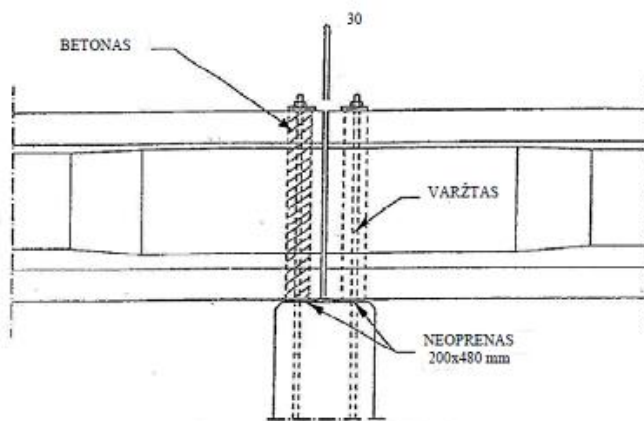


1.7 pav. Sijos pakėlimas į projektinę padėtį

Pakėlus gaminį į reikiamą aukštį, virvėmis pasukame jį taip, kad kiaurymės atsirastų virš kolonų varžtų. Atsargiai leisdami žemyn, montuotojai, stovintys ant montavimo aikštelių, sureguliuoja jį taip, kad pastarasis tolygiai atsiremtų ant konsolių vienodu atstumu nuo kolonų (apie 2 cm). Sumontavus siją, iki 1/10 gaminio ilgio atstumu nuo kolonos ašių statomi statramsčiai, kuriais paremiama sijos lentyna. Statramsčių laikomoji galia turi būti tokia, kad atlaikytų sijai tenkantį perdangų ir sijos lentynos svorį. Statramsčius galima nuimti tik tuomet, kai sumontuotų plokščių visi tvirtinimo mazgai pilnai surinkti ir suvirinti. Sijų lentynų parėmimas yra atsakingas ir kruopštumo reikalaujantis darbas. Kai statomas pastatas yra daugiaaukštis, paremti reikia visų aukštų sijas. Šiuo atveju reikalingi didelės laikomosios galios statramsčiai (10÷30 t). Būtina atkreipti dėmesį į tai, kad iki perdangų montavimo, sijas priveržiantys kolonų varžtai, turi būti užtaisyti betonu. Atliekant tipinių gaminių montavimą, betonuojami tik viename gale esantys varžtai, priešingame sijos gale esantys varžtai paliekami laisvi. Projekto konstruktorius nurodo koku būdu atlikti betonavimą, ir pateikta mazgų darbo brėžinius. Jei varžtai paliekami nebetonuoti, tai jie užpurškiami poliuretano ar užpilami visiškai silpnu cementiniu skiediniu S7,5 (nevibruojant), kad nerūdytų. Užtaisius varžtus abiejuose

gaminio galuose, uždedamos poveržlės ir užveržiamos veržlės apskaičiuota jėga. Sujungimų sprendimai turi būti nurodyti mazgų įrengimo brėžiniuose [2].

Surenkama sija remiama į koloną naudojant inkarinį varžtą kolonos gembėje ir ant jo užmaunant siją, kurios gale įrengta vertikali kiaurymė varžtui. Taikant šį sprendimą neprireikia virinimo darbų, todėl pats montavimas tampa paprastesnis, saugesnis ir greitesnis. Šiame mazge naudojama viena medžiaga – tai neopreno tarpinė. Sumontuota sijos atrėmimo zonoje, pastaroji tolygiau paskirsto sijos atramines reakcijas kolonos gembei. Be to, montuojant siją nereikia naudoti cemento ir smėlio skiedinio – montavimas tampa švaresnis. Tarpą tarp kolonos ir sijos užtaisyti netraukiuoju cementiniu skiediniu (1.8 pav.) [8].



1.8 pav. Sijų ant kolonos montavimo schema [7]

Deformacinėje siūlyje sijos ant kolonų montuojamos taip, kad viena sija horizontalia kryptimi turėtų paslankumą. Tam po viena sija dedamas „neopreno“ padėklas ir montažinio varžto anga užtaisoma betonu, po kita sija dedamas „tefloninis neoprenas“ ir montažinio varžto anga betonu neužtaisoma. Tokia jungtis sudaro sąlygas laisvam sijos poslinkiui horizontalia kryptimi [6].

Gelžbetoninės konstrukcijos **privalumai:**

- *Stiprumas.*
- *Atsparumas ugniai* - nereikalingos papildomos investicijos dengti gamino paviršių.
- *Ilgaamžiškumas* - nepažeidus konstrukcijos ir teisingai eksploatuojama konstrukcija pasižymi dideliu ilgaamžiškumu.
- *Greitas montavimas* - kai transportuojamos jau pagamintos konstrukcijos, montavimo metu belieka pastatyti į reikiamą projektinę padėtį ir užtvirtinti.
- *Formų įvairovė* - galimos originalios ir įvairios formos konstrukcijos. Leidžia projektuoti sudėtingos formos statinius.

Gelžbetoninės konstrukcijos **trūkumai:**

- *Betono korozija* - vyksta tada, kai betono paviršius reaguoja su drėgna aplinka. Kad apsaugot nuo korozijos reikiama tam tikra apsauga, kuri iškelia konstrukcijos savikainą. Apsauga nuo šios korozijos galima šiais būdais: reikiamas apsauginis betono sluoksnis iki armatūros; tankus betonas; betono paviršiaus padengimas atspariomis korozijai medžiagomis; epoksidine danga dengta armatūra; betono įmaišos, kurios apsaugo nuo korozijos; mažas vandens ir cemento santykis ( $<0,35$ ); katodinė apsauga; cinkuota armatūra; polimerinis impregnavimas; mišrūs cementai, kurie sumažina pralaidumą.
- *Konstrukcijos masė* - reikiamas savybės (gebanti atlaikyti dideles apkrovas, nestandartinės formos gaminys) turinti konstrukcija gali tapti sunki, todėl išauga transportavimo ir montavimo išlaidos.
- *Klojinių įrengimas* - monolitines konstrukcijas išgauti įrengiami klojiniai, kurie iškelia konstrukcijos kainą bei pailgina statybų procesą.

## 1.2. Metalo konstrukcija

### 1.2.1. Metalas

Metalais vadinami cheminiai elementai, kurių pagrindiniai požymiai yra savitasis blizgesys, didelis laidumas šilumai ir elektrai, stiprumas, didelis tankis. Apie 95% visų pasaulio metalų sudaro juodieji metalai, t. y. geležis ir jos lydiniai. Anglis svarbiausias lydinų komponentas. Likusieji - tai spalvotieji ir taurieji metalai. Apskritai metalai plačiai naudojami statyboje – iš jų gaminamos įvairios konstrukcijos, vamzdiniai, skarda ir kt. [10].

Juodieji metalai pagal procentinį anglies kiekį skirstomi:

- Ketus (geležies ir anglies lydinys)  $2\% < C \leq 4\%$ ;
- Plienas (geležies ir anglies lydinys)  $C \leq 2\%$ .

Techninėms savybėms pagerinti naudojami legiruojantys priedai: chromas, aliuminis, cinkas, manganas. Cheminė plieno sudėtis yra pagrindinė jo charakteristika, ji nulemia plieno markę. Atsižvelgiant į anglies ir legiruojančių priedų kiekį plienai skirstomi į įvairias grupes [1]:

- Anglingasis, kai plienas neturi legiruotų priedų;
- Mažaanglis ( $C = 0,09 - 0,25\%$ );
- Vidutinio anglingumo ( $C = 0,25 - 0,5\%$ );
- Didelio anglingumo ( $C > 0,6\%$ ).

Jei priedų kiekis neviršija  $2\div 3\%$ , vadinami mažai legiruoti plienai, jei priedų kiekis daugiau už  $8\div 10\%$ , vadinami aukštai legiruoti plienai [1].

Metalinės kolonos ir sijos jungimo būdai:

- Siją prijungiant *varžtais ar kniedėmis* prie kolonos;

- *Padedant siją* ant paruošto staliuko;
- *Virinant* [10].

### 1.2.2. Metalo konstrukcijų įrengimo technologija

Metalinės konstrukcijos į statybvietai transportuojamos jau pagamintos, todėl lieka pastatyti į projektinę padėtį ir sujungti tarpusavyje. Kolonų jungimo būdai prie pamato galimi tik per inkarinius varžtus. Tuo tarpu sijų jungimas prie kolonos gali būti varžtais, kniedėmis arba suvirinimo būdu.

#### **Konstrukcijų sandėliavimas**

Visos konstrukcijos sandėlyje ar objekto sandėliavimo aikštelėje turi būti surūšiuotos pagal objektus, markes, montavimo eiliškumą. Paruoštos montavimui turi būti nuvalytos nuo purvo, rūdžių, atraminės dalys - suteptos, pažymėtos ašys, svorio centrai, pažymėtos stropavimo vietos.

Pakrovimą, iškrovimą, transportavimą, saugojimą vykdyti nepažeidžiant konstrukcijų ir nudažytų paviršių. Konstrukcijų numetimas nuo transporto priemonių yra draudžiamas.

Sandėliuojant ir kraunant konstrukcijas transportavimui, jos turi būti sukrautos patvariai per tarpines, kad išvengti deformacijų, o daugiaeiluose paketuose tarp elementų sudėtos tarpinės turi būti vienoje vertikalėje su apatiniais padėklais [6].

#### **Konstrukcijų surinkimas ir montavimas**

Prieš surenkant ar montuojant, konstrukcijos turi būti nuvalytos nuo purvo, sniego, ledo, tepalų, dažų, rūdžių, o apdirbant smėliasrove pašalinti valcavimo liekanas. Montuojant sijas nivelyru patikrintos kolonos viršaus altitudės, ant kurios bus remiamos sijos. Paruošiama kolona sijų atrėmimui, pažymimos ašys, tikrinami sujungimo varžtai (jeigu yra) ir kt.

Montuojant konstrukcijas būtina laikytis šių reikalavimų: pastovumo ir nekintamumo sumontuotų statinio konstrukcijų dalies per visą montavimo periodą; montuojamų konstrukcijų pastovumo ir tvirtumo esant montažinėms apkrovoms; užtikrinti saugų montavimo, statybos ir specialiųjų darbų vykdymą; montavimą pradėti nuo plokščių ar erdvinių pastato, statinio konstrukcijų kur yra standumo ryšiai.

Kad užtikrinti konstrukcijų pastovumą montavimo eigoje, reikia laikytis eiliškumo montuojant vertikalius, horizontalius konstrukcijos elementus, pastovius ar laikinus ryšius numatytus brėžiniuose ar darbų vykdymo projekte.

Prieš atkabinant nuo kablo montuojamus elementus juos būtina patikimai sutvirtinti varžtais, kaiščiais, prikabinant suvirinimo būdu, pastatant pastovius ar laikinus ryšius, atramas, atotampas ir t.t. numatytus darbų vykdymo projekte.

Kiekis, išmatavimai ir prikabinimo siūlės ilgis, sujungimuose atliekamuose suvirinimo būdu

ir laikančiuose apkrovas turi būti paskaičiuojama. Suvirinamuose sujungimuose nelaikančiuose apkrovų montavimo metu prikabinimo siūlių ilgis turi būti ne mažesnis kaip 10% projekcinio montažinio sujungimo, bet ne mažiau kaip 50 mm.

Galutinis suvirinimas, kniedijimas, pastovių varžtų užtempimas atliekamas tik patikrinus ar teisingai sumontuoti (surinkti) visi elementai ir konstrukcijos.

Metalinės konstrukcijos **privalumai:**

- *Lengvumas ir transportabilumas* - lyginant su gelžbetoninėmis konstrukcijomis ši daug lengvesnė, todėl plienas lengviau transportuojamas.
- *Ilgaamžiškumas* - pasiekiamas tada, kai konstrukcija yra padengiama tam tikromis medžiagomis, pavyzdžiui, dažais ir tinkamai eksploatuojama.
- *Suvirinamumas* - metalo savybė, kuri leidžia konstrukcijoms jungtis tarpusavyje, bei išgauti konstrukcijos reikiamas formas.
- *Greitas montavimas* - visos konstrukcijos yra pagaminamos gamykloje, todėl statybvietėje pastačius į projektinę padėtį belieka sujungti tarpusavyje. Nereikia papildomo laiko laukti kol konstrukcija taps reikiamo stiprio.

Metalinės konstrukcijos **trūkumai:**

- *Mažas atsparumas korozijai* - plienas paveiktas atmosferos poveikių oksiduoja ir atsiranda korozijos grėsmė. Korozijos išvengti galima keliais būdais: svarbus metalo konstrukcinis parinkimas, metalų paviršių apdirbimas; naudojamos įvairios metalų dangos.
- *Mažas atsparumas kaitrai*, metalas gerai praleidžia šilumą, todėl pradeda lydintis ir prarandamas konstrukcijos stabilumas ir stiprumas. Kad konstrukcija kuo ilgiau išliktų reikiamų savybių jos paviršius dengiamas tam tikrais dažais.
- *Papildomos išlaidos apsaugai nuo ugnies, korozijos*, papildomos priemonės, kaip dažai lakai ir kt. pagerina konstrukcijos savybes, bet konstrukcijos savikaina tampa didesnė.

### 1.3. Kompozicinės konstrukcijos

Apjungus skirtingų rūšių medžiagas galima gauti taip vadinamas kompozicines medžiagas, pasižyminčias specifinėmis savybėmis. Kompozicine konstrukcija galime vadinti ir gelžbetoninius gaminius, kuriuos sudaro betonas ir armatūra (plienas). Ši konstrukcija atsirado, kai imta bandyti išgauti geresnių betono savybių. Kadangi betonas nedirba tempimui jis perima gniuždymo įtempius, o armatūra perima tempimo įtempius ir papildo konstrukcijos savybes.

Darbe bus plačiau nagrinėjamos konstrukcijos, kurios gautos apjungus šias dvi medžiagas: betoną ir metalą.

Kompozicinės kolonos montuojamos pagal 1.1.2. skyriuje esamą schemą, žiūrėti 1.3 pav. Visų kompozitinių konstrukcijų privalumas - mažesnio skerspjūvio konstrukcijos, išlaikant tas pačias apkrovas. Surenkamoms konstrukcijoms sujungti naudojamos lanksčios jungtys, todėl konstrukcijos tampa masyvesnės. Tačiau apjungus surenkamąsias plieno konstrukcijas, kurios statybos aikštelėje užpildomos betono mišiniu, galima pastatyti įvairių architektūrinių sumanymų pastatą [11].

Galimi kompozitinių kolonų jungimo būdai:

- Sijos tvirtinamos prie kolonų naudojant *konsoles arba inkarinius varžtus* (1.9 pav.);
- Sijos tvirtinamos ant *kolonos viršaus* (1.10 pav.);
- Kai *deltabeam* kompozicinės sijos naudojamos su kompoziciniu ar plieniniu rėmu, jungtys tarp sijų ir kolonų *įrengiamos su varžtais arba virinant* (1.11 pav) [12].

Sijos ir kolonos imtos jungti nenaudojant gėmbių, kai sija į koloną remiama per specialias plienines įdėtines detales/konsoles (1.9 pav.). Šios detalės parenkamos iš detalių gamintojų katalogų pagal jų laikomąją galią ir iš anksto įstatomos į elementus jų gamybos metu. Taip užtikrinama tiksli šių detalių projektinė padėtis. Toks jungimo būdas montuotojams taip pat nėra sudėtingas, o architektams nereikia rūpintis, kaip paslėpti kolonų gėmbes – jų paprasčiausiai pastato karkase nebelieka [8].



1.9 pav. Konsolės gaminys, kuris montuojasi į koloną



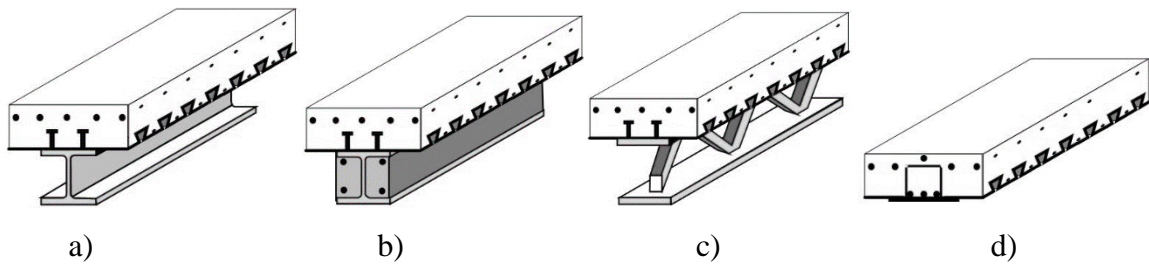
1.10 pav. Sijos tvirtinamos ant kolonos viršaus



1.11 pav. Jungimas varžtais

### 1.3.1. Kompozicinės sijos

Kompozicinės sijos susideda iš pagamintų plieno profilių, betono ir sujungimo įdėtinių detalių. Galimos įvairių tipų kompozicinės sijos (1.12 pav.):



1.12 pav. Kompozicinių sijų schemas [7]

Darbe pasirenkamas nagrinėti 1.12 pav. d) prototipas, kuris gaminamas ir naudojamas šiuolaikinėje statyboje.



1.13 pav. Kompozitinės sijos metalinis karkasas (Gaminamas Švedijoje)[13]



1.14 pav. Kompozitinės sijos metalinis karkasas (gaminamas Lietuvoje „Deltabeam“)[12]

Šių dviejų nagrinėjamų kompozicinių sijų ( 1.13 pav., 1.14 pav. ) principas ir modelis yra toks pat, tik skiriasi šiek tiek gaminio dizainas ir forma. Kompozicinių sijų pranašumas, pasireiškiantis apjungus kartu betono ir plieno geriausias savybes leidžia projektuoti didelius tarpatramius, kuriant lengvai transformuojamas atviras erdves. Daugiau lieka laisvės projektuoti pastato vidaus erdvę, lyginant su įprastomis sijomis. Tai labai praktiškas sprendimas tinkamas daugiaaukščiams statiniams [13].

Kompozitinė sija - tai iš plieninių lakštų suvirinta uždaro profilio sija dar gali būti su kiaurymėmis šoninėse sienelėse arba be kiaurymių. Sijos vidus statybos metu užpildomas betono mišiniu. Betonavimo procesas šiose sijose yra pakankamai greitas, nes sijos viršutinėje dalyje esančios skylės leidžia greitai pasišalinti orui. Sijoje (1.14 pav.) sukibimą tarp metalinės sijos ir betono užtikrina šoninėse sienelėse esančios kiaurymės.

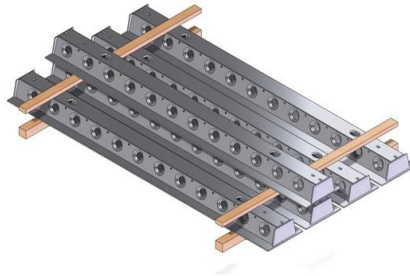
Gaisro atveju apatinė sijos plokštė gana greitai netenka laikomosios galios, tačiau tuomet apatinėje sijos zonoje veikiančius įtempimus atlaiko armatūros strypai, kuriuos nuo temperatūros poveikio apsaugo atitinkamas betono sluoksnis.

Dėl ypatingos kompozicinių sijų karkaso konstrukcijos, kurios montavimo metu sija „pasislepia“ perdangoje, sutaupoma papildomos erdvės pastato viduje. Taikant tokį sprendimą viename aukšte sutaupoma mažiausiai apie 15 cm. Tokios konstrukcijos leidžia sutaupyti nemažai įprastai statyboms skiriamų lėšų.



## Sijų montavimas

Kompozitinės sijos matoma apatinė dalis yra nudažyta antikoroziiniu gruntu. Ilgai sandėliuojant sijas, jos turi būti uždengtos. Mediniai tašeliai yra dedami po sijomis (1.15 pav.), kad apsaugoti paviršiaus padengimą. Kai sijos sandėliuojamos rietuvėse, turi būti užtikrinta jų laikomoji galia ir paviršiaus horizontalumas.



1.15 pav. Kompozicinių sijų karkasų sandėliavimas

Kompozitinės sijos gali būti keliamos ir pervežamos naudojant įprastinius kėlimo įrenginius, tokius kaip kranai ir šakiniai krautuvai. Kiekvienos kompozitinės sijos svoris yra nurodytas ant gaminio lipduko priklijuoto ant sijos arba gaminio brėžinyje. Sijos turi būti keliamos už kėlimo skylių, išdėstytų viršutinėje juostoje simetriškai sijos masės centrui. (1.16 pav.) Turi būti pranešta apie maksimalų leistiną grandinės kėlimo kampą. Tam tikrais atvejais, kai nėra kėlimo skylių, sijos gali būti keliamos grandinėmis užkabintomis per sijos sienelės angas. Kai kuriais atvejais trečia grandinė yra reikalinga tam, kad pakelti kompozitinę siją ir išlaikyti jos pusiausvyrą. Pavyzdžiui, šios sijos su plačiais klojiniais turėtų būti keliamos naudojant kėlimo skyles, o trečia grandinė turi būti pritvirtinta prie klojinio [14].



1.16 pav. Kompozicinės sijos karkaso pakėlimas

Kompozitinės sijos yra sujungiamos pagal montavimo planus ir jungimo mazgus. Jungimo mazgai yra nurodyti kiekvieno projekto konstrukcijų planuose. Intarpai ir išlyginimo plokštelės turėtų būti sudėtos pagal projekto dokumentaciją. Kartu su kompozitinėmis sijomis pristatomos tik tos montažinės detalės, kurios sujungia sijas tarpusavyje.

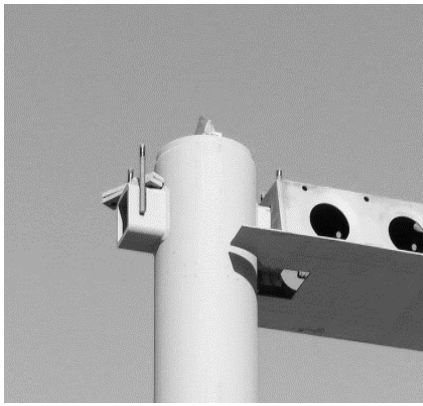
Sijos turi būti sujungtos tarpusavyje ir prijungtos prie kitų konstrukcijų, prieš išdėstant išramstymo statramsčius ir perdangų gaminius. Jeigu atliekami suvirinimo darbai statybos aikštelėje, tai suvirinimo procesas ir suvirintojų kvalifikacija turi atitikti projekto dokumentacijos nurodymus.

Kai montuojamos nekarpytos schemas kompozitinės sijos, kiekvienos sijos padėtis ir bendras sijų linijos ilgis turi būti patikrintas prieš užveržiant varžtus mazguose. Karpytos sijos schemas galinės atramos privalo būti apsaugotos nuo pakilimo montavimo metu.

Išlyginimo plokštelės yra dedamos ant gelžbetoninių konstrukcijų taip, kad kontaktinių įtempimų poveikis liktų armatūros apkabų perimetro viduje. Kraštų nuskėlimų rizika gali būti sumažinta, padarant nusklembtas briaunas betoninių konstrukcijų kraštuose. Nerekomenduojama naudoti neopreną tarp kompozitinės sijos ir atraminės konstrukcijos

Išramstymas turi būti atliktas prieš montuojant perdangos gaminius pagal projekto nurodymus. Sijos turi būti pritvirtintos prieš jų išramstymą pagal montažinius planus ir jungiamuosius mazgus. Statramsčių padėtis bei apkrovos į statramsčius turi būti nustatytos iš inžinieriaus - konstruktoriaus nurodymų. Statramsčių stabilumas privalo būti patikrintas po jų sumontavimo. Pagrindas statramsčių atrėmimui taip pat turi būti patikimas ir tvirtas. Statramsčiai turi būti sumontuoti kiek galima arčiau sijos atramos. Statramsčiai turi būti sudėti apkrautoje sijos pusėje tiesiai po sijos sienele. Statramsčiai gali būti nuimti tik tada, kai siūlių užpildymo betonas ir siją užpildantis betonas pasiekia reikiamą stiprumą [14].

Kompozicinės sijos metalinis karkasas gaminamas gamykloje ir transportuojamas į statybvieta. Statybvietaje sijos karkasas pakeliamas į projektinį aukštį ir užtvirtinamas. Prie kolonų šių sijų tvirtinimas vyksta per inkarinę armatūrą (1.20 pav.), varžtus (1.21 pav.) arba per įdėtines detales/gembes (1.17 pav., 1.18 pav., 1.19 pav.). Jungiant inkarine armatūra sijos karkaso apatinėje plokštėje padaromos skylės, kad montavimo metu per tam skirtas skylės užsimautų armatūra ir taip sujungtų konstrukcijas tarpusavyje. Jungimas per įdėtines detales/gembes pasižymi tuo, kad jų forma sąlygoja tiesias klojinio sienas, o varžtais prisukama atrama užtikrina puikų reguliavimą [12].



**1.17 pav.** Įdėtinė detalė/gembė kolonoje



**1.18 pav.** Įdėtinė detalė kolonoje (kolonos viduryje)



**1.19 pav.** Įdėtinė detalė kolonoje (kolonos viršuje)



**1.20 pav.** Jungimas inkaravimo būdą



**1.21 pav.** Varžtinė jungtis

Ant šių kompozicinių sijų karkaso toliau lengvai uždedamos reikiamos perdangos plokštės. Ir seka betonavimo darbai, kurie galutinai užpildo visus esančius tarpus sijoje ir tarp perdangos plokščių.

Kompozicinių sijų užpildymas betono mišiniu vyksta kartu su perdangų betonavimu:

- Pirmiausia reikia įsitikinti, kad sija yra švari, klojiniai ir armatūra pastatyti į reikiamą padėtį.
- Pirmas užpildymas betono mišiniu galimas per skylės viršutinėje plokštėje iki šone esančių skylių. Toliau betonavimas vyksta tik iš vieno sijos šono. Taip pat betono mišinys kartas nuo karto turi būti tankinamas. Norint įsitikinti ar sija visiškai užpildyta betono mišiniu reikia pažiūrėti į priešingo šono skylės, turėtų būti nelikę oro tarpų.
- Betono mišinio klojimas gali vykti ir per viršutinės sijos skylės, tačiau tai ilgiau užtrunka, nes betonavimo metu lėčiau oras pasišalina iš sijos karkaso, arba reikalingas klojinių įrengimas, kuris riboja betonavimo sąlygas [12].

Šis betonavimo procesas sumažintas iki minimaliausios trukmės statybvietyje, norint kad darbai vyktų sparčiau ir optimaliau. Todėl šis kompozicinių sijų pasirinkimas pranašesnis už monolitines konstrukcijas.

Kompozicinės sijos **privalumai:**

- *Sumažėja skerspjūvis* - estetiškiau atrodo lubos, bei praktiškiau panaudojamos, pastato aukštis gali būti sumažinamas iki 15 cm.
- *Ilgėsnis tarpatramis* - šios sijos privalumas, su tomis pačiomis apkrovomis galimas didesnis tarpatramis, nei su kitomis sijomis.
- *Spartesnė statyba* - pasireiškia tuo, kad dalis gaminio pagaminta gamykloje, o kiek įmanoma mažiau įrengimo darbų palikta statybvietyje (sumontavimas ir užpildymas betono mišiniu), tuo sutaupoma laiko, lyginant su monolitinėmis konstrukcijomis.
- *Atsparumas ugniai* - šios sijos neatspari ugniai vieta yra apatinė sijos metalinė plokštė, kuri nepadengiama apsauginiu betono sluoksniu, bet šiose nagrinėjamosiose sijose ši problema išspręsta. Apatinėje sijos zonoje veikiančius įtempius atlaiko armatūros strypai, kuriuos nuo temperatūros apsaugo reikiamas betono sluoksnis.
- *Vietos taupymas* – šildymo, vėdinimo oro kondicionavimo instaliacija įrengiama sijose/grindyse.
- *Išgaunamos lenktos formos* – šios sijos pasižymi geru dizainu, kadangi lengva išgauti fasado lenktą paviršių (1.22 pav.)



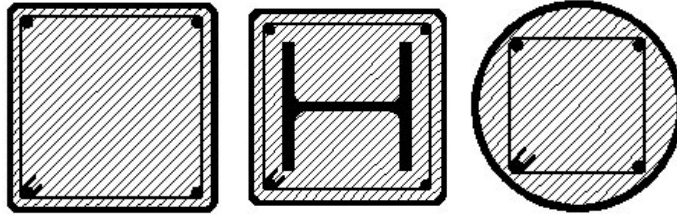
1.22 pav. Lenktų formų sijų pavyzdžiai

Kompozicinės sijos **trūkumai:**

- *Reikalingi klojiniai* - lyginant su metalinėmis sijomis, kompozicinės sijos turi būti dar papildomai užpildytos betono mišiniu statybos aikštelėje, šios darbo sąnaudos reikalauja papildomų išlaidų.

### 1.3.2. Kompozicinės kolonos

Nagrinėjamos kompozicinės kolonos gaminamos iš plieninio vamzdinio profilio su armatūriniu karkasu viduje. Vėliau objekte kolonos užpildomos betono mišiniu. Kolonos būna stačiakampės, kvadratinės ir apvalios iš standartinių vamzdinių profilių (1.23 pav.).



1.23 pav. Įvairių formų ir plieninio karkaso kompozicinės kolonos schemas [15]

Šių kolonų įrengimas vykdomas panašiai kaip ir kompozicinių sijų, kadangi į statybietę atvežami metaliniai karkasai, o statybietėje vykdomi montavimo ir betonavimo darbai.

Kompozicinės kolonos betonuojamos iš viršaus į apačią arba iš apačios į viršų. Iš viršaus į apačią betonuojamos kolonos, kai betono mišinys paduodamas iš kolonos viršaus, o betonavimas vyksta sluoksniais ir kiekvienas sluoksnis tankinamas. Betonuojant iš viršaus į apačią svarbu: pilti betono mišinį iš ne didesnio nei 3 m aukščio; stengtis betonuoti ne aukštesniais nei 400...500 mm betono mišinio sluoksniais.

Kai betono mišinys paduodamas iš kolonos apačios, naudojamas susitankinantis betono mišinys (aprašyta 1.1.2 skyriuje). Per skirtą angą kolonos apačioje betono mišinys pumpuojamas betono siurblio žarna į koloną, kol kolona pilnai užpildoma. Betonuojant atsižvelgiama į visas rekomendacijas betono mišiniui, bei jo padavimui į koloną.

Kompozitinių kolonų **privalumai**:

- *Nereikia apsaugoti kampų* - jei koloną supa metalinis karkasas, lyginant su gelžbetoninėmis kolonomis tai pranašumas.
- *Atsparumas ugniai* - gaisro metu išilęs metalinis karkasas perduoda šilumą esančiam betonui, todėl metalinis kolonos „apvalkalas“ taip greit neįkaista ir nepraranda stiprumo. Praradus stiprumą kolonos stabilumą kurį laiką užtikrina kolonoje esanti armatūra.
- *Pasižymi stiprumu ir liaunumu* - reikalingos mažesnio skerspjūvio kolonos su tomis pačiomis stiprumo savybėmis ir gebėjimu atlaikyti tas pačias apkrovas.
- *Nereikalingi klojiniai* - kai kompozicines kolonas supa metalinis karkasas aplink, jis atlieka ir klojinio vaidmenį, todėl statybos metu sutrumpėja laikas, kuris turėtų būti skirtas klojinių įrengimui, taip pat sumažėja montavimo išlaidos.

Kompozitinių kolonų **trūkumai**:

- *Didelės išlaidos medžiagoms.*
- *Papildoma metalo paviršiaus apsauga, jas eksploatuojant agresyvioje aplinkoje.*
- *Paviršiaus dažų pažeidimas transportavimo, montavimo metu.*

## 2. MIŠINIŲ REOLOGINĖS SAVYBĖS

### 2.1. Cementinių mišinių reologinės savybės

#### 2.1.1. Reologija

Reologijos teorinis aspektas tai santykis tarp medžiagos vidinės struktūros ir deformacijos savybių. Pagrindinės betono mišinio reologinės savybės yra **ribiniai šlyties įtempiai** ir **klampa**..

**Ribiniai šlyties įtempimai** – tai šlyties įtempimai, sukeltys struktūrinio skysčio ar mišinio tekėjimą. Šlyties greitis – šlyties deformacijos pokyčio greitis laike. Skaitine reikšme jis lygus dviejų sluoksnių, nutolusių vienu ilgio vienetu, greičių skirtumui.

**Klampa** – medžiagos savybė priešintis tekėjimui, tai yra vieno sluoksnio slinkimui kito sluoksnio atžvilgiu. Klampa pasireiškia dėl suardytos struktūros elementų pasipriešinimo judėjimui. Kreivė, vaizduojanti tekėjimo šlyties greičio priklausomybę nuo šlyties įtempimų, vadinama tekėjimo kreive.

Visi skysčiai/mišiniai turi tekėjimo pasipriešinimą, tačiau kuo skystis/mišinys mažiau klampus tuo lengviau jis teka. Mišinių reologinės savybės nustatomos eksperimentiniu metodu, tai yra naudojant specialios konstrukcijos viskozimetrus.

Reologijos sampratą apibūdinančios sąvokos:

<b>Kietoji mechanika</b>	<b>Elastiškumas</b> - apibūdina medžiagos formos grįžimą į pradinę padėtį po įtempimų pašalinimo.	<b>Reologija</b> - medžiagos vidinės struktūros ir deformacijos savybių tyrimai
	<b>Plastiškumas</b> - apibūdina medžiagos nuolatinį deformavimąsi po įtempimų.	
<b>Skysčių mechanika</b>	<b>Ne Niutono skysčiai</b> - nepatiria deformavimosi kaitos proporcingai šlyties įtempiams.	
	<b>Niutono skysčiai</b> - patiria deformavimosi kaitą proporcingai šlyties įtempiams.	

[16]

## 2.1.2. Medžiagos savybės

**Tamprumas (kietiems kūnams).** Remiantis Huko dėsnio deformuoto kūno tamprumo jėga proporcinga kūno deformacijos laipsniui ir nukreipta priešingai deformuoto kūno dalelių poslinkiui kitų dalelių atžvilgiu (formulė 2.1).

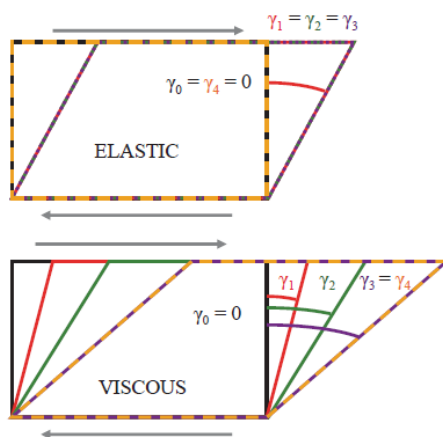
$$F = -k \cdot x \quad (2.1)$$

Elastingumas neturi priklausomybės nuo laiko, todėl įtempiai yra akimirksniu atlyginami. Medžiagoms, kurioms galioja Huko dėsnis žinomas kaip linijinis elastingumas. Tačiau tai nėra tobula elastinė medžiaga, nes bet kokia medžiaga pasiduos ilgai deformuojantis (kai apkrova bus pašalinama), tačiau neperžengiant Huko dėsnio ribų vis dar galioja kietosioms medžiagoms [17].

**Plastiškumas.** Jis apibūdinamas smūginiu tūsumu. Plastiška medžiaga visada išlieka savo formos, sugrįžta į pradinę padėtį iki takumo ribos. Stiprumui didėjant mažėja medžiagos plastinės savybės ir medžiaga nebesugrįžta į savo pradinę būseną [17].

**Klampa (skystoms medžiagoms).** Klampa apibūdina skysčio tekėjimo pasipriešinimą. Kasdieninėmis sąlygomis klampą galima suvokti kaip „tirštas“ ir „skystas“. Tarkim vanduo turintis mažesnę klampą - „skystas“, o medus, turintis didesnę klampą - „tirštas“ [17].

Skirtumas tarp plastiškos ir klampios medžiagos puikiai matosi 2.1 pav. Dėl pastovių įtempių medžiaga deformuojasi, deformacijos kampas yra konstanta. Kai įtempiai pašalinami, plastiška medžiaga grįžta į pradinę būseną, o klampi medžiaga lieka deformuotis toliau.



2.1 pav. Skirtumas tarp plastiškos ir klampios medžiagos [17]

Dažniausiai naudojami trys modeliai, apibūdinantys cementinės tešlos reologines savybes, tai **Niutono** modelis (anglų kalboje *Newtonian model*), **Binhamo** modelis (anglų kalboje *Bingham model*) ir **Herschel - Bulkley** modelis (anglų kalboje *Herschel and Bulkley model*).

**Niutono skystčiai.** Niutono skystis tai yra skystis, kurio įtempiai lyginant su deformacija yra linijinė kreivė. Proporcingumo konstanta yra klampa ( formulė 2.2):

$$\tau = \eta \frac{du}{dz} = \eta \dot{\gamma} \quad (2.2)$$

čia:  $\tau$  – šlyties įtempiai (Pa);

$\eta$  – klampa (Pa s);

$\frac{du}{dz}$  – greičio išvestinė, statmena šlyties kryptčiai arba šlyties greičiui  $\left(\frac{d\gamma}{dt}\right)$ .

Ne Niutono skysčiai yra tie, kurių šlyties įtempiai ir deformacija gali būti pavaizduota tiesinė, netiesinė ar ne nepriklausyti nuo laiko, todėl klamos koeficientas gali būti netinkamas apibūdinti medžiagos elgesį [17].

Struktūriniai skysčiai laikomi ne Niutono skysčiais. Prie struktūrinių skysčių yra priskiriamos cemento tešlos, skiediniai ir betono mišiniai, kurių reologinės savybės nustatomos naudojant specialios konstrukcijos viskozimetrus.

**Binghamo modelis.** Priešingai nei Niutono skysčiai, kur reikalingas tik vienas parametras aprašyti mišinio tekėjimą, šiame modelyje reikalinga identifikuoti du parametrus - takumo įtempius ir plastinę klampą (formulė 2.3):

$$\tau = \tau_0 + \mu_p \dot{\gamma} \quad (2.3)$$

čia:  $\mu_p$  – plastinė klampa (Pa s);

$\tau_0$  – ribiniai šlyties įtempiai (Pa);

**Herschel – Bulkley modelis.** (Formulė 2.4)

$$\tau = \tau_0 + a \dot{\gamma}^b \quad (2.4)$$

čia:  $\tau_0$  – ribiniai šlyties įtempiai (Pa);

$\dot{\gamma}$  - šlyties greitis (deformacijos greitis);

$a$  – pastovus koeficientas;

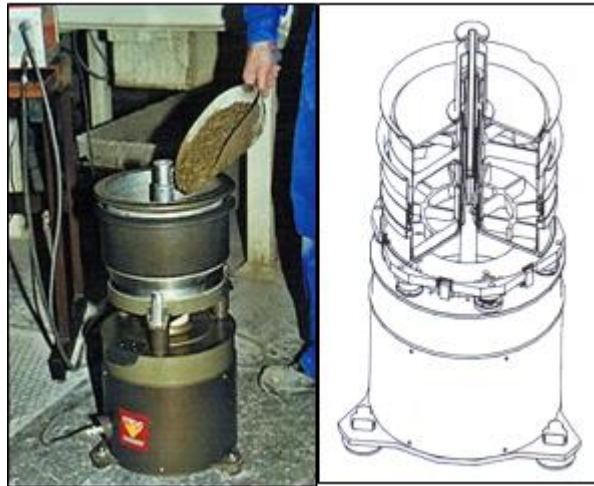
$b$  – tėkmės savybių indeksas [18].

Cemento tešlų, skiedinių ir betono mišinių reologinių savybių nustatymui naudojami specialios konstrukcijos viskozimetrai, kurie skiriasi pagal savo veikimo principą. Vienas iš tokių viskozimetrų yra BTRHEOM viskozimetras, pagamintas Prancūzijoje. Šis viskozimetras pasižymi tuo, kad gali išmatuoti ne tik vibruojamų ir nevibruojamų betono mišinių reologines savybes – ribinius šlyties įtempius ir klampą, bet ir išmatuoti mišinys-plienas sąlyčio zonos trinties parametrus.

Viskozimetras pavaizduotas 2.2 pav., 2.3 pav. Šis viskozimetras susideda iš dviejų pagrindinių cilindrių, kurių vienas nejudamai įtvirtinamas prietaiso stovė (aukštis 300 mm, skersmuo 300 mm), o kitas cilindras (aukštis 240 mm, skersmuo 270 mm) sukasi apie ašį nejudančio cilindro viduje. Į besisukančią cilindrą įstatomas ratas su stipiniais, atstojančiais



mentės. Šiuo prietaisu galima nustatyti vibruojamų ir nevibruojamų mišinių reologines savybes. Bandymas bus atliekamas sukantis viršutiniam cilindriui su viduje esančiais stipiniais – mentėmis skirtingais greičiais ir matuojant atitinkamus sukimo momentus. Sukimo momentas fiksuojamas po 20 sekundžių, tuomet gaunamas stabilus šlyties greitis. BTRHEOM viskozimetru galima išmatuoti ir mišinių dilatantiškumą bei įvertinti mišinio segregaciją [19].



2.2 pav. BTRHEOM viskozimetras

Programinė įranga, sukurta BTRHEOM viskozimetru, automatiškai apskaičiuoja pagrindines Bingham modelio charakteristikas: ribinius šlyties įtempius ir klampą. Be to, programinės įrangos generuojami duomenys naudojami apskaičiuojant tekėjimo kreives pagal Herschel Bulkley modelį. Bandymo metu yra fiksuojamas sukimo momentas  $\Gamma_0$  ir sukimosi greitis  $N$ , kurie yra susiję pagal formulę 2.5, kur  $A$  ir  $b$  yra empirinės konstantos:

$$\Gamma = \Gamma_0 + AN^b \quad (2.5)$$

Lygtis 2.6 yra panaši į skysčio tekėjimo lygtį pagal Herschel-Bulkley modelį:

$$\tau = \tau_0 + a\gamma^b \quad (2.6)$$

čia:  $\tau$  – šlyties įtempiai, Pa;

$\tau_0$  – ribiniai šlyties įtempiai;

$\gamma$  – šlyties greitis, 1/s;  $a$  ir  $b$  – empirinės konstantos. ( $a$  – pastovus koeficientas, Pa  $s^n$ ,  $b$  – pastovus indeksas.

Santykis tarp šlyties įtempių ir šlyties greičio gali būti apibūdinamas Binghamo ribinių šlyties įtempimų bei plastinės klamos parametrais:

$$\tau = \tau_0 + \mu\gamma \quad (2.7)$$

čia:  $\tau$  – šlyties įtempiai;

$\mu$  – plastinė klampa. [19]

## 2.2. Tribologiniai tyrimai

**Tribologija** – tai mokslas, kuris nagrinėja tarpusavyje sąveikaujančių paviršių judėjimą vienas kito atžvilgiu, trintį tarp atskirų paviršių, dilimą ir paviršių sutepimą. Bet kuris gaminy, kur bent viena medžiaga slysta kito paviršiaus atžvilgiu ar trinasi su kitu paviršiumi yra veikiamas sudėtinių tribologinių sąveikų. Tribologija labiau taikoma nagrinėjant betono mišinio kontaktą su kietais paviršiais. Daugelis statybos inžinerijoje sprendžiamų uždavinių susiję su konstrukcijų problemomis, kurias sukelia trintis [19].

Ne išimtis ir kompozicinės kolonos - betono mišinio ir metalinio kolonos paviršiaus sąveika užpildant kompozitines konstrukcijas betono mišiniu. Todėl buvo sukurtas specialus įrenginys – tribometras, skirtas skystos medžiagos trinčiai į atitinkamą paviršių įvertinti. Tribometro veikimo principas pagrįstas tangentinių jėgų matavimu, kai tekėdamas betono mišinys sąveikauja su metaliniu paviršiumi. Daugelis mokslininkų tyrinėja sąveiką tarp betono mišinio ir kito paviršiaus.

Įvairūs tyrimai patvirtino hipotezę, kad nesukietėjusio betono reologinės savybės yra panašios kaip Bingham struktūrinių skysčių (2.1.2. skyriuje apie Binghamo modelį). Betono mišinys transportavimo vamzdžiais metu juda slysdamas skiedinio sluoksniu, vadinamu ribiniu sluoksniu (angl. boundary layer (BL)), kuris susiformuoja arti metalinio paviršiaus sienelės. Tai reiškia, kad trintis betono – metalo sąsajoje užima svarbų vaidmenį ir turi didelį poveikį pumpavimo metu [20]. Pagrindiniai aspektai:

- 1) Ribinis sluoksnis (angl. boundary layer (BL)) yra suformuotas vandens, cemento ir smulkaus smėlio dalelių, kurių skersmuo mažesnis nei 0,25 mm.
- 2) Ribinio sluoksnio storis svyruoja nuo 1 iki 9 mm, atsižvelgiant į betono mišinio sudėties parametrus.

Didinant cemento tešlos kiekį, vandens ir cemento santykį, pridėdam superplastiklių į cementą ribinio sluoksnio storis didėja, mažėja - kai didinamas smulkaus užpildo kiekis [20].

Betono mišinyje be superplastiklio atsiskiria didesnis vandens kiekis lyginant su betono mišiniu, kuriame įvestas superplastiklis [21].

Susitankinantis betono mišinys į klojinius gali būti paduodamas iš apačios į viršų. Concrete Research of the Ghent universitete buvo atlikti bandymai su šiuo betono mišiniu. Tyrimo metu buvo siekiama nustatyti maksimalų susitankinančio betono mišinio slėgį į klojinių sieneles.. Mokslininkai atliko du palyginamuosius tyrimus - realų bandymą, kai susitankinantis betono mišinys į klojinius paduodamas iš apačios į viršų, ir simuliacijas kompiuterinių programų pagalba, atliekant skysčių dinaminis skaičiavimus. Kai betono mišinys paduodamas į klojinius iš apačios į viršų, tai vyksta hidrostatinis klojinių spaudimas, todėl čia atsiranda hidrostatiniai

nuostoliai. Todėl realiu bandymu slėgis į klojinių sienelės buvo didesnis nei apskaičiuotas. tai dėl Tam įtakos turėjo papildomai vykstantys hidrostatiniai nuostoliai. Todėl šio betono mišinio padavimas į klojinius turi būti nuoseklus procesas, taip pat turi būti teisingai nustatyti betono mišinio reologinių savybių parametrai [3].

Autoriai [22] nagrinėjo betono mišinio trinties poveikį į klojinio sienelės paviršių ir betono mišinio sukeliama slėgio įtaką į skirtingo skersmens kolonos klojinio sienelės. Tyrimo metu buvo nustatytos šios tendencijos: trinties poveikio koeficientas nėra vyraujantis veiksnys, matuojant trinties įtempiams, tačiau didelė įtaka per laiką pasireiškė dėl sankibos jėgų; trinties įtempiai atsiranda daugiausiai dėl sankibos ir priklauso nuo laiko; trinties įtempiai nepriklauso nuo betono mišinio klojimo greičio; platesni klojinių skerspjūviai skatina didesnę trintį; trinties įtempiai sumažina betono mišinio sukeliama slėgio įtaką į klojinio sienelės ir sumažina slėgio poveikio laiką.

Autoriai [23] atliko betono mišinio reologinių savybių matavimus BTRHEOM viskozimetru. Nustatytas reologinių savybių vertes palygino su reologinėmis savybėmis, nustatytomis, panaudojant kitus viskozimetrus - CEMAGREF-IMG, LAFARGE. Tyrimų rezultatai, gauti CEMAGREF-IMG viskozimetru, parodė panašias ribinių šlyties įtempių vertes, o plastinės klampos vertės šiek tiek skyrėsi. Autoriai manė, kad to priežastis yra stambių užpildų nusėdimas CEMAGREF-IMG viskozimetre. Kitas palyginimas, panaudojant LAGRAFE viskozimetrą, parodė gerą betono mišinio reologinių savybių verčių, gautų panaudojant BTRHEOM viskozimetrą, koreliaciją. Šis tyrimas parodė, kad betono mišinio reologinių savybių vertės, nustatytos skirtingos konstrukcijos viskozimetrais, gali kisti tam tikrose ribose.

Pasak autoriaus [24], sukeliama slėgis į įprastą betono mišinį vamzdžiuose priklauso nuo pumpavimo charakteristikų, vamzdžio skersmens bei betono reologinių ir tribologinių savybių.

Pagal autorius [25] užpildų dydis, granulimetrinės sudėtis, forma ir paviršiaus struktūra turi reikšmingą įtaką betono mišinio reologinėms savybėms. Optimalus santykis smulkiajame užpilde tarp smėlio frakcijų 0/1 ir 0/4 tyrimo metu buvo lygus 0,5. Šio santykio padidėjimas lėmė ribinių šlyties įtempių sumažėjimą. Optimalus santykis tarp stambių užpildų ir visų užpildų buvo 0,52. Šio santykio padidėjimas lėmė ribinių šlyties įtempių ir plastinės klampos sumažėjimą.

### 3. TIRIAMOJI DALIS

#### 3.1. Naudotos medžiagos

##### 3.1.1. Cementas

Tyrimams naudotas AB „Akmenės cementas“ pagamintas portlandcementis CEM I 42,5 R.

**3.1 lent.** CEM I 42,5 R fizikinės, mechaninės savybės bei cheminė sudėtis

Savitasis paviršius, m <sup>2</sup> /kg	410
Cemento dalelių tankis kg /m <sup>3</sup>	3050
Normalaus tirštumo tešla, %	26,5
Tūrio kitimo tolygumas, mm	0,8
Rišimosi terminai: pradžia, min.	195
Gniuždymo stipris po 2 / po 28 parų, MPa	27,1/54,0
Kaitmenys, % (masės)	5,05
Netirpmenys, % (masės)	-
Kalcio sulfatas, išreikštas SO <sub>3</sub> kiekiu, %	2,48
Chloridai, % (masės)	0,015
Šarmai, skaičiuojant Na <sub>2</sub> O ekvivalentu, % (masės)	<0,8

##### 3.1.2. Smulkusis užpildas

Smulkiuoju užpildu tyrimams naudoti Kvesų karjero 0/1 bei 0/4 frakcijos smėliai, kurių piltiniai tankiai atitinkamai yra:  $\rho=1521 \text{ kg/m}^3$  ir  $\rho=1711 \text{ kg/m}^3$ . Užpildų granulimetrinė sudėtis nustatyta pagal standarto LST EN 933-1:2012 [20] reikalavimus pateikta 3.2 lentelėje.

##### 3.1.3. Stambusis užpildas

Stambiuoju užpildu tyrimams naudotas 4/16 frakcijos žvirgždas, kurio piltinis tankis  $\rho=1657 \text{ kg/m}^3$ . Užpildų granulimetrinė sudėtis nustatyta pagal standarto LST EN 933-1:2012 [26] reikalavimus pateikta 3.2 lentelėje.

**3.2 lent.** Smulkiojo ir stambiojo užpildų granulimetrinė sudėtis.

	0/1 frakcijos smėlis	0/4 frakcijos smėlis	4/16 frakcijos žvirgždas
Sieto akučių dydis, mm	Išbyra, %		
0	0	0	0
0,125	3,2	4,6	0
0,25	28,0	17,4	0
0,5	92,5	56,0	0

1	98,1	71,9	0
2	99,9	87,7	0
4	100	97,5	0,4
8	100	100	25,4
16	-	-	93
32	-	-	100

### 3.1.4. Betono mišinio įmaišos

Tyrimams naudota kompanijos BASF „Construction Chemicals Italia Spa“ pagaminta plastifikuojanti įmaiša Glenium SKY 628, kurios fizikinės ir cheminės savybės bei dozavimas pateikti 3.3 lentelėje.

**3.3 lent.** Betono įmaišos techniniai duomenys

Betono įmaišos tipas	Įmaišos pavadinimas	Fizikinės ir cheminės savybės	Rekomenduojamas dozavimas, % cemento masės
Plastifikuojanti įmaiša	Glenium SKY 628	Polikarboksilato eterių polimerų pagrindu; gelsvas skystis; tirpalo tankis – 1,06 g/cm <sup>3</sup> ; maksimalus chloridų kiekis – 0,10 %;	0,6 – 1,4

## 3.2. Tyrimų metodika

### 3.2.1. Betono mišinio ruošimas

Betono mišinio sudėtys parinktos pagal standarto LST 1974:2012 [27] reikalavimus. Betono mišiniams ruošti buvo naudojami sausi užpildai. Betono įmaiša buvo įmaišoma į mišinius kartu su vandeniu, naudojamu mišiniams paruošti. Betono įmaišų kiekiai skaičiuoti procentais cemento masės (3.3 lentelė). Įmaišos buvo dozuojamos pagal gamintojų rekomendacijas. Tyrimo metu buvo parinktos 7 skirtingos betono mišinio sudėtys. Buvo siekiama įvertinti atskirų betono mišinio sudedamųjų dalių, tai yra santykio tarp stambiojo užpildo ir bendro užpildų mišinio kiekio, kitimo įtaka mišinio-plieno sąlyčio paviršiaus trinties parametrams (3.1 pav.).

Kontrolinė betono mišinio sudėtis pasirinkta UAB “Kauno gelžbetonis”.  
Stambiuoju užpildu mišiniui paruošti naudotas 4/16 frakcijos žvirgždas



Atitinkamu žingsniu keičiamas stambiojo užpildo (4/16 frakcijos žvirgždas) santykis su bendru užpildų mišinio kiekiu.

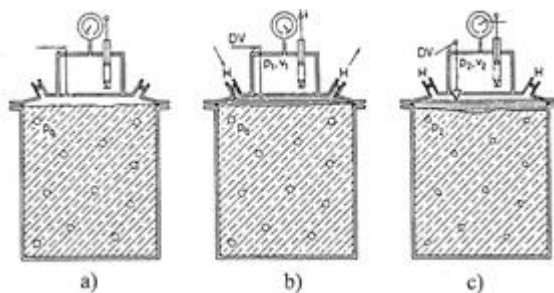
BT1-0, (0,22)	BT1-1, (0,32)	BT1-2, (0,42)	BT1-3, (0,52)	BT1-4, (0,62)	BT1-5, (0,37)	BT1-6, (0,47)
------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------

**3.1 pav.** Įprastos betono mišinio sudėties modifikavimo atskiromis sudedamosiomis dalimis eiga, vertinant įtaka mišinio-plieno sąlyčio paviršiaus trinties parametrams

Betono mišiniai buvo ruošiami laboratorinėje priverstinio maišymo maišyklėje ZYKLOS „Pemat Mischer Mixer“ apie 3 minutes dviem etapais. Pirmojo etapo metu į sudrėkintą betono maišyklę supiltas cementas, užpildai ir 2/3 vandens maišomi apie 2 minutes, o antrojo etapo metu – supilamas likęs vandens kiekis su plastifikuojančia betono įmaiša ir betono mišinys maišomas apie 1 minutę.

### 3.2.2. Betono mišinio technologinių savybių nustatymas

**Oro kiekis mišinyje** nustatomas pagal standarto LST EN 12350-7 [28] reikalavimus. Nustatant oro kiekį slėgio metodu, bandomasis mišinys sudedamas į prietaiso indą ir sutankinamas ant vibravimo stalo. Indo kraštai kruopščiai nuvalomi. Viršutinė prietaiso dalis uždedama ant indo ir sandariai prispaudžiama prie indo (3.2 pav.). Gumine kriaušė purškiamas vanduo per vieną iš ventilių H, kol vanduo pradeda tekėti per kitą ventilių H. Uždaromi ventiliai H. Pumpuojamas oras į oro kamerą viršutinėje prietaiso dalyje tol, kol manometro rodyklė pasiekia pradinio slėgio žymę. Po kelių sekundžių suspaustas oras atvėsta iki aplinkos temperatūros ir manometro rodyklė nustatoma ant nulinės žymės papildomai pumpuojant arba išleidžiant orą pagal poreikį. Šio proceso metu lengvai pastuksenamas manometras. Atidaromas pagrindinis oro ventilis (pav. DV) ir oro slėgis perduodamas betono mišiniui. Stipriai pastuksenama į indo šonus. Lengvai pastuksenus į manometrą, nuskaitomas oro kiekio rodmuo. Atidaromi ventiliai (pav. H), kad sumažėtų oro slėgis, ir nuimama viršutinė prietaiso dalis.



3.2 pav. Oro kiekio betono mišinyje nustatymo slėgio metodu prietaisas

**Šviežio betono mišinio tankis** nustatomas pagal standarto LST EN 12350-6 [29] reikalavimus. Šiame bandyme naudojamos priemonės: cilindrinis indas, vibravimo stalas, mentelė, svarstyklės. Bandymo metu betono mišinys mentele sudedamas į indą. Betono mišinys tuoj pat po indo užpildymo visiškai sutankinamas taip, kad mišinys neišsisluoksniuotų ir neatsiskirtų vanduo. Sutankinamas ant vibravimo stalo. Sutankintas mišinys sveriamas.

Šviežio betono mišinio tankis apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\rho_{\text{mišinio}} = \frac{m_{\text{užpil.indo}} - m_{\text{tušč.indo}}}{V} \cdot 100\% \quad (3.1)$$

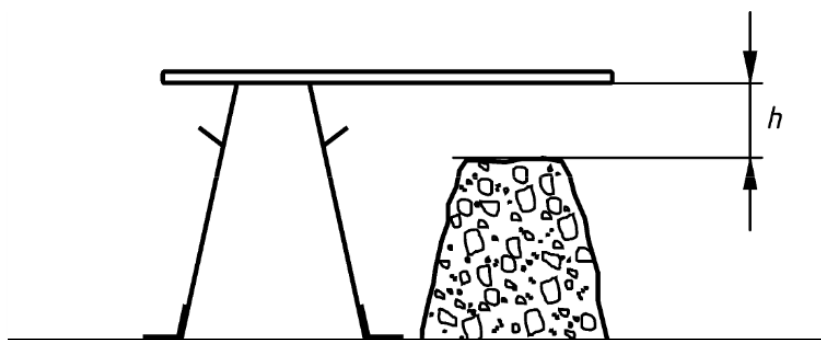
čia:  $\rho_{\text{mišinio}}$  – betono mišinio tankis;

$m_{\text{užpil.indo}}$  – užpildyto indo masė;

$m_{\text{tušč.indo}}$  – tuščio indo masė;

V – indo tūris, m<sup>3</sup>

**Šviežio betono mišinio slankumas** nustatomas pagal standarto LST EN 12350-2 [30] reikalavimus. Bandyto metu naudojama įranga: forma bandiniui suformuoti (kūgio formos); tankinimo strypas ( $\varnothing=16\pm 1\text{mm}$ ;  $l=600\pm 5\text{ mm}$ ); piltuvas (nebūtinai); liniuotė; pagrindo plokštė/paviršius; permaišymo indas; kastuvėlis; drėgnas audinys; mentelė; chronometras arba laikrodis. Sudrėkinama kūginė forma ir pagrindo plokštė. Forma pastatoma ant horizontalios pagrindo plokštės/paviršiaus. Formą pildant, ji prie pagrindo plokštės/paviršiaus pritvirtinama arba prispaudžiama, abiem kojomis primynus formos plokšteles. Forma užpildoma trimis sluoksniais, kad kiekvieno storis po sutankinimo būtų apytiksliai vienas trečdalis formos aukščio. Kiekvienas sluoksnis tankinamas 25 strypo dūriais, kurie kiekviename sluoksnio plote turi būti paskirstyti tolygiai. Apatinis sluoksnis badomas šiek tiek pakreiptais dūriais, kurių apie pusė išdėstoma spirale nuo krašto į centrą. Antras ir viršutinis sluoksniai tankinami per kiekvieno jų storį dūriais, smeigiant tik iki sutankintojo sluoksnio. I viršutinį sluoksnį betono mišinio iki jo tankinimo dedama su pertekliumi virš formos. Jei tankinant viršutinis betono mišinio sluoksnis sukrenta žemiau viršutinio formos krašto, reikia dar įdėti betono mišinio, kad perteklius virš formos visada būtų išlaikytas. Sutankinus viršutinį sluoksnį, betono mišinio paviršius sulyginamas pjaunamaisiais ir voluojamaisiais tankinimo strypo judesiais. Neužbertas betono mišinys nuvalomas nuo pagrindo plokštės/paviršiaus. Forma nuo betono mišinio bandinio nutraukiama atsargiai ją keliant vertikalia kryptimi. Betono mišinio bandinio, nutraukus nuo jo kūginę formą, suslūgimo dydis yra betono mišinio konsistencijos rodiklis, matuojamas milimetrais [31].



3.3 pav. Betono mišinio slankumo matavimas [30]

### 3.3. Betono mišinio-plieno sąlyčio paviršiaus trinties parametrų nustatymas

Betono mišinio-plieno sąlyčio paviršiaus trinties parametrams nustatyti naudotas rotacinis BTRHEOM (Prancūzija) tribometras. Tribometras ir jo veikimo supaprastinta schema pavaizduota 3.4 pav. BTRHEOM tribometras susideda iš dviejų pagrindinių cilindrų, iš kurių išorinis nejudamai įtvirtintas prietaiso stovė (vidinis skersmuo 350 mm ir aukštis 200 mm), o vidinis cilindras (išorinis skersmuo 150 mm ir aukštis 240 mm) sukasi apie savo ašį nejudančio cilindro viduje. 15 litrų tūrio tiriamasis betono mišinys yra veikiamas kirpimo jėgų tarp nejudančio ir besisukančio cilindrų. Vidinio cilindro sukimosi greitis tyrimo metu gali būti keičiamas. Betono mišinio elgsena mišinio-plieno sąlyčio sąveikoje aprašoma sekančiu modeliu [32]:

$$\tau = \tau_{0i} + \eta \cdot V \quad (3.2)$$

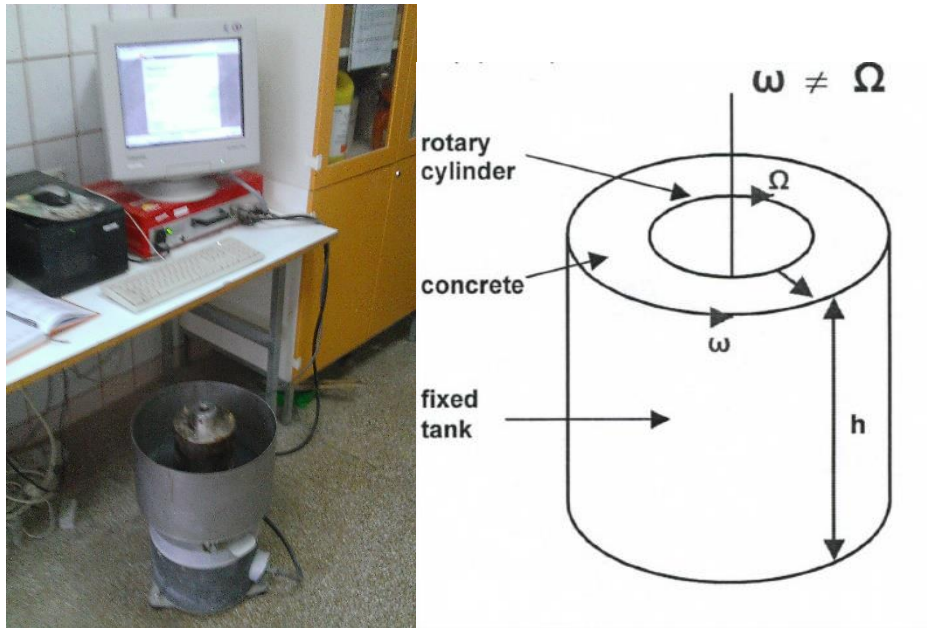
čia:  $\tau$  – šlytis sąlyčio paviršiuje, Pa;

$\tau_{0i}$  – ribinė šlytis sąlyčio paviršiuje;

$\eta$  – klampos konstanta;

$V$  – santykinis slydimo greitis, m/s. [33]





3.4 pav. BTRHEOM tribometras ir jo veikimo supaprastinta schema

Pradiniai bandymo duomenys ekrane pateikiami kaip sukimosi momento ir sukimosi greičio priklausomybė. Turėtų būti nustatyti du būdai:

- tribometre esantis tiriamasis betono mišinys bandymo metu nejuda ir yra veikiamas šlyties mišinys-plienas sąlyčio zonoje;
- vidinio cilindro sukimosi greitis yra pakankami didelis, todėl tyrimo metu dalis tiriamojo betono mišinio yra „nukerpama“.

Lygtis aprašo tarpusavio ryšį tarp sukimosi momento ir sukimosi greičio (darome prielaidą, kad betono mišinys yra Binghamo kūnas). Tai yra tos betono mišinio reologinės savybės, kurios bandymo metu apibūdina mišinio elgseną duotu metu. Tribometru nustatytos sukimosi momento ir sukimosi greičio priklausomybių kreivės leidžia apskaičiuoti trinties parametrus, atsižvelgiant į aukščiau išvardintus du būdus.

BTRHEOM tribometrui specialiai sukurta ADRHEO programinė įranga bandymo metu automatiškai skaičiuoja ne tik pagrindinius parametrus, bet ir atlieka prietaiso taravimą eliminuojant nereikalingą trintį.

Bandymo eiga:

1. Įjungiamas BTRHEOM tribometro valdymo kompiuteris ir paleidžiama programa.
2. Ant prietaiso stovo uždedamas išorinis cilindras. Į jo vidų įdedama guminė tarpinė (kad betono mišinys nepatektų po vidiniu cilindru). Į išorinio cilindro vidų ant besisukančios prietaiso ašies uždedamas vidinis cilindras. Į tarpą tarp koaksialinių cilindrų pripilama vandens ir paleidžiama prietaiso taravimo programa (įvertinama vidinio cilindro sukimosi

metu į guminę tarpinę pasireiškianti trintis, kuri bus atmesta tiriant betono mišinio-plieno sąveikos parametrus).

3. Atlikus taravimą duomenys išsaugojimo atskiru dokumentu su tam tikru plėtiniu. Išpilamas iš tribometro vanduo.
4. Paruoštas betono mišinys supilamas į tarpą tarp koaksialinių cilindrų. Išmatuojamas aukštis (mm) nuo betono mišinio paviršiaus iki vidinio cilindro viršaus bei vidinio cilindro aukštis, duomenys įrašomi į atitinkamus langelius.
5. Pasirenkami papildomi parametrai: minimalus ir maksimalus sukimosi momentai (aps/s); bandymų skaičius; serijų skaičius; taškų skaičius kiekvienoje serijoje; 15 sekundžių betono mišinio vibravimas prieš bandymą ir/arba po jo; pasirenkamas vibravimo dažnis Hz.
6. Atliekamas bandymas pagal užsiduotas sąlygas.

Metalinio paviršiaus šiurkštumo matavimams naudojamas Elcometer 224. Matavimo prietaisas padedamas statmenai matuojamo paviršiaus. Atliekami 5 matavimai ~3 cm<sup>2</sup> plote, kaskart perkeliant į kitą vietą. Gautų 5 matavimų vidurkis užrašomas į lentelę (3.6 lent.).

### 3.4. Tyrimų rezultatai

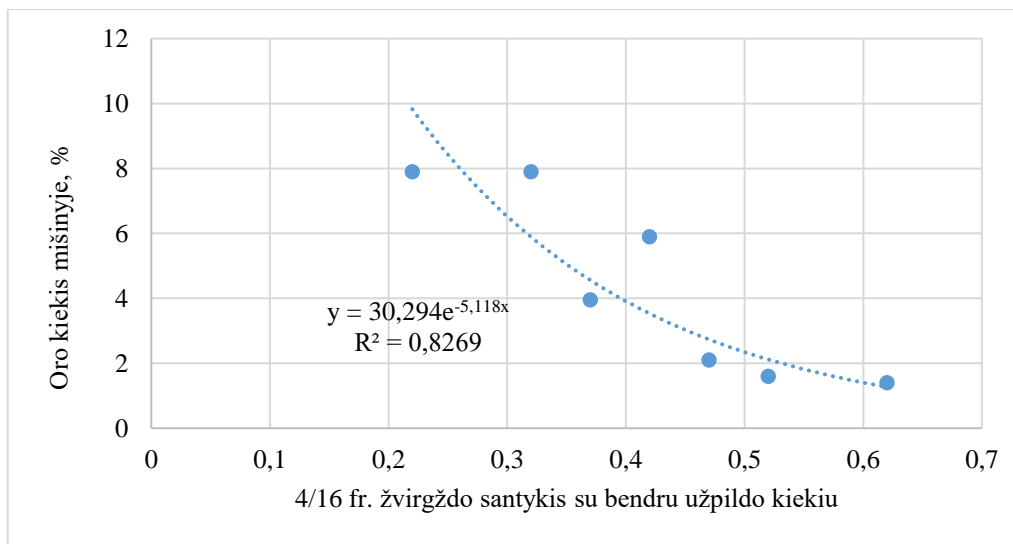
#### 3.4.1. Betono mišinio technologinių savybių kitimas

Siekiant įvertinti užpildų (tarp stambios ir smulkiosios frakcijos) kiekio įtaką betono mišinio-plieno trinties parametrui buvo modifikuojama pasirinkta kontrolinė betono mišinio sudėtis (žr. 3.1 pav.) ir parinktos septynios įprastinio betono mišinio sudėtys (žym. BT1-0 – BT1-6). Modifikuojant kontrolinę betono mišinio sudėtį buvo keičiamas santykis tarp stambiojo užpildo ir bendro užpildų mišinio kiekio: 0,22; 0,32; 0,42; 0,52; 0,62; 0,37 ir 0,47. Betono mišinių sudėtys pateiktos 3.4 lentelėje.

**3.4 lent.** Betono mišinio sudėtys BT1-0 – BT1-6

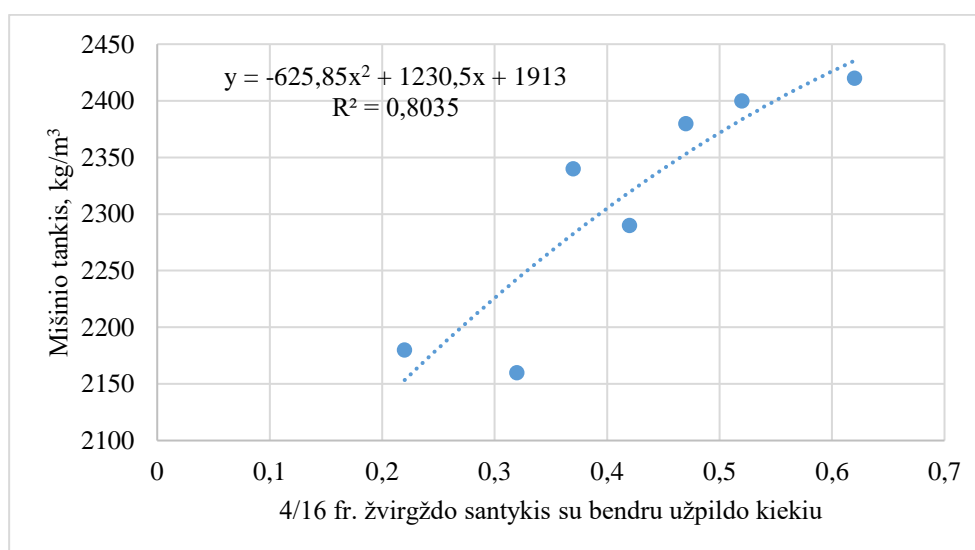
Betono mišinio sudėtis / Betono mišinio kodas	Cemento kiekis, kg	Vanduo	4/16 fr. žvirgždo kiekis, kg	0/4 fr. smėlio kiekis, kg	0/1 fr. smėlio kiekis, kg	Plast. įmaišos kiekis, l	V/C
1	2	3	4	5	6	7	8
BT1-0	330	178	417	986	492	3,74	0,54
BT1-1			607	860	429		
BT1-2			796	733	366		
BT1-3			986	607	303		
BT1-4			1175	480	240		
BT1-5			702	797	397		
BT1-6			891	671	334		

Iš 3.5 pav. matyti, kad varijuojant 4/16 frakcijos žvirgždo kiekiui mišinyje nuo 417 iki 1175 kg vienam kubiniam metrui mišinio, įtraukto oro kiekis mišinyje kinta ribose nuo 7,9 iki 1,4 %. Tai daroma prielaida, kad didėjant stambiajam užpildui (4/16 fr. žvirgždas) bendrajame užpildų mišinyje, mažėja oro kiekis mišinyje. Esant mažam įtraukto oro kiekiui į mišinį, betono konstrukcija gali tapti mažiau atspari šalčio poveikiui.



**3.5 pav.** Santykio tarp stambiojo užpildo (4/16 fr. žvirgždas) ir bendro užpildų mišinio kiekio įtaka oro kiekio kitimui

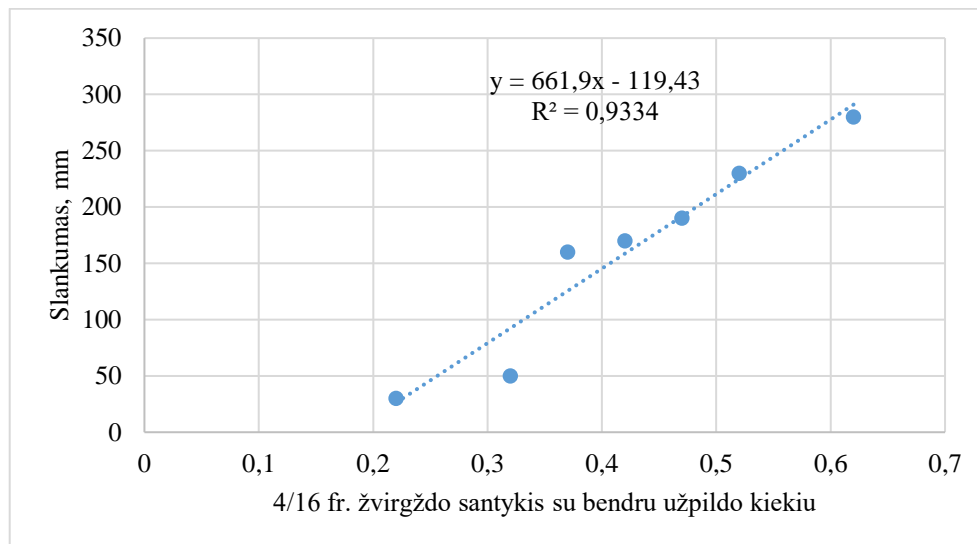
Betono mišinio tankio kitimas didinant 4/16 frakcijos žvirgždo kiekį mišinyje nuo 417 iki 1175 kg vienam kubiniam metrui mišinio tankis kinta ribose nuo 2160 iki 2420 kg/m<sup>3</sup> (3.6 pav.). Taigi didėjant stambiojo užpildo kiekiui bendrame užpildų mišinyje taip pat didėja ir mišinio tankis. Tai lemia betono konstrukcijos svorį.



**3.6 pav.** Santykio tarp stambiojo užpildo (4/16 fr. žvirgždas) ir bendro užpildų mišinio kiekio įtaka oro mišinio tankiui

Didinant 4/16 frakcijos žvirgždo kiekį mišinyje nuo 417 iki 1175 kg vienam kubiniam metrui mišinio, betono mišinio konsistencija pagal slankumą kinta ribose nuo 30 iki 280 mm (3.7 pav.). Betono mišinio konsistencija pagal slankumo klasę kinta nuo S1 iki S5 (pagal LST EN 12350-2) [30].

Kuo didesnės frakcijos užpildai, tuo betono mišinio slankumas didesnis. Čia tirtas įprastas betono mišinys, todėl slankumas kito ribose nuo 30 iki 280 mm. Susitankinančio betono mišinio konsistencija matuojama sklidumu ir kinta ribose nuo 340 iki 630 mm (F1-F6 sklidumo klasės).



**3.7 pav.** Santykio tarp stambiojo užpildo (4/16 fr. žvirgždas) ir bendro užpildų mišinio kiekio įtaka mišinio slankumui

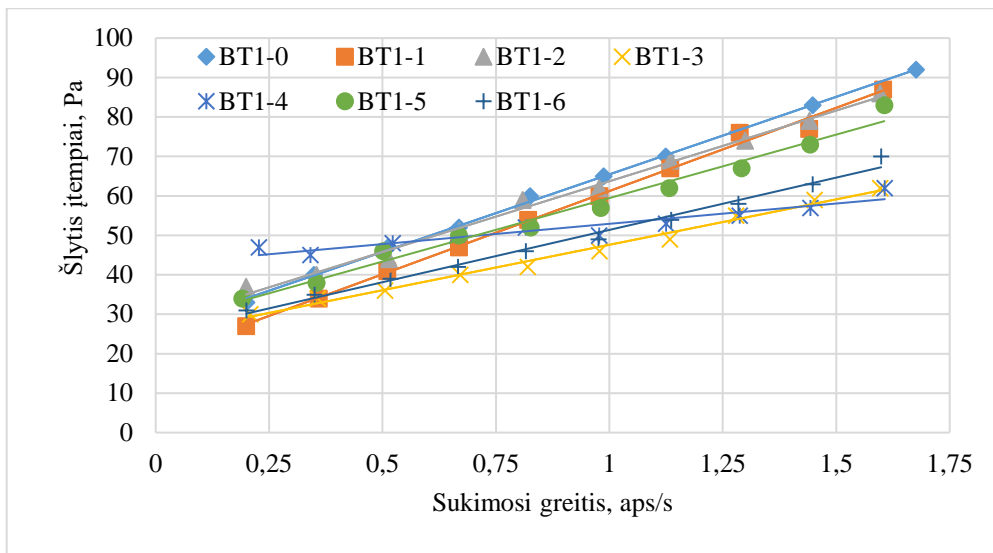
### 3.4.2. Betono mišinio sudedamųjų dalių įtaka mišinio-pieno sąlyčio paviršiaus trinties parametrams

Santykio tarp stambiojo užpildo (4/16 fr. žvirgždas) ir bendro užpildų mišinio kiekio įtaka ribinei šlyčiai sąlyčio paviršiuje bei klampos konstantai pateikta 3.5 lentelėje. Lentelėje taip pat pateiktas ribinės šlyties sąlyčio paviršiuje priklausomybę nuo klampos konstantos apibūdinančios lygties koreliacijos k-tas, apskaičiuotas ADRHEO programa bei pastarųjų lygčių empiriniai koreliacijos k-tai, nustatyti pagal MS Excel programą.

**3.5 lent.** Ribinė šlytis sąlyčio paviršiuje, klampos konstanta bei ribinę šlytį sąlyčio paviršiuje  $\mu$  nuo klampos konstantos aprašanti lygtis, empirinis ir koreliacijos koeficientai.

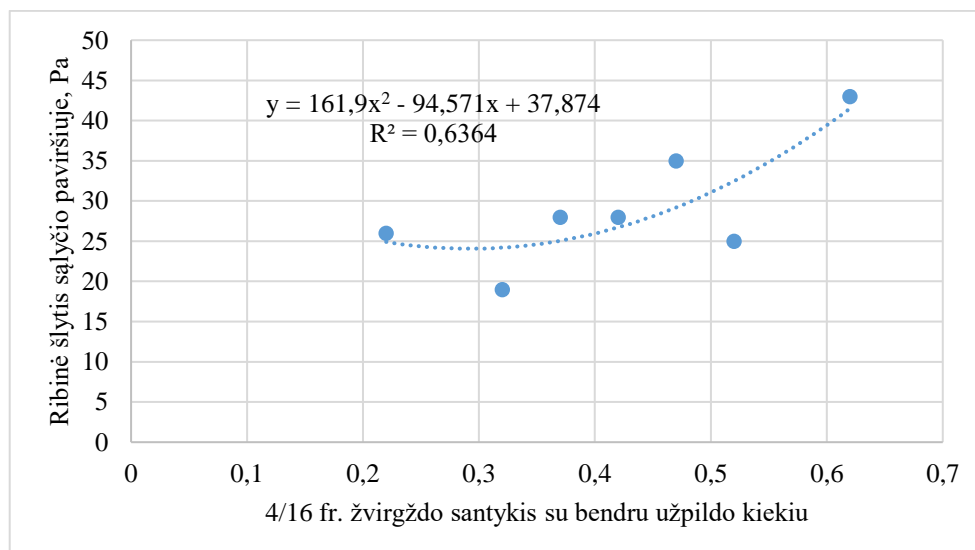
Betono mišinio kodas	Koreliacijos k-tas pagal ADRHEO programą	Ribinė šlytis sąlyčio paviršiuje, Pa	Klampos konstanta, Pa·s/m	Lygtis pagal Excel	Empirinis lygties k-tas pagal Excel	Koreliacijos k-tas pagal Excel
1	2	3	4	5	6	7
BT1-0	0,9994	26	41	$y=39,31x+26,141$	0,9987	0,9993
BT1-1	0,9976	19	45	$y=42,198x+19,026$	0,9956	0,9978
BT1-2	0,9969	28	38	$y=35,841x+27,865$	0,9934	0,9967
BT1-3	0,9960	25	24	$y=23,03x+24,573$	0,9903	0,9951
BT1-4	-	43	12	$y=10,284x+42,635$	0,8955	0,9463
BT1-5	0,9923	28	34	$y=32,179x+27,264$	0,9818	0,9909
BT1-6	0,9950	35	18	$y=26,518x+24,855$	0,9898	0,9949

Šlyties įtempių priklausomybė nuo sukimosi greičio, kuomet santykis tarp stambiojo užpildo (4/16 fr. žvirgždas) ir bendro užpildų mišinio kiekio kinta ribose nuo 0,22 iki 0,62, pateikta 3.8 pav. Iš šiame paveiksle pateiktų kreivių matyti, kad šlyties įtempiai didėja, didėjant sukimosi greičiui ribose nuo 0,2 iki 1,7aps/min. Tiesės polinkio kampas su x-su ašimi (sukimosi greitis, aps/min) mažiausias esant stambiojo užpildo (4/16 fr. žvirgždo) su bendru užpildo mišinio kiekio santykiui 0,62. Toliau didinant stambiojo užpildo (4/16 fr. žvirgždo) su bendru užpildo mišinio kiekio santykį gauti betono mišiniai yra netechnologiški, iš mišinio atsiskiria vanduo, sluoksniuojasi. Iš 3.5 lentelės taip pat matyti, kad tarp kintamųjų yra stiprus teisinis ryšys, koreliacijos k-to vertės kinta ribose nuo 0,9923 iki 0,99940 (pagal ADRHEO programą) ir nuo 0,9818 iki 0,9987 (pagal Excel).



**3.8 pav.** Šlyties įtempių priklausomybė nuo sukimosi greičio, kuomet santykis tarp stambiojo užpildo (4/16 fr. žvirgždas) ir bendro užpildų mišinio kiekio kinta ribose nuo 0,22 iki 0,62

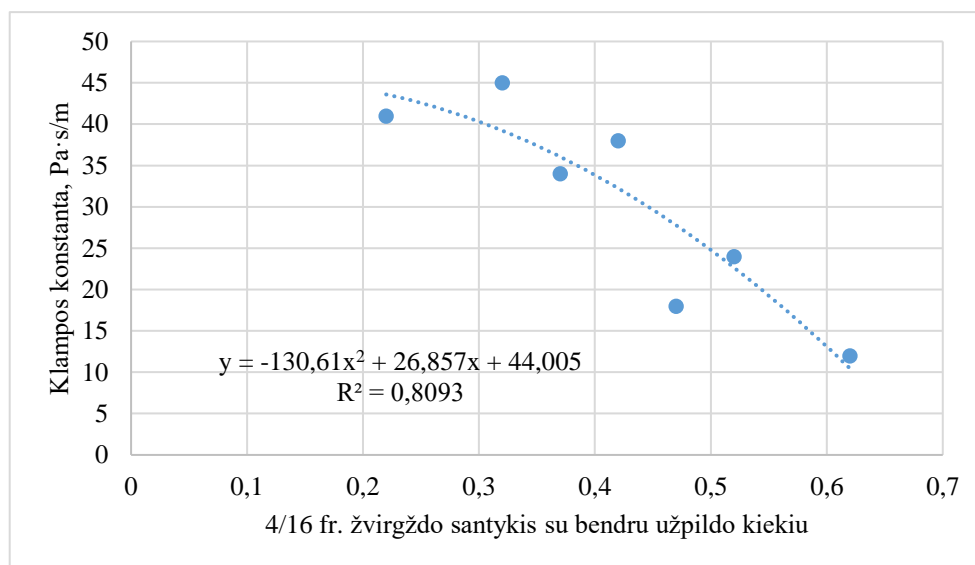
Santykio tarp stambiojo užpildo (4/16 fr. žvirgždas) ir bendro užpildų mišinio kiekio įtaka ribiniai šlyčiai sąlyčio paviršiuje pateikta 3.9 pav. Ribinė šlytis sąlyčio paviršiuje didėja nuo 19 iki 43 Pa, esant santykiui tarp stambiojo užpildo (4/16 fr. ) ir bendro užpildų mišinio kiekio 0,22 iki 0,62. Mažiausia ribinė šlytis sąlyčio paviršiuje (19 Pa) gauta esant stambiojo užpildo (4/16 fr. žvirgždo) su bendru užpildo mišinio kiekio santykiui 0,32, o didžiausia – esant santykiui 0,62. Iš grafiko matyti, kad didėjant stambiojo užpildo (4/16 fr. žvirgždo) su bendru užpildo mišinio kiekio santykiui, didėja ir ribinė šlytis sąlyčio paviršiuje.



**3.9 pav.** Santykio tarp stambiojo užpildo (4/16 fr. žvirgždas) ir bendro užpildų mišinio kiekio įtaka ribiniai šlyčiai sąlyčio paviršiuje

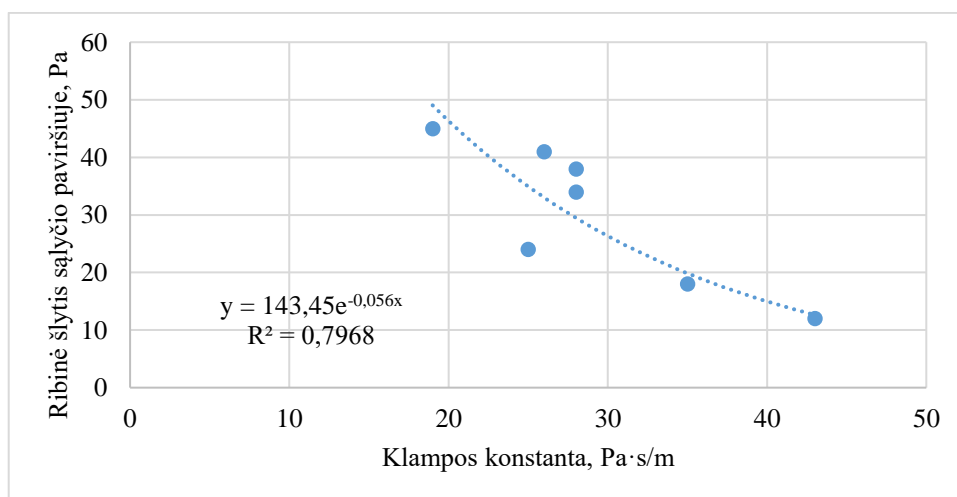
Santykio tarp stambiojo užpildo (4/16 fr. žvirgždas) ir bendro užpildų mišinio kiekio įtaka klampos konstantai pateikta 3.10 pav. Esant santykiui tarp stambiojo užpildo (4/16 fr. ) ir bendro

užpildų mišinio kiekio 0,22 iki 0,62 klamos konstanta mažėja nuo 45 iki 12 Pa·s/m. Iš grafiko matyti, kad didėjant stambiojo užpildo (4/16 fr. žvirgždo) su bendru užpildo mišinio kiekio santykiui, klamos konstanta mažėja.

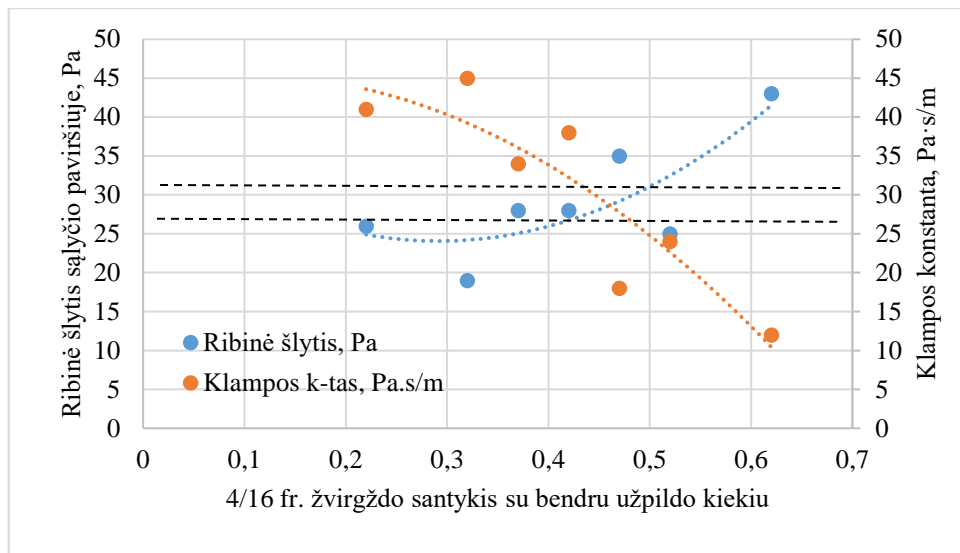


**3.10 pav.** Santykio tarp stambiojo užpildo (4/16 fr. žvirgždas) ir bendro užpildų mišinio kiekio įtaka klamos konstantai

Ribinės šlyties sąlyčio paviršiuje priklausomybė nuo klamos konstantos, kuomet santykis tarp stambiojo užpildo (4/16 fr. žvirgždas) ir bendro užpildų mišinio kiekio kinta ribose nuo 0,22 iki 0,62, pateikta 3.11 pav. Klamos konstantai didėjant nuo 43 iki 19 Pa·s/m, ribinė šlytis sąlyčio paviršiuje mažėja nuo 45 iki 12 Pa.



**3.11 pav.** Ribinės šlyties sąlyčio paviršiuje priklausomybė nuo klamos konstantos, kuomet santykis tarp stambiojo užpildo (4/16 fr. žvirgždas) ir bendro užpildų mišinio kiekio kinta ribose nuo 0,22 iki 0,62



**3.12 pav.** Ribinės šlyties sąlyčio paviršiuje ir klampos konstantos kitimas, kuomet santykis tarp stambiojo užpildo (4/16 fr. žvirgždas) ir bendro užpildų mišinio kiekio kinta ribose nuo 0,22 iki 0,62

Ribinės šlyties sąlyčio paviršiuje ir klampos konstantos kitimas, kuomet santykis tarp stambiojo užpildo (4/16 fr. žvirgždas) ir bendro užpildų mišinio kiekio kinta ribose nuo 0,22 iki 0,62, pateiktas 3.12 pav. Iš šiame paveiksle pateiktų kreivių matyti, kad esant santykiui tarp 4/16 fr. žvirgždo ir bendro užpildų mišinio kiekio apie 0,47, gaunamas kreivių sankirtos taškas, apibūdinantis tam tikras ribinės šlyties sąlyčio paviršiuje (apie 28 Pa) ir klampos konstantos (28 Pa·s/m) vertes. Šios dydžių vertės yra racionalios plieno paviršiu, kurio šiurkštumas yra apie 20,2  $\mu\text{m}$  (3.6 lentelė). Toks yra BTRHEOM tribometro besisukančio vidinio cilindro paviršiaus šiurkštumas.

Kompozitinių konstrukcijų kolonų vidinio paviršiaus šiurkštumo matavimai buvo atlikti plieninių konstrukcijų gamykloje (3.13 pav.). 3.6. lentelėje yra pateiktos plieno paviršiaus šiurkštumo matavimo reikšmės.

**3.6 lent.** Kompozitinių konstrukcijų – plieninių kolonų vidinio paviršiaus šiurkštumas.

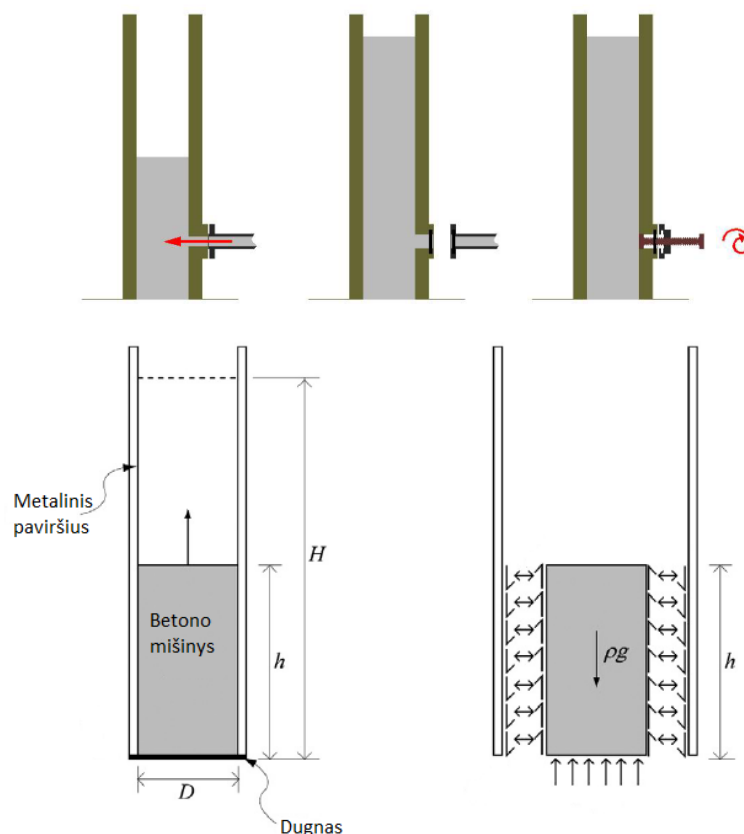
Matavimai	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Vidurkis
Metalinio profilio paviršiaus šiurkštumas, $\mu\text{m}$	45	47	50	55	43	-	-	-	-	-	48
Metalinio profilio (cilindro) paviršiaus šiurkštumas, $\mu\text{m}$	386	555	393	418	465	-	-	-	-	-	443,4
Tribometro besisukančio cilindro paviršiaus šiurkštumas, $\mu\text{m}$	20	18	14	26	21	29	18	22	15	19	20,2





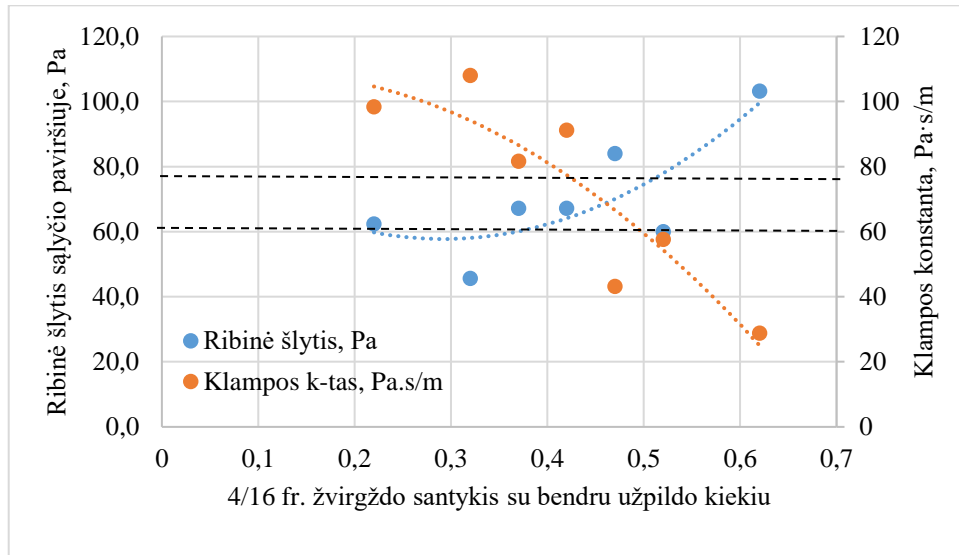
**3.13 pav.** Kompozitinių konstrukcijų – plieninių kolonų vidinio paviršiaus šiurkštumo matavimas

Iš 3.6 lentelėje pateiktų duomenų matyti, kad kompozitinėms kolonomis gaminti naudojamų plieninių profilių vidinio paviršiaus šiurkštumas gali būti didesnis nuo 2,4 iki 22 kartų, lyginant su BTRHEOM tribometro besisukančio vidinio cilindro paviršiaus šiurkštumu. Vadinasi, į tokio paviršiaus šiurkštumą betono mišinio ribinės šlyties sąlyčio paviršiaus ir klampos konstantos vertės bus žymiai didesnės. Tai reikėtų įvertinti, kuomet statybos aikštelėje betono mišinys į kompozitines kolonas paduodamas iš apačios į viršų (3.14 pav.).

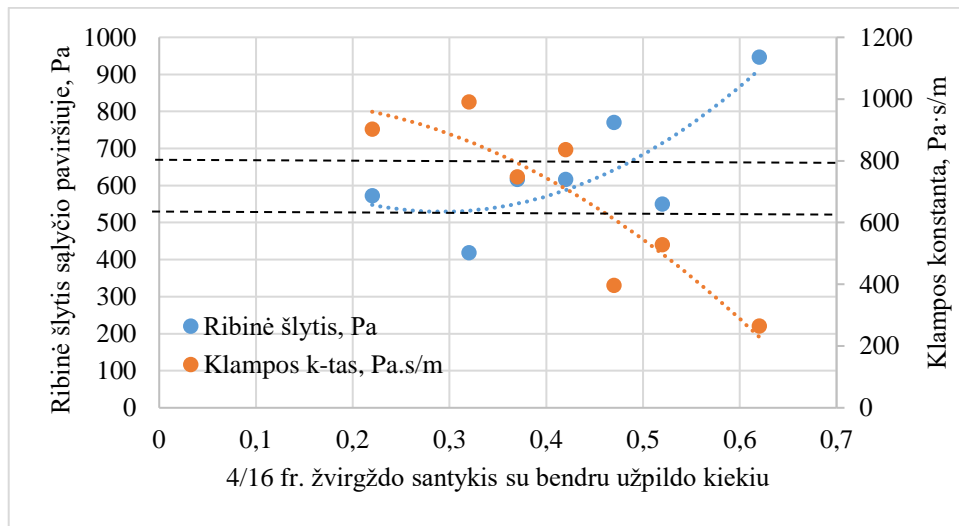


**3.14 pav.** Betono mišinys į kompozitines kolonas paduodamas iš apačios į viršų [35]

Iš 3.15 pav. matyti, kad esant santykiui tarp 4/16 fr. žvirgždo ir bendro užpildų mišinio kiekio apie 0,46, gaunamas kreivių sankirtos taškas, apibūdinantis tam tikras ribinės šlyties sąlyčio paviršiuje (apie 69 Pa) ir klampos konstantos (69 Pa·s/m) vertes, kuomet plieno paviršiaus šiurkštumas yra 48 μm.



**3.15 pav.** Ribinės šlyties sąlyčio paviršiuje ir klampos konstantos kitimas, kuomet santykis tarp stambiojo užpildo (4/16 fr. žvirgždas) ir bendro užpildų mišinio kiekio kinta ribose nuo 0,22 iki 0,62 (paviršiaus šiurkštumas 48,0 μm)



**3.16 pav.** Ribinės šlyties sąlyčio paviršiuje ir klampos konstantos kitimas, kuomet santykis tarp stambiojo užpildo (4/16 fr. žvirgždas) ir bendro užpildų mišinio kiekio kinta ribose nuo 0,22 iki 0,62 (paviršiaus šiurkštumas 434,4 μm)

Iš 3.16 pav. matyti, kad esant santykiui tarp 4/16 fr. žvirgždo ir bendro užpildų mišinio kiekio apie 0,42, gaunamas kreivių sankirtos taškas, apibūdinantis tam tikras ribinės šlyties sąlyčio paviršiuje (apie 590 Pa) ir klampos konstantos (690 Pa·s/m) vertes, kuomet plieno paviršiaus šiurkštumas yra 434,4 μm.

Galima daryti prielaidą, kad didėjant plieno paviršiaus šiurkštumui, santykis tarp 4/16 fr. žvirgždo ir bendro užpildų mišinio kiekio turėtų būti mažinamas nuo 0,47 iki 0,42. Keičiant minėtą santykį, galima reguliuoti ribinės šlyties sąlyčio paviršiuje ir klampos konstantos vertes, kurios turi įtakos tiekiant mišinius į plienines kompozitines konstrukcijas.

## 4. OPTIMALIAUSIO VARIANTO PARINKIMAS

### DAUGIAKRITERINIAIS METODAIS

Sprendimai priimami remiantis ne vienu, o keliais kriterijais. Kriterijai gali būti kiekybiniai arba kokybiniai. Daugiakriterinės analizės metu informacija apdorojama matriciniu būdu. Taip pat kriterijus galima skirstyti į objektyvius ir subjektyvius. Objektyvūs kriterijai, pavyzdžiui, kaina, darbo užmokestis, paprastai išreiškiami piniginiiais ar kitais kiekiniais dydžiais. Subjektyvūs kriterijai dažniausiai yra kokybiniai.

Šiuo atveju naudojami tokie kriterijai:

- **techniniai** (pvz., įrengimo sudėtingumas, atsparumas ugniai);
- **ekonominiai** (pvz. kaina, žmogaus darbo sąnaudos).

Kolonos su sija jungimui panaudosime TOPSIS metodą (kitaip artumo idealiam taškui metodas)

#### **TOPSIS metodas**

Artumo idealiam taškui metodas – TOPSIS (Technique for the Order Preference by Similarity to Ideal Solution) sukūrė C. Hwang ir K. Yoon (1981). Vėliau šis metodas buvo patobulintas [36].

Daugiakriterinio įvertinimo metodo esmė – apibendrinto kompleksinio kriterijaus formavimas, remiantis lyginamų variantų nukrypimu nuo vadinamojo idealaus, susidedančio iš geriausių nagrinėjamų variantų kriterijų [37].

Taikant šį metodą išrinkti racionaliausią inžinerinį sprendimą galima neįvertinant kriterijų reikšmingumo, tačiau bus įvertintas racionaliausias sprengimas pagal:

- teorinis kriterijų reikšmingumas (entropijos metodas);
- kompleksinis kriterijų reikšmingumas (entropijos metodas).

Alternatyvių projektinių sprendimų daugiakriterinio įvertinimo ETAPAI.

Užsiduodamas uždavinys šiam darbui: nustatyti racionaliausią alternatyvą (alternatyvos trys: gelžbetoninio karkaso, metalinio karkaso ir kompozicinio karkaso) pagal užsiduotų kriterijų reikšmingumą.

Nagrinėjamas daugiaaukščio pastato karkasas, kurio žingsnis tarp kolonų 5,5m. Kolonų ilgis 6 m, sijų ilgis 5,5 m.

Gelžbetonio karkasas: kolona 400x400mm, sija 240x240mm.

Metalinis karkasas: kolona HEB 400, sija HEB 240.

Kompozicinis karkasas: kolona  $\varnothing 355,6 \times 6,3$ mm metalinis karkasas su armatūros tinklu, pripildomas betono mišiniu; sija – metalinis karkasas 200mm aukščio (1.14 pav) užpildytas betonu.

. Užsидуodama prielaida, kad visais atvejais sijos su kolomis jungiamos tarpusavyje varžtine jungtimi.

1. Sudaryta įvertinimo *kriterijų sistema*:

- **(K<sub>1</sub>) Konstrukcijų kaina, eurai.** Užsiduodama preliminari konstrukcijų kaina pagal tiekėjų apklausą.
- **(K<sub>2</sub>) Žmogaus darbo sąnaudos, val./m<sup>2</sup>.** Žmogaus darbo sąnaudos nustatytos remiantis sąmatinės skaičiavimo programos „Sistela“ normatyviniu žinynu.
- **(K<sub>3</sub>) Mechanizmų darbo sąnaudos, val./m<sup>2</sup>.** Mechanizmų darbo sąnaudos nustatytos remiantis sąmatinės skaičiavimo programos „Sistela“ normatyviniu žinynu.
- **(K<sub>4</sub>) Įrengimo sudėtingumas, balais,** Atsižvelgiama į naudojamų mechanizmų kiekį, konstrukcijos svorį.
- **(K<sub>5</sub>) Atsparumas ugniai, balais.** Atkreipiamas dėmesys į konstrukcijos naudojamas medžiagas, jų atsparumą ugniai.
- **(K<sub>6</sub>) Estetika, balais.** Atkreipiamas dėmesys į jau sumontuotos konstrukcijos sujungimo estetiką.

2. Suteikiama *kriterijų lyginamasis svoris* (reikšmingumas), %.

Pagal teorinį bei kompleksinį kriterijų reikšmingumą. Šie kriterijai bus randami entropijos metodu.

3. Nustatyta *kriterijų reikšmė*.

**K<sub>1</sub>** - reikalingas mažiausia reikšmė.

**K<sub>2</sub>** - reikalingas mažiausia reikšmė.

**K<sub>3</sub>** - reikalingas mažiausia reikšmė.

**K<sub>4</sub>** - reikalingas mažiausia reikšmė.

**K<sub>5</sub>** - reikalingas didžiausia reikšmė.

**K<sub>6</sub>** - reikalingas didžiausia reikšmė.

4. Suteikiama *naudingumo vertė* nuo 0 iki 10 balų sistemoje.

5. Nustatoma alternatyvių sprendimų *bendra naudingumo vertė* .

Skaičiavimai pateikti 4.1 skyriuje.

#### 4.1. Entropijos metodu randamas teorinis bei kompleksinis kriterijų reikšmingumas

Entropija – atsitiktinio dydžio neapibrėžtumo matas [38]. Entropija taikoma nustatant vertinimo kriterijų teorinį ir kompleksinį reikšmingumus.

**Naudojami alternatyvūs sprendimai:**

**1) Surenkamuose gelžbetoniniuose elementuose (A)**

## 2) Metalo elementai (B)

## 3) Kompoziciniai elementai (C)

Pradiniai duomenys pateikti 4.1 lentelėje.

**4.1 lent.** Pradiniai duomenys

Kriterijai Alternatyvūs sprendiniai	K <sub>1</sub> kaina, eurais	K <sub>2</sub> žmogaus darbo sąnaudos, val./m <sup>2</sup>	K <sub>3</sub> mechanizmų darbo sąnaudos, val./m <sup>2</sup>	K <sub>4</sub> įrengimo sudėtingumas, balais	K <sub>5</sub> atsparumas ugniai, balais	K <sub>6</sub> estetika, balais
A (G/B elementai)	880	19,41	88,43	2	4	2
B (Metalo elementai)	2150	22,62	77,8	1	1	4
C (Kompoziciniai elementai)	1780	27,01	102,5	5	5	5
Suma	4810	69,04	268,73	8	10	11
Optimalumas	MIN	MIN	MIN	MIN	MAX	MAX

Atliekamas matricos normalizavimas pagal formulę:

$$\bar{P}_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}}; (V_{ij}, \text{kai } i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n};)$$

Normalizavus pagal šią formulę gaunama normalizuota matrica  $\bar{P}$ , kur visi elementai yra nedimensiniai dydžiai.

**4.2 lent.** Normalizuota matrica  $\bar{P}$

Kriterijai Alternatyvūs sprendiniai	K <sub>1</sub> kaina, eurais	K <sub>2</sub> žmogaus darbo sąnaudos, val./m <sup>2</sup>	K <sub>3</sub> mechanizmų darbo sąnaudos, val./m <sup>2</sup>	K <sub>4</sub> įrengimo sudėtingumas, balais	K <sub>5</sub> atsparumas ugniai, balais	K <sub>6</sub> estetika, balais
A (G/B elementai)	0,183	0,281	0,329	0,250	0,400	0,182
B (Metalo elementai)	0,447	0,328	0,290	0,125	0,100	0,364
C (Kompoziciniai elementai)	0,370	0,391	0,381	0,625	0,500	0,455

Nustatomas kiekvieno kriterijaus entropijos lygis  $E_j$  pagal formulę:

$$E_j = -k \sum_{i=1}^m (P_{ij} \cdot \ln P_{ij}); (i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n};), \quad k = \frac{1}{\ln m}$$

Čia: m – alternatyvūs sprendimai, 3.

$$k = \frac{1}{\ln 3} = 0,910$$

Skaičiavimui palengvinti, sukuriama papildoma matrica (4.3 lentelė).

**4.3 lent.** Papildoma matrica ( $P_{ij} \cdot \ln P_{ij}$ )

Kriterijai	K <sub>1</sub> kaina, eurais	K <sub>2</sub> žmogaus darbo sąnaudos, val./m <sup>2</sup>	K <sub>3</sub> mechanizmų darbo sąnaudos, val./m <sup>2</sup>	K <sub>4</sub> įrengimo sudėtingumas, balais	K <sub>5</sub> atsparumas ugniai, balais	K <sub>6</sub> estetika, balais
A (G/B elementai)	-0,311	-0,357	-0,366	-0,347	-0,367	-0,310
B (Metalų elementai)	-0,360	-0,366	-0,359	-0,260	-0,230	-0,368
C (Kompoziciniai elementai)	-0,368	-0,367	-0,368	-0,294	-0,347	-0,358
<b>Suma</b>	<b>-1,039</b>	<b>-1,089</b>	<b>-1,092</b>	<b>-0,900</b>	<b>-0,943</b>	<b>-1,036</b>

Entropijos lygis  $E_j$  kinta intervale  $[0;1]$ , todėl galime parašyti  $0 \leq E_j \leq 1$ , kur  $(j = \overline{1, n})$ .

**4.4 lent.** Entropijos lygiai

Kriterijai	K <sub>1</sub> kaina, eurais	K <sub>2</sub> žmogaus darbo sąnaudos, val./m <sup>2</sup>	K <sub>3</sub> mechanizmų darbo sąnaudos, val./m <sup>2</sup>	K <sub>4</sub> įrengimo sudėtingumas, balais	K <sub>5</sub> atsparumas ugniai, balais	K <sub>6</sub> estetika, balais
$E_j$	-0,945	-0,992	-0,994	-0,819	-0,859	-0,943

Nustatomas kriterijų kitimo lygis  $d_j$  pagal formulę:

$$d_j = 1 - E_j, \text{ kur } (j = \overline{1, n})$$

**4.5 lent.** Kriterijų kitimo lygiai

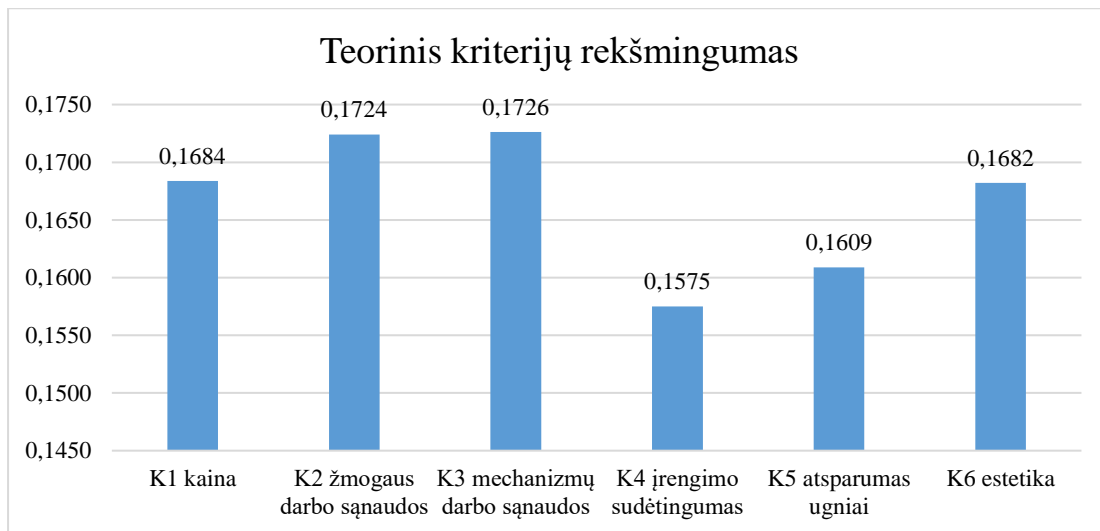
Kriterijai	K <sub>1</sub> kaina, eurais	K <sub>2</sub> žmogaus darbo sąnaudos, val./m <sup>2</sup>	K <sub>3</sub> mechanizmų darbo sąnaudos, val./m <sup>2</sup>	K <sub>4</sub> įrengimo sudėtingumas, balais	K <sub>5</sub> atsparumas ugniai, balais	K <sub>6</sub> estetika, balais
$D_j$	1,945	1,992	1,994	1,819	1,859	1,943

Kadangi visi kriterijai vienodai yra svarbūs, tai teorinis kriterijų reikšmingumas nustatomas pagal formulę:

$$q_{j(t)} = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j}; (j = \overline{1, n})$$

**4.6 lent.** Teorinis kriterijų reikšmingumas

Kriterijai	K <sub>1</sub> kaina, eurais	K <sub>2</sub> žmogaus darbo sąnaudos, val./m <sup>2</sup>	K <sub>3</sub> mechanizmų darbo sąnaudos, val./m <sup>2</sup>	K <sub>4</sub> įrengimo sudėtingumas, balais	K <sub>5</sub> atsparumas ugniai, balais	K <sub>6</sub> estetika, balais
$q_{j(t)}$	0,1684	0,1724	0,1726	0,1575	0,1609	0,1682



4.1 pav. Teorinis kriterijų reikšmingumas

4.7 lent. Subjektyvus kriterijų reikšmingumas

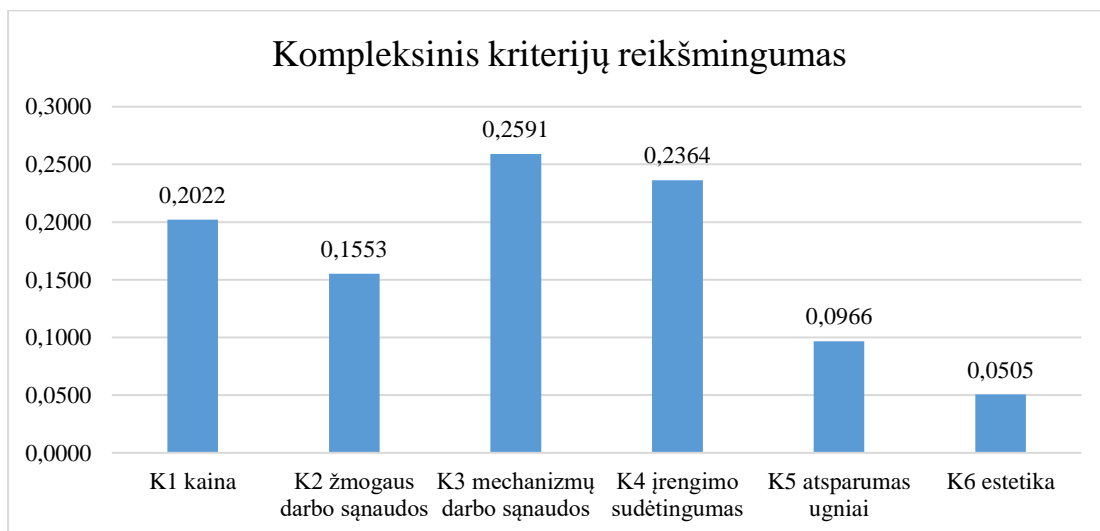
K <sub>1</sub> kaina, eurais	K <sub>2</sub> žmogaus darbo sąnaudos, val./m <sup>2</sup>	K <sub>3</sub> mechanizmų darbo sąnaudos, val./m <sup>2</sup>	K <sub>4</sub> įrengimo sudėtingumas, balais	K <sub>5</sub> atsparumas ugniai, balais	K <sub>6</sub> estetika, balais	
0,2000	0,1500	0,2500	0,2500	0,1000	0,0500	<b>1,0000</b>

Nustatomas kompleksinis kriterijų reikšmingumas pagal formulę:

$$\bar{q}_{j0} = \frac{\bar{q}_j \cdot q_{j(t)}}{\sum_{j=1}^n (\bar{q}_j \cdot q_{j(t)})}; (j = \overline{1, n})$$

4.8 lent. Kompleksinis kriterijų reikšmingumas

Kriterijai/ Reikšmingumas	K <sub>1</sub> kaina, eurais	K <sub>2</sub> žmogaus darbo sąnaudos, val./m <sup>2</sup>	K <sub>3</sub> mechanizmų darbo sąnaudos, val./m <sup>2</sup>	K <sub>4</sub> įrengimo sudėtingumas, balais	K <sub>5</sub> atsparumas ugniai, balais	K <sub>6</sub> estetika, balais	
q <sub>j0</sub>	0,2022	0,1553	0,2591	0,2364	0,0966	0,0505	<b>1,000</b>



4.2 pav. Kompleksinis kriterijų reikšmingumas



Kaip matyti iš 4.1 pav. pateiktos stulpelinės diagramos, gauta tokia teorinio kriterijų reikšmingumo prioritėtinė eilė: 17,26% - mechanizmų darbo sąnaudos (K<sub>3</sub>), 17,24% - žmogaus darbo sąnaudos (K<sub>2</sub>), 16,84% - konstrukcijų kaina (K<sub>1</sub>), 16,82% - estetika (K<sub>6</sub>), 16,09% - atsparumas ugniai (K<sub>5</sub>) ir 15,75% - įrengimo sudėtingumas (K<sub>4</sub>). Apjungus teorinį ir subjektyvų kriterijų reikšmingumą gauta tokia kompleksinio kriterijų reikšmingumo prioritėtinė eilė: 25,91% - mechanizmų darbo sąnaudos (K<sub>3</sub>), 23,64% - įrengimo sudėtingumas (K<sub>4</sub>), 20,22% - konstrukcijų kaina (K<sub>1</sub>), 15,53% - žmogaus darbo sąnaudos (K<sub>2</sub>), 9,66% - atsparumas ugniai (K<sub>5</sub>) ir 5,05% - estetika (K<sub>6</sub>). Matyti, jog pagal teorinį ir kompleksinį kriterijų reikšmingumą, renkantis racionalų inžinerinį sprendimą, didžiausią dėmesį reikia kreipti į kriterijų K<sub>3</sub> – mechanizmų darbo sąnaudas.

#### 4.2. Artumo idealiam taškui metodo pritaikymas

Pradiniai duomenys pateikti 4.9 lentelėje. Kompleksinis bei teorinis reikšmingumas paimtas iš aukščiau (4.1 skyriaus) apskaičiuoto kriterijų reikšmingumo.

4.9 lent. Pradiniai duomenys

Kriterijai	K <sub>1</sub> kaina, eurai	K <sub>2</sub> žmogaus darbo sąnaudos, val./m <sup>2</sup>	K <sub>3</sub> mechanizmų darbo sąnaudos, val./m <sup>2</sup>	K <sub>4</sub> įrengimo sudėtingumas, balais	K <sub>5</sub> atsparumas ugniai, balais	K <sub>6</sub> estetika, balais
A (G/B elementai)	880	19,41	88,43	2	4	2
B (Metalų elementai)	2150	22,62	77,8	1	1	4
C (Kompoziciniai elementai)	1780	27,01	102,5	5	5	5
$\sqrt{\sum x_{ij}^2}$	2926,65	40,22	156,14	5,48	6,48	6,71
Optimalumas	MIN	MIN	MIN	MIN	MAX	MAX
Kompleksinis reikšmingumas, %	20,22	15,53	25,91	23,63	9,66	5,05
Teorinis reikšmingumas, %	16,84	17,24	17,26	15,74	16,1	16,82

Taikant vektorių normalizavimo metodą normalizuojami pradiniai duomenys pagal formulę:

$$\bar{x}_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}; \text{ (kur } i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}; \text{)}$$

čia: m – alternatyvų skaičius;

n – kriterijų skaičius.

4.10 lent. Matrica  $\bar{P}$

Kriterijai \ Alternatyvūs sprendiniai	K <sub>1</sub> kaina, euras	K <sub>2</sub> žmogaus darbo sąnaudos, val./m <sup>2</sup>	K <sub>3</sub> mechanizmų darbo sąnaudos, val./m <sup>2</sup>	K <sub>4</sub> įrengimo sudėtingumas, balais	K <sub>5</sub> atsparumas ugniai, balais	K <sub>6</sub> estetika, balais
A (G/B elementai)	0,301	0,483	0,566	0,365	0,617	0,298
B (Metalo elementai)	0,735	0,562	0,498	0,183	0,154	0,596
C (Kompoziciniai elementai)	0,608	0,671	0,656	0,913	0,772	0,745

### Skaičiavimai atliekami esant kompleksiniam reikšmingumui

Svertinės normalizuotos matricos  $\bar{P}^*$  sudarymas:

$$\bar{P}^* = |\bar{P}| \cdot |\bar{q}_j|$$

čia:  $|\bar{P}|$  – normalizuota matrica;

$|\bar{q}_j|$  – subjektyvus kriterijų reikšmingumas, kuris paskaičiuotas porinio palyginimo metodu.

4.11 lent. Svertinė normalizuota matrica  $\bar{P}^*$

Kriterijai \ Alternatyvūs sprendiniai	K <sub>1</sub> kaina, euras	K <sub>2</sub> žmogaus darbo sąnaudos, val./m <sup>2</sup>	K <sub>3</sub> mechanizmų darbo sąnaudos, val./m <sup>2</sup>	K <sub>4</sub> įrengimo sudėtingumas, balais	K <sub>5</sub> atsparumas ugniai, balais	K <sub>6</sub> estetika, balais
A (G/B elementai)	0,061	0,075	0,147	0,086	0,060	0,015
B (Metalo elementai)	0,149	0,087	0,129	0,043	0,015	0,030
C (Kompoziciniai elementai)	0,123	0,104	0,170	0,216	0,075	0,038

Nustatomas idealus teigiamas variantas:

$$a^+ = \{[(\max_i x_{ij} \notin I), (\min_i x_{ij} \notin I')]/i = \overline{1, m}\} = \{x_1^+; x_2^+; x_3^+\}$$

čia: I – aibė rodiklių (maksimizuojamų), kurių geriausios reikšmės yra didžiausios.

I' – aibė rodiklių (minimizuojamų), kurių geriausios reikšmės yra mažiausios.

Idealus teigiamas variantas:

$$a^+ = \{880; 19,41; 77,8; 1; 5; 5\} = \{0,061; 0,075; 0,129; 0,043; 0,075; 0,038\}$$

Idealus neigiamas variantas:

$$a^- = \{[(\min_i x_{ij} \notin I), (\max_i x_{ij} \notin I')]/i = \overline{1, m}\} = \{x_1^-; x_2^-; x_3^-\}$$

Idealus neigiamas variantas:

$$a^- = \{2150; 27,01; 102,5; 5; 1; 2\} = \{0,149; 0,104; 0,170; 0,216; 0,0; 0,015; 0,03\}$$

Idealus teigiamo varianto skirtumo (atstumo)  $L_i^+$  tarp realaus  $a_i$  ir  $a^+$  nustatymas:

$$L_i^+ = \sum_{j=1}^n |x_{ij} - x_j^+|; i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n};$$

čia:  $x_{ij}$  – realus;  
 $a^+$  - idealiai teigiamas;  
 $L_i^+$  - atstumas.

**4.12 lent.** Idealus teigiamas variantas

Idealus teigiamas variantas	
$L_1$	0,098
$L_2$	0,167
$L_3$	0,305

Idealaus neigiamo varianto skirtumo (atstumo)  $L_i^-$  tarp realaus  $a_i$  ir  $a^-$  nustatymas:

$$L_i^- = \sum_{j=1}^n |x_{ij} - x_j^-|; i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n};$$

**4.13 lent.** Idealus neigiamas variantas

Idealus neigiamas variantas	
$L_1$	0,330
$L_2$	0,231
$L_3$	0,093

Santykinio lyginamų variantų artumo idealiam  $K_{bit,i}$  nustatymas.

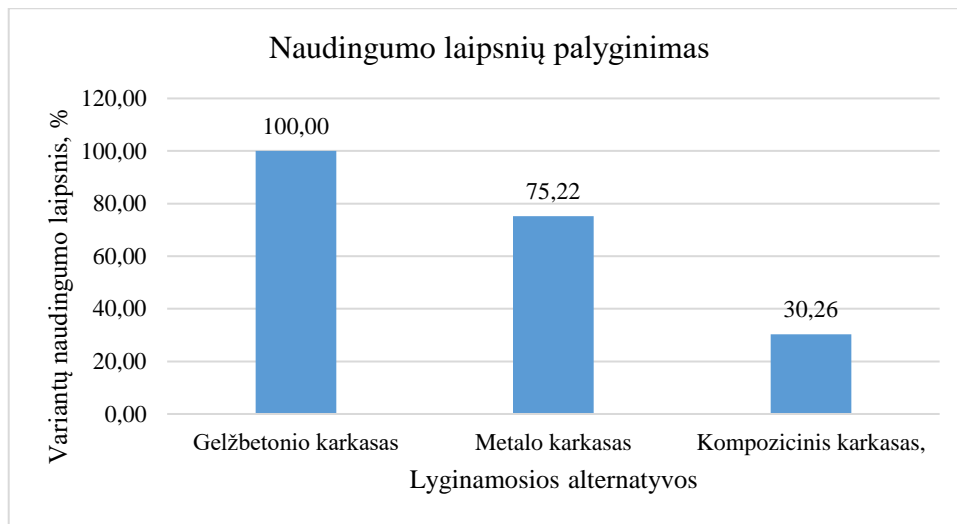
**4.14 lent.** Santykinio lyginamų variantų artumo idealiam  $K_{bit,i}$  nustatymas

$K_{bit,1}$	0,770
$K_{bit,2}$	0,579
$K_{bit,3}$	0,233
MAX	0,770

Racionaliausias inžinerinis sprendimas bus tas, kurio  $K_{bit}$  reikšmė yra maksimali.

Naudingumo laipsnio nustatymas. Lyginame mūsų nagrinėjamo varianto reikšmę su idealaus varianto reikšme.

Grafinis kompleksinio reikšmingumo variantų palyginimas pateiktas 4.3 pav.



4.3 pav. Grafinis kompleksinio reikšmingumo variantų palyginimas

### Skaičiavimai atliekami esant teoriniam reikšmingumui

4.15 lent. Svertinė normalizuota matrica  $\bar{P}^*$

Kriterijai \ Alternatyvūs sprendiniai	K <sub>1</sub> kaina, eurai	K <sub>2</sub> žmogaus darbo sąnaudos, val./m <sup>2</sup>	K <sub>3</sub> mechanizmų darbo sąnaudos, val./m <sup>2</sup>	K <sub>4</sub> įrengimo sudėtingumas, balais	K <sub>5</sub> atsparumas ugniai, balais	K <sub>6</sub> estetika, balais
A (G/B elementai)	0,051	0,083	0,098	0,057	0,099	0,050
B (Metalo elementai)	0,124	0,097	0,086	0,029	0,025	0,100
C (Kompoziciniai elementai)	0,102	0,116	0,113	0,144	0,124	0,125

Idealus teigiamas variantas:

$$a^+ = \{880; 19,41; 77,8; 1; 5; 5\} = \{0,051; 0,083; 0,086; 0,029; 0,124; 0,019; 0,125\}$$

Idealus neigiamas variantas:

$$a^- = \{2150; 27,01; 102,5; 5; 1; 2\} = \{0,124; 0,116; 0,113; 0,144; 0,025; 0,100\}$$

Idealaus teigiamo varianto skirtumo (atstumo)  $L_i^+$  tarp realaus  $a_i$  ir  $a^+$  nustatymas:

4.16 lent. Idealus teigiamas variantas

Idealus teigiamas variantas	
L <sub>1</sub>	0,141
L <sub>2</sub>	0,211
L <sub>3</sub>	0,227

Idealaus neigiamo varianto skirtumo (atstumo)  $L_i^-$  tarp realaus  $a_i$  ir  $a^-$  nustatymas:

**4.17 lent.** Idealus neigiamas variantas

Idealus neigiamas variantas	
L <sub>1</sub>	0,332
L <sub>2</sub>	0,383
L <sub>3</sub>	0,391

Santykinio lyginamų variantų artumo idealiam  $K_{bit,i}$  nustatymas.

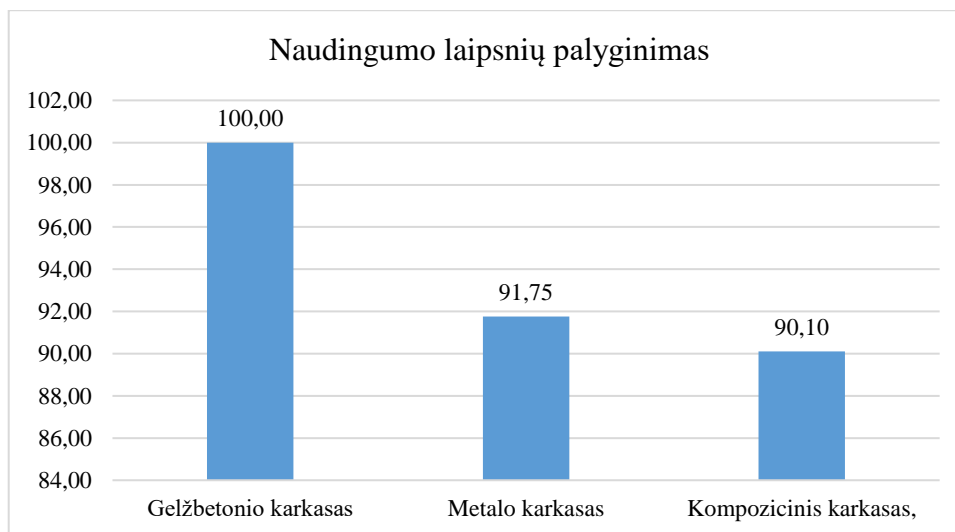
**4.18 lent.** Santykinio lyginamų variantų artumo idealiam  $K_{bit,i}$  nustatymas

$K_{bit,1}$	0,703
$K_{bit,2}$	0,645
$K_{bit,3}$	0,633
MAX	0,703

Racionaliausias inžinerinis sprendimas bus tas, kurio  $K_{bit}$  reikšmė yra maksimali.

Naudingumo laipsnio nustatymas. Lyginame mūsų nagrinėjamo varianto reikšmę su idealaus varianto reikšme.

Grafinis teorinio reikšmingumo variantų palyginimas pateiktas 4.4 pav.



**4.4 pav.** Grafinis teorinio reikšmingumo variantų palyginimas

Atlikus skaičiavimus pagal kompleksinį ir teorinį reikšmingumus (4.3 ir 4.4 pav.), geriausias projektinis sprendimas pagal kompleksinį reikšmingumą yra A (Gelžbetonio karkasas) variantas, kurio gauta maksimali reikšmė yra 100%. Išsprendus pagal teorinį reikšmingumą – gautas taip pat A (Gelžbetonio karkasas) variantas.

## IŠVADOS

1. Palyginta tarpusavyje metalo, gelžbetonio ir kompozicinių konstrukcijų karkso įrengimo technologijos, išskirtos kompozicinės konstrukcijos pranašesnės ilgesniu tarpatramiu, lenktomis formomis, tačiau yra trūkumas: didelės išlaidos medžiagoms.
2. Ištirta 4/16 fr. žvirgždo kiekio su bendru užpildo mišinio kiekio santykio įtaka mišinio-plieno sąlyčio paviršiaus trinties parametrams, kintant santykiui 0,22-0,62 ribose.
3. Nustatyta, kad kintant stambiojo užpildo su bendru užpildo mišinio kiekio santykiui nuo 0,22 iki 0,62 mišinio šlyties įtempiai didėja, didėjant sukimosi greičiui ribose nuo 0,2 iki 1,7aps/min.; ribinė šlytis sąlyčio paviršiuje padidėja nuo 26 iki 43 Pa; klampos konstanta su mažėja nuo 41 iki 12 Pa·s/m.
4. Didėjant plieno paviršiaus šiurkštumui, santykis tarp 4/16 fr. žvirgždo ir bendro užpildų mišinio kiekio turėtų būti mažinamas nuo 0,47 iki 0,42. Patebėta, kad didėjant metalo paviršiaus šiurkštumui santykis tarp 4/16 fr. žvirgždo ir bendro užpildų mišinio kiekio turi mažėti.
5. Nustatyta, tiek pagal teorinį kriterijų reikšmingumą, tiek pagal kompleksinį kriterijų reikšmingumą, didžiausią dėmesį reikia kreipti į kriterijų  $K_3$  – mechanizmų darbo sąnaudas. Apskaičiuota daugiakriterinio vertinimo metodu pagal kompleksinį ir teorinį reikšmingumą, abiem atvejais geriausias projektinis sprendimas yra alternatyva A – gelžbetonio karkasas.

## LITERATŪRA

- 1) GURSKIS, Vincas. Statybinės medžiagos: mokomoji knyga. Kaunas: Ardiva, 2008 . ISBN 978-9955-896-24-1
- 2) Surenkamų gelžbetoninių gaminių montavimo rekomendacijos [interaktyvus]. 2008 [žiūrėta 2016-01-11] Prieiga per:  
[https://www.betonika.lt/files/parsisiust/montavimo\\_instrukcijos/montavimo\\_rekomendacijos\\_lt/montavimo\\_rekomendacijos\\_kolonos.pdf](https://www.betonika.lt/files/parsisiust/montavimo_instrukcijos/montavimo_rekomendacijos_lt/montavimo_rekomendacijos_kolonos.pdf)
- 3) TICHKO Serge, and et.al. Numerical simulation of formwork pressure while pumping self-compacting concrete bottom-up. Engineering Structures. Vol. 70, 2014 pp. 218-233
- 4) Betonavimo technologinių kompetencijų tobulinimo programos mokymo medžiaga [interaktyvus]. [Žiūrėta 2016-01-11] Prieiga per: <http://www.pmdtk.upc.smm.lt/>
- 5) JOKŪBAITIS V. Statybinių medžiagų ir konstrukcijų irimo mechanikos pagrindai: mokomoji knyga. Vilniaus Gedimino technikos universitetas, 2001: Technika Vilnius.
- 6) Statybos taisyklės ST 121895674.205.01.02:2012 Betono ir G/B surenkamų konstrukcijų montavimo darbai
- 7) CHOUDHARY Chandresh. Composite construction of buildings [interaktyvus]. 2014 [žiūrėta 2016-01-16] Prieiga per: <http://civildigital.com/composite-construction-buildings-composite-beams/>
- 8) Modernūs surenkamųjų gelžbetoninių elementų mazgų sprendimai [Žiūrėta 2016-09-24] Prieiga per: (<https://www.spec.lt/straipsniai/betono-gaminiai-modernus-surenkamuju-gelzbetoniniu-elementu-mazgu-sprendimai>)
- 9) LEHMAN, R.L.; et. al. Materials Mechanical: Engineering Handbook Ed. Frank Kreith, Boca Raton: CRC Press LLC, 1999
- 10) PAULAUSKAS J., A. Kvedaras. Metalinės konstrukcijos. 1977: Vilnius, Mokslas
- 11) Renkantis konstrukcijas ieškoma racionalumo [interaktyvus]. 2013 [žiūrėta 2016-01-16] Prieiga per: <http://sa.lt/renkantis-konstrukcijas-ieskoma-racionalumo/>
- 12) Deltabeam slim floor structure for open spaces [interaktyvus]. [Žiūrėta 2016-01-16]. Prieiga per: <http://www.peikko.com/product-category-deltabeam>
- 13) Composite products [interaktyvus]. 2015 [žiūrėta 2016-01-16]Prieiga per:  
<http://swt.eu/products/>
- 14) Deltabeam sijų montavimas [Žiūrėta 2016-11-08] Prieiga per:  
<http://materials.crasman.fi/materials/extloader/?fid=68583&org=2&chk=be029f64>)
- 15) Composite construction. [Žiūrėta 2016-01-16] Prieiga per: <http://fgg-web.fgg.uni-lj.si/~pmoze/esdep/master/wg10/10100.htm>

- 16) From Wikipedia. Rheology. [Žiūrėta 2016-01-20] Prieiga per:  
<https://en.wikipedia.org/wiki/Rheology>
- 17) KHATIB, Rami Analysis and prediction of pumping characteristics of high-strength self-consolidating concrete. Canada: Sherbrooke, 2013.
- 18) FEYS, Dimitri. Interactions between Rheological Properties and Pumping of Self-Compacting Concrete. Faculteit Ingenieurswetenschappen Academiejaar 2008 – 2009. ISBN 978-90-8578-277-3
- 19) BANFILL, Phil, et. al. Comparison of concrete rheometers: International tests at LCPC. France: National Institute of Standards and technology, 2001.
- 20) NGO, T.T. et. al. Use of tribometer to estimate interface friction and concrete boundary layer composition during the fluid concrete pumping. Construction and Building Materials Vol. 24, 2010 pp. 1253-1261
- 21) BORIS Renata, Asta Kičaitė. Plastifikuojančio priedo įtaka betono mišinio reologinėms savybėms. 2011: Vilnius. ISBN 978-9955-28-929-6
- 22) KWON Seung Hee et. al. Effect of wall friction on variation of formwork pressure over time in self-consolidating concrete, Cement and Concrete Research Vol. 41, 2011 pp. 90-101
- 23) HU Chong et. al. Validation of BTRHEOM, the new rheometer for soft-to-fluid concrete, Materials and Structures, Vol. 29, France:1996, pp.620-631
- 24) FEYS Dimitri et. al. Prediction of pumping pressure by means of new tribometer for highly-workable concrete, Cement and Concrete Composites Vol. 57, 2015, pp. 102-115
- 25) KLOVAS A., Daukšys M., Influence of mineral aggregates on the rheological properties of concrete mixture. Journal of Physics: Conference series 602, 2015, doi:10.1088/1742-6596/602/1/012009
- 26) LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. LST EN 933-1:2012 Bandymai užpildų geometrinėms savybėms nustatyti. 1 dalis. Granuliometrinės sudėties nustatymas. Sijojimo metodas. Tests for geometrical properties of aggregates - Part 1: Determination of particle size distribution - Sieving method. Europos standartizacijos komitetas, 2012.
- 27) LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. LST EN 206-1 taikymo taisyklės ir papildomieji nacionaliniai reikalavimai. Rules for the Application of LST EN 206-1 and Additional National Requirements: tarptautinis standartas ISO turi Lietuvos standarto statusą. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2012.
- 28) LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. LST EN 12350-7:2009 Betono mišinio bandymai. 7 dalis. Oro kiekis. Slėginiai metodai. Testing fresh concrete - Part 7: Air content - Pressure methods. Europos standartizacijos komitetas, 2009.



- 29) LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. LST EN 12350-6:2009 Betono mišinio bandymai. 6 dalis. Tankis. Testing fresh concrete - Part 6: Density. Europos standartizacijos komitetas, 2009.
- 30) LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. LST EN 12350-2:2009 Betono mišinio bandymai. 2 dalis. Slankumo bandymas. Testing fresh concrete - Part 2: Slump-test. Europos standartizacijos komitetas, 2009.
- 31) BANFILL P.F.G. The rheology of fresh cement and concrete. 206: The British Society of Rheology, Rheology Reviews, pp. 61 -130
- 32) BTRHEOM Rheometer. [Žiūrėta 2016-09-12] Prieiga per: <http://civil-online2010.blogspot.lt/2010/09/btrheom-rheometer.html>.
- 33) BOUHAROUN S. Friction behaviour of fresh concrete in the vicinity of formwork. 2013: Journal of the South African Institution of Civil Engineering, Vol. 55, pp. 10-17. ISSN 2309-8775
- 34) ROUSSEL N., 2012. Understanding the Rheology of Concrete. Woodhead Publishing Limited, pp. 342-351.
- 35) The European Guidelines for self-compacting concrete . [Žiūrėta 2016-09-24] Prieiga per: <http://www.efnarc.org/pdf/SCCGuidelinesMay2005.pdf>
- 36) TOPSIS [Žiūrėta 2016-11-11] Prieiga per: (<https://en.wikipedia.org/wiki/TOPSIS>)
- 37) BANAITIENĖ N., A. Banaitis Statybos projektų valdymo pagrindai. 2007:Technika, Vilnius ISBN 978-9986-05-961-5
- 38) ENTROPIJA [Žiūrėta 2016-11-08] Prieiga per: (<http://www.zodziai.lt/reiksme&word=Entropija&wid=5454>)