



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
STATYBOS FAKULTETAS
GELŽBETONINIŲ KONSTRUKCIJŲ IR GEOTECHNIKOS KATEDRA

Deividas Liužinas

**LENKIMO MOMENTO ĮTAKA GELŽBETONINIŲ BESIJŲ
PERDANGŲ PRASPAUDIMO STIPRIUI**
**INFLUENCE OF BENDING MOMENT ON PUNCHING SHEAR
STRENGTH OF REINFORCED CONCRETE FLAT SLABS**

Baigiamasis magistro darbas

Statinių konstrukcijų studijų programa, valstybinis kodas 621H21001

(naujas kodas 6211EX040)

Pastatų konstrukcijų specializacija

Statybos inžinerijos studijų kryptis E05

Vilnius, 2018

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
STATYBOS FAKULTETAS
GELŽBETONINIŲ KONSTRUKCIJŲ IR GEOTECHNIKOS KATEDRA

TVIRTINU

Katedros vedėjas

(Parašas)

Juozas Valivonis

(Vardas, pavardė)

(Data)

Deividas Liužinas

LENKIMO MOMENTO ĮTAKA GELŽBETONINIŲ BESIJŲ PERDANGŲ
PRASPAUDIMO STIPRIUI
INFLUENCE OF BENDING MOMENT ON PUNCHING SHEAR STRENGTH
OF REINFORCED CONCRETE FLAT SLABS

Baigiamasis magistro darbas

Statinių konstrukcijų studijų programa, valstybinis kodas 621H21001

Pastatų konstrukcijų specializacija

Statybos inžinerijos studijų kryptis E05

Vadovas

doc. dr. Remigijus Šalna
(Pedag. vardas, vardas, pavardė)

Lietuvių kalbos konsultantė

lektorė Lina Rutkienė
(Pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

(Parašas)

(Data)

Vilnius, 2018

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
STATYBOS FAKULTETAS
GELŽBETONINIŲ KONSTRUKCIJŲ IR GEOTECHNIKOS KATEDRA

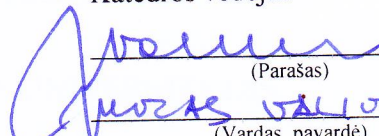
Statybos inžinerijos studijų kryptis

Statinių konstrukcijų studijų programa, valstybinis kodas 621H21001

Pastatų konstrukcijų specializacija

TVIRTINU

Katedros vedėjas


(Parašas)
MORAS VALIŠONIS
(Vardas, pavardė)
2018.06.07
(Data)

**BAIGIAMOJO BAKALAURO DARBO (PROJEKTO)
UŽDUOTIS**

.....Nr.
Vilnius

Studentui **Deividui Liužinui**
(Vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo (projekto) tema: **Lenkimo momento įtaka gelžbetoninių besijų perdangų praspaudimo stipriui**

patvirtinta 2018 m. kovo 14 d. dekanų potvarkiu Nr. 102ST

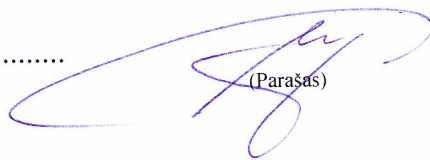
Baigiamojo darbo (projekto) užbaigimo terminas 2018 m.d.

BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO) UŽDUOTIS:

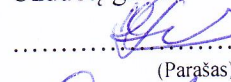
1. Atlikti skaičiavimo modelių lyginamąją analizę ir nustatyti kokie parametrai vertinami projektavimo normose skaičiuojant praspaudimo stiprį;
2. Atlikti parametrinę praspaudimo modelių analizę ir nustatyti parametrus, turinčius didžiausią įtaką plokštės praspaudimo laikomajai galiai;
3. Nustatyti, kokią įtaką plokštės praspaudimo laikomajai galiai turi lenkimo momento ir skersinės jėgos santykis (M/V);
4. Atlikti praspaudimo skaičiavimo modelių laikomosios galios funkcijos argumentų statistinį vertinimą ir nustatyti, kokia jų įtaka praspaudimo stipriui.
5. Atlikti įvairių autorių eksperimentinių tyrimų analizę ir nustatyti įvairių normų modelių sisteminę ir atsitiktinę paklaidą. Nustatyti modelių tikslumą, kai yra vertinama ir nevertinama lenkimo momento įtaka.

Baigiamojo bakalauro darbo (projekto) konsultantai:
.....
(Pedag. vardas, vardas, pavardė)

Vadovas doc. dr. Remigijus Šalna
.....
(Pedag. vardas, vardas, pavardė)


(Parašas)

Užduotį gavau


(Parašas)
Deividus Liužinis
(Vardas, pavardė)
2018-10-10
(Data)

(Baigiamojo darbo sąžiningumo deklaracijos forma)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Deividas Liužinas, 20122945

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

Statybos fakultetas

(Fakultetas)

Statinių konstrukcijos, PKfm-16

(Studijų programa, akademinė grupė)

BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO)

SĄŽININGUMO DEKLARACIJA

2018 m. birželio 06 d.

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „Lenkimo momento įtaka gelžbetoninių besijų perdangų praspaudimo stipriui“ patvirtintas 2018 m. kovo 14 d. dekanų potvarkiu Nr. 102st, yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Parenkant ir įvertinant medžiagą bei rengiant baigiamąjį darbą, mane konsultavo mokslininkai ir specialistai: doc. dr. Remigijus Šalna. Mano darbo vadovas doc. dr. Remigijus Šalna.

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



(Parašas)

Deividas Liužinas
(Vardas ir pavardė)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas Statybos fakultetas Gelžbetoninių konstrukcijų ir geotechnikos katedra	ISBN Egz. sk. Data-.....-.....
Antrosios pakopos studijų Statinių konstrukcijų programos magistro baigiamasis darbas	
Pavadinimas	Lenkimo momento įtaka gelžbetoninių besijų perdangų praspaudimo stipriui
Autorius	Deividas Liužinas
Vadovas	Remigijus Šalna
Kalba: lietuvių	
Anotacija Baigiamajame magistro darbe nagrinėjama lenkimo momento ir skersinės jėgos įtaka gelžbetoninių plokščių praspaudimo laikomajai galiai. Darbą sudaro šie skyriai: literatūros šaltinių apžvalga, analitinė dalis, eksperimentinė dalis. Analitinėje dalyje pateikta praspaudimo skaičiavimo modelių lyginamoji, parametrinė ir statistinė analizė, bei nustatyti veiksniai, turintys įtakos praspaudimo stipriui. Eksperimentinėje dalyje surinkti įvairių autorių eksperimentinių tyrimų duomenys bei atliktas eksperimentinių ir teorinių reikšmių palyginimas, skaičiuojant praspaudimo stiprį. Remiantis šiais duomenimis, nustatytas įvairių skaičiavimo modelių tikslumas. Remiantis atliktų analizių duomenimis, suformuotos pagrindinės darbo išvados ir rekomendacijos. Darbo apimtis 106 p., 66 paveikslai, 7 lentelės.	
Prasminiai žodžiai: gelžbetoninė plokštė, praspaudimo galia, eksperimentiniai tyrimai, skaičiavimo modelis, lenkimo momentas.	

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

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

Master Degree Studies **Structural Engineering** study programme Master Graduation Thesis

Title **Influence of bending moment on punching shear strength of reinforced concrete flat slabs**

Author **Deividas Liuzinas**

Academic supervisor **Remigijus Šalna**

Thesis language: Lithuanian

Annotation

The master theses deal with influence of bending moment and shear force ratio on punching shear strength of reinforced concrete floor slabs.

The theses consist of these parts: review of scientific literature, analytical and experimental parts. The analytical part presents comparison of different punching shear strength models, and its parametric and statistical analysis. The factors, influencing punching shear strength is estimated in this part. The test results are collected, and analyzed in experimental part. The comparison of test results and theoretical calculations was also conducted and accuracy of calculation models is defined.

The main conclusion and recommendations were drawn based on theoretical and experimental analysis.

Thesis consists of 106 pages, 66 illustrations, 7 tables.

Keywords: reinforced concrete slab, punching shear, experimental research, calculation model, bending moment.

Turinys

IVADAS.....	14
1.LITERATŪROS APŽVALGA.....	15
1.1.Gelžbetoninės plokštės praspaudimo laikomosios galios skaičiavimas	15
1.1.1.Praspaudimo skaičiavimo modelis pagal Eurokodą 2. Gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas. 1-1 dalis. Bendrosios ir pastatų taisyklės.....	16
1.1.2.Praspaudimo skaičiavimo modelis pagal STR 2.05.05.2005 „Betoninių ir gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas“	19
1.1.3.Praspaudimo skaičiavimo modelis pagal ACI318 „Statybos normos ir reikalavimai gelžbetoninėms konstrukcijoms“	20
1.1.4. Kitų autorių modelių apžvalga	21
1.2.Pirmojo skyriaus išvados ir darbo tikslo formavimas	24
2.PERDANGOS PLOKŠTĖS PRASPAUDIMO MODELIŲ ANALIZĖ	25
2.1.Skaičiavimo metodų lyginamoji analizė	25
2.2.Plokštės praspaudimo laikomosios galios parametrinė analizė	27
2.2.1.Plokštės betono stiprio įtaka praspaudimo laikomajai galiai.....	28
2.2.2.Plokštės naudingojo aukščio įtaka praspaudimo laikomajai galiai	29
2.2.3.Plokštės tempiamo sluoksnio išilginės armatūros kiekio įtaka praspaudimo laikomajai galiai	30
2.2.4.Kolonos kraštinės ilgio įtaka plokštės praspaudimo laikomajai galiai	31
2.3.Koeficiento β ribų apskaičiavimas	33
2.3.1.Skaitinio modelio sudarymas	33
2.3.2.Lenkimo momento ir skersinės jėgos M/V santykio ribų nustatymas	34
2.4.Parametrinė koeficiento β analizė	35
2.4.1.Vidinės kolonos koeficiento β analizė.....	35
2.4.2.Kraštinės kolonos koeficiento β analizė	38
2.5.Praspaudimo modelių laikomosios galios funkcijos argumentų statistinis vertinimas	40
2.5.1.Teorinis praspaudimo stiprio skaičiavimo formulės parametrų vertinimas pagal EC2	41
2.5.2.Teorinis praspaudimo stiprio skaičiavimo formulės parametrų vertinimas pagal STR2.05.05:2005	48
2.5.3.Teorinis praspaudimo stiprio skaičiavimo formulės parametrų vertinimas pagal ACI318.....	55
2.6.Antrojo skyriaus išvados	59
3.EKSPERIMENTINIŲ TYRIMŲ ANALIZĖ.....	61

3.1. Gelžbetoninių plokščių praspaudimo laikomosios galios eksperimentiniai tyrimai, kuriuose nevertinamas lenkimo momentas.....	63
3.1.1. Perdangos plokštės praspaudimo laikomosios galios reikšmių palyginimas	65
3.1.2. Gelžbetoninių plokščių praspaudimo laikomosios galios regresinė analizė	68
3.1.3. Tikslumo priklausomybė nuo betono stiprio f_c	69
3.1.4. Tikslumo priklausomybė nuo plokštės naudingo aukščio d	70
3.1.5. Tikslumo priklausomybė nuo tempiamos plokštės zonos armavimo koeficiento ρ_l	71
3.1.6. Tikslumo priklausomybė nuo kolonos kraštinės ilgio c	72
3.2. Gelžbetoninių plokščių praspaudimo laikomosios galios eksperimentiniai tyrimai, kuriuose vertinamas lenkimo momentas	73
3.2.1. Perdangos plokštės praspaudimo laikomosios galios reikšmių palyginimas	74
3.3. Gelžbetoninių plokščių praspaudimo laikomosios galios regresinė analizė, kai eksperimentuose vertinamas lenkimo momentas	77
3.3.1. Tikslumo priklausomybė nuo betono stiprio f_c	77
3.3.2. Tikslumo priklausomybė nuo plokštės naudingo aukščio d	78
3.3.3. Tikslumo priklausomybė nuo tempiamos plokštės zonos armavimo koeficiento ρ_l	79
3.3.4. Tikslumo priklausomybė nuo kolonos kraštinės ilgio c	80
3.3.5. Sisteminės ir atsitiktinės modelių paklaidos.....	81
3.4. Trečiojo skyriaus išvados.....	82
BENDROSIOS IŠVADOS IR REKOMENDACIJOS	84
LITERATŪROS SĄRAŠAS	86
PRIEDAI.....	88

Paveikslų sąrašas

1.1 pav. EC2 praspaudimo modelio schema (Daubaras 2016).....	16
1.2 pav. Šlyties pasiskirstymas dėl nesubalansuoto momento ties plokštės ir vidinės kolonos jungtimi (Eurokodas 2 2005).....	17
1.3 pav. Rekomenduojamų β koeficiento reikšmių priklausomybė nuo kolonos padėties perdangos plokštės atžvilgiu (Eurokodas 2 2005).....	18
1.4 pav. Kampinės kolonos sumažinto pagrindinio tikrinamojo perimetro ribos (Eurokodas 2 2005).....	18
1.5 pav. STR2.05.05:2005 praspaudimo modelio schema (Daubaras 2016)	19
1.6 pav. Kampinės kolonos sumažinto pagrindinio tikrinamojo perimetro ribos (STR 2)	20
1.7 pav. ACI318 praspaudimo modelio schema (Daubaras 2016).....	20
1.8 pav. Praspaudimo skaičiavimas pagal S. Kinnuneno ir B. Nylanderio modelį (Kinnunen, Nylander 1960).....	22
1.9 pav. Praspaudimo skaičiavimas pagal M. W. Breastrupo, M. P. Nielseno ir kitų modelį (Breastrop, Nielsen 1976).....	22
1.10 pav. Praspaudimo skaičiavimas pagal T. Georgopouluso modelį (Georgopoulos 1989).	22
1.11 pav. Praspaudimo skaičiavimas pagal Ph. Menetrey modelį (Menetrey 2002).....	23
1.12 pav. Praspaudimo skaičiavimas pagal D. D. Theodorakopoluso modelį (Theodorakopoluso 2002)	23
2.1 pav. Normose pateikiamų praspaudimo pavojingų pjūvių ir perimetrų palyginimas.....	25
2.2 pav. Plokštės praspaudimo laikomosios galios priklausomybė nuo betono stiprio.....	28
2.3 pav. Plokštės praspaudimo laikomosios galios priklausomybė nuo plokštės naudingojo aukščio.....	29
2.4 pav. Plokštės tempiamos zonos išilginės armatūros kiekio įtaka plokštės praspaudimo laikomajai galiai	31
2.5 pav. Kvadratinės kolonos kraštinės ilgio įtaka plokštės praspaudimo laikomajai galiai....	32
2.6 pav. Skaitinio modelio schema ir analizuojami elementai	33
2.7 pav. Koeficiento β kitimas, kintant kolonos raštinės ilgiui c	36
2.8 pav. Koeficiento β kitimas, kintant plokštės naudingajam aukščiui d	36
2.9 pav. Koeficiento β kitimas, kintant M/V ir esant skirtingiems d (Pagal EC2 normose pateiktą modelį).....	37
2.10 pav. Koeficiento β kitimas, kintant M/V ir esant skirtingiems d (Pagal STR2 normose pateiktą modelį)	37
2.11 pav. Koeficiento β kitimas, kintant kolonos kraštinės ilgiui c	38

2.12 pav. Koeficiento β kitimas, kintant plokštės naudingajam aukščiui d	39
2.13 pav. Koeficiento β kitimas, kintant M/V ir esant skirtingiems d (pagal EC2).....	39
2.14 pav. Koeficiento β kitimas, kintant M/V ir esant skirtingiems d (pagal STR2).....	40
2.15 pav. Funkcijos argumentų įtaka praspaudimo stipriui priklausomai nuo d ($M/V = 0,052 m$)	42
2.16 pav. Funkcijos argumentų įtaka praspaudimo stipriui priklausomai nuo d ($M/V = 0,14 m$)	42
2.17 pav. Funkcijos argumentų įtaka praspaudimo stipriui priklausomai nuo d ($M/V = 0,41 m$)	43
2.18 pav. Funkcijos argumentų įtaka praspaudimo stipriui priklausomai nuo d ($M/V = 0,43 m$)	44
2.19 pav. Funkcijos argumentų įtaka praspaudimo stipriui priklausomai nuo d ($M/V = 0,49 m$)	45
2.20 pav. Funkcijos argumentų įtaka praspaudimo stipriui priklausomai nuo d ($M/V = 0,78 m$)	45
2.21 pav. Funkcijos argumentų įtaka praspaudimo stipriui priklausomai nuo d ($a = 0,3 m$)...	46
2.22 pav. Funkcijos argumentų įtaka praspaudimo stipriui priklausomai nuo d ($a = 0,4 m$)...	47
2.23 pav. Funkcijos argumentų įtaka praspaudimo stipriui priklausomai nuo d ($a = 0,6 m$)...	48
2.24 pav. Funkcijos argumentų įtaka praspaudimo stipriui priklausomai nuo d ($M/V = 0,051 m$)	49
2.25 pav. Funkcijos argumentų įtaka praspaudimo stipriui priklausomai nuo d ($M/V = 0,14 m$)	49
2.26 pav. Funkcijos argumentų įtaka praspaudimo stipriui priklausomai nuo d ($M/V = 0,41 m$)	50
2.27 pav. Funkcijos argumentų įtaka praspaudimo stipriui priklausomai nuo d ($M/V = 0,43 m$)	51
2.28 pav. Funkcijos argumentų įtaka praspaudimo stipriui priklausomai nuo d ($M/V = 0,49 m$)	51
2.29 pav. Funkcijos argumentų įtaka praspaudimo stipriui priklausomai nuo d ($M/V = 0,78 m$)	52
2.30 pav. Funkcijos argumentų įtaka praspaudimo stipriui priklausomai nuo d ($a = 0,3 m$)...	53
2.31 pav. Funkcijos argumentų įtaka praspaudimo stipriui priklausomai nuo d ($a = 0,4 m$)...	54
2.32 pav. Funkcijos argumentų įtaka praspaudimo stipriui priklausomai nuo d ($a = 0,6 m$)...	54
2.33 pav. Funkcijos argumentų įtaka praspaudimo stipriui priklausomai nuo d ($a = 0,3 m$)...	55
2.34 pav. Funkcijos argumentų įtaka praspaudimo stipriui priklausomai nuo d ($a = 0,4 m$)...	55

2.35 pav. Funkcijos argumentų įtaka praspaudimo stipriui priklausomai nuo d ($a = 0,6\text{ m}$)...	56
2.36 pav. Funkcijos argumentų įtaka praspaudimo stipriui priklausomai nuo d ($a = 0,3\text{ m}$)...	56
2.37 pav. Funkcijos argumentų įtaka praspaudimo stipriui priklausomai nuo d ($a = 0,4\text{ m}$)...	57
2.38 pav. Funkcijos argumentų įtaka praspaudimo stipriui priklausomai nuo d ($a = 0,6\text{ m}$)...	57
2.39 pav. Funkcijos argumentų įtaka praspaudimo stipriui priklausomai nuo d ($a = 0,3\text{ m}$)...	58
2.40 pav. Funkcijos argumentų įtaka praspaudimo stipriui priklausomai nuo d ($a = 0,4\text{ m}$)...	58
2.41 pav. Funkcijos argumentų įtaka praspaudimo stipriui priklausomai nuo d ($a = 0,6\text{ m}$)...	59
3.1 pav. Gelžbetoninių plokščių skerspjūviai atlikus bandymus, kuriuose nebuvo kolonai suteiktas lenkimo momentas (Daubaras 2016).....	61
3.2. pav. Gelžbetoninės plokštės praspaudimo bandinio schema, suteikiant kolonai lenkimo momentą (Kozickiego, Urbana, Kosinskij et.al. 1988).....	62
3.3 pav. Gelžbetoninės plokštės praspaudimo bandinio schema, suteikiant kolonai lenkimo momentą (Pajaka 1988).....	62
3.4 pav. Tiriamų plokščių praspaudimo laikomosios galios pasiskirstymas, taikant skirtingose projektavimo normose pateiktas praspaudimo skaičiavimo metodikas	68
3.5 pav. Eksperimentų metu gautų ir apskaičiuotų praspaudimo laikomosios galios santykio reikšmių priklausomybė nuo plokštės betono stiprio f_c	69
3.6 pav. Eksperimentų metu gautų ir apskaičiuotų praspaudimo laikomosios galios santykio reikšmių priklausomybė nuo plokštės naudingojo aukščio	70
3.7 pav. Eksperimentų metu gautų ir apskaičiuotų praspaudimo laikomosios galios santykio reikšmių priklausomybė nuo plokštės išilginio armavimo koeficiento	71
3.8 pav. Eksperimentų metu gautų ir apskaičiuotų praspaudimo laikomosios galios santykio reikšmių priklausomybė nuo kolonos kraštinės ilgio	72
3.9 pav. Tiriamų plokščių praspaudimo laikomosios galios pasiskirstymas, taikant skirtingose projektavimo normose pateiktas praspaudimo skaičiavimo metodikas	76
3.10 pav. Eksperimentų metu gautų ir apskaičiuotų praspaudimo laikomosios galios santykio reikšmių priklausomybė nuo plokštės betono stiprio	77
3.11 pav. Eksperimentų metu gautų ir apskaičiuotų praspaudimo laikomosios galios santykio reikšmių priklausomybė nuo plokštės naudingojo aukščio	78
3.12 pav. Eksperimentų metu gautų ir apskaičiuotų praspaudimo laikomosios galios santykio reikšmių priklausomybė nuo plokštės išilginio armavimo koeficiento	80
3.13 pav. Eksperimentų metu gautų ir apskaičiuotų praspaudimo laikomosios galios santykio reikšmių priklausomybė nuo kolonos kraštinės ilgio	81

Lentelių sąrašas

2.1 lentelė. Projektavimo normų praspaudimo laikomosios galios skaičiavimo modelių parametrų vertinimas	26
2.2 lentelė. Kolonų jungčių su sija, lenkimo momento ir skersinės jėgos santykių reikšmės priklausomai nuo apkrovos derinio	34
3.1 lentelė. Gelžbetoninių plokščių be skersinės armatūros eksperimentinių tyrimų duomenys (Daubaras 2016)	63
3.2 lentelė. Bandinių be skersinės armatūros praspaudimo laikomosios galios lyginimas su apskaičiuotomis reikšmėmis.....	65
3.3 lentelė. Gelžbetoninių plokščių be skersinės armatūros eksperimentinių tyrimų duomenys.....	73
3.4 lentelė. Bandinių be skersinės armatūros praspaudimo laikomosios galios lyginimas su apskaičiuotomis reikšmėmis.....	74
3.5 lentelė. Atsitiktinės ir sisteminės paklaidos.....	82

Žymenys

- V_E – plokštėje veikianti skersinė jėga;
- V_R – plokštės laikomoji praspaudimo galia;
- v_E – plokštėje veikiantys tangentiniai įtempiai;
- v_R – plokštės praspaudimo tangentinių įtempių atlaikomoji reikšmė;
- $v_{c,min}$ – mažiausia betono atlaikomų tangentinių įtempių reikšmė;
- A_1 – praspaudimo pjūvio plotas;
- d – plokštės naudingasis aukštis;
- $V_{R,c}$ – plokštės betono praspaudimo laikomoji jėga;
- β – koeficientas vertinantis įrašų pasiskirstymą plokštėje;
- θ – praspaudžiamos plokštės betono piramidės posvyrio kampas;
- k – plokštės aukščio koeficientas;
- f_{ck} – charakteristinis gniuždomasis betono stipris;
- f_{cm} – vidutinis gniuždomasis betono stipris;
- u_1 – pagrindinio (pavojingojo) tikrinamojo perimetro ilgis;
- u_{1*} – sumažinto pagrindinio (pavojingojo) tikrinamojo perimetro ilgis;
- M_E – kolonos jungtyje su perdangos plokšte veikiantis lenkimo momentas;
- W_1 – pagrindinio tikrinamojo perimetro funkcija;
- $c(a)$ – kvadratinės kolonos kraštinės ilgis;
- P_{apkr} – apkrovos perdavimo perimetras;
- φ – darbo sąlygų koeficientas;
- σ – kvadratinė nuokrypa;
- ρ_l – plokštės tempiamos zonos išilginio armavimo koeficientas.

IVADAS

Gelžbetonis – tai kompozitinė medžiaga, plačiausiai naudojama statyboje bei statybinių konstrukcijų gamyboje. Ši medžiaga sudaryta iš dviejų statybos pramonėje plačiai naudojamų medžiagų – plieno ir betono. Šiuolaikinių pastatų ir statinių laikančiosios konstrukcijos nebeįsivaizduojamos be monolitinių ar gelžbetoninių surenkamųjų elementų, nes ši kompozitinė medžiaga, plačiai naudojama dėl gerų fizinių ir mechaninių savybių, kuri atlaiko tempimo ir gniuždymo įtempius. Todėl gelžbetoninės konstrukcijos gali būti naudojamos lenkiamiems, tempiamiems, gniuždomiems ir sukamiems konstrukciniams elementams gaminti.

Gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas yra atsakingas procesas, pasižymintis įvairiomis skaičiavimo metodikomis ir prielaidomis. Vien Lietuvoje galioja dvi skirtingos projektavimo normos. Nelengva pasirinkti teisingą skaičiavimo metodiką ne tik dėl skirtingų skaičiavimo normų, bet ir dėl literatūroje pateikiamų skirtingų skaičiavimo modelių bei prielaidų. Skirtingų šalių projektavimo normos siūlo skirtingas skaičiavimo metodikas ir modelius: vienos normos vertina veikiančio lenkimo momento ir skersinės jėgos santykį, kitos – ne. Taip pat ne visos projektavimo normos vertina tempiamos armatūros armavimo kiekį skerspjūvyje. Skirtingose projektavimo normose skirtingai vertinamas pavojingas praspaudimo perimetras, betono stipris, kolonos matmetys ir pan.

Šiame magistro baigiamajame darbe yra atliekama gelžbetoninių besių perdangos plokščių be skersinės armatūros praspaudimo laikomosios galios analizė siekiant išsiaiškinti lenkimo momento įtaką praspaudimo stipriui, analizuojant skirtingose projektavimo normose pateiktus plokščių praspaudimo skaičiavimo modelius.

Kaip rodo kitų autorių atlikti tyrimai, didžiausią įtaką praspaudimo stipriui turi naudojamo betono stipris (f_c), tempiamos armatūros armavimo procentas skerspjūvyje (ρ_l), kolonos matmuo (c). Tačiau veikiančio lenkimo momento ir skersinės jėgos santykio (M/V) įtaka yra analizuota pakankamai neišsamiai. Todėl šiame darbe siekiama išsiaiškinti, kokią reikšmę turi lenkimo momentas plokštės praspaudimo stipriui.

1. LITERATŪROS APŽVALGA

1.1. Gelžbetoninės plokštės praspaudimo laikomosios galios skaičiavimas

Skaičiuojant pagal skirtingas projektavimo normas, plokštės praspaudimo laikomoji galia V_R visais skaičiuojamais atvejais turi būti didesnė už veikiančią praspaudimo jėgą V_E . Veikiančioji jėga susidaro nuo perdangos plokštės savojo svorio ir jos nuolatinių bei kintamų apkrovų. Šios jėgos reikšmė gaunama išrenkant nepalankiausią nuolatinių ir kintamų apkrovų derinį bei taikant dalinius patikimumo ir derinio koeficientus. Magistro baigiamajame darbe apkrovoms ir įrašoms daliniai patikimumo koeficientai netaikomi siekiant suvienodinti skirtingų projektavimo normų skaičiavimo rezultatus.

Įvairiuose skaičiavimo modeliuose kerpančioji jėga sukelia tangentinius įtempius v_E , kurie pasiskirsto atitinkamame (sąlyginiame) plote A_l . Šis sąlyginis plotas priklauso nuo skaičiavimo modelio. Gelžbetoninėse besijėse perdangos plokštėse veikianti kerpančioji jėga yra apskaičiuojama pagal bendrąją išraišką:

$$V_E = v_E \cdot A_l. \quad (1.1)$$

Plotas A_l yra apibrėžiamas plokštės efektyviuoju aukščiu d ir praspaudžiamuoju perimetro nuotoliu nuo kolonos krašto atstumu $t \cdot d$. Daugiklis t priimamas pagal modelyje nurodytą pavojingiausio pjūvio atstumą nuo plokštės atramos (kolonos) krašto. Pavojingiausių pjūvių ribos skirtingiems skaičiavimo modeliams pagal skirtingas projektavimo normas pateiktos 1.1-1.3 paveiksluose.

Skaičiuojant pagal pasirinktą skaičiavimo modelį nustatoma praspaudžiamoji atlaikomoji galia V_R , kurią sudaro dvi laikomosios galios dedamosios: betono $V_{R,c}$ ir skersinės armatūros $V_{R,s}$. Betono stiprio dedamoji paprastai priklauso nuo betono tempiamojo arba kerpamojo stiprio, išilginio armavimo kiekio, plokštės aukščio efekto. Skersinės armatūros dedamoji priklauso nuo skersinės armatūros tipo (liauna ar standi), skersinės armatūros stiprio, armavimo kiekio, išdėstymo tipo, išdėstymo kampo ir kt. Šie veiksniai projektavimo normose vertinami skirtingai, todėl jų analizė pateikiama kituose skyriuose.

Monolitinėse besijėse perdangos plokštėse be skersinio armavimo, visą praspaudžiamąją jėgą reikia atlaikyti betonui. Betono praspaudžiamosios jėgos skaičiavimas išreiškiamas per tangentinių įtempių ir pavojingo pjūvio ploto sandaugą:

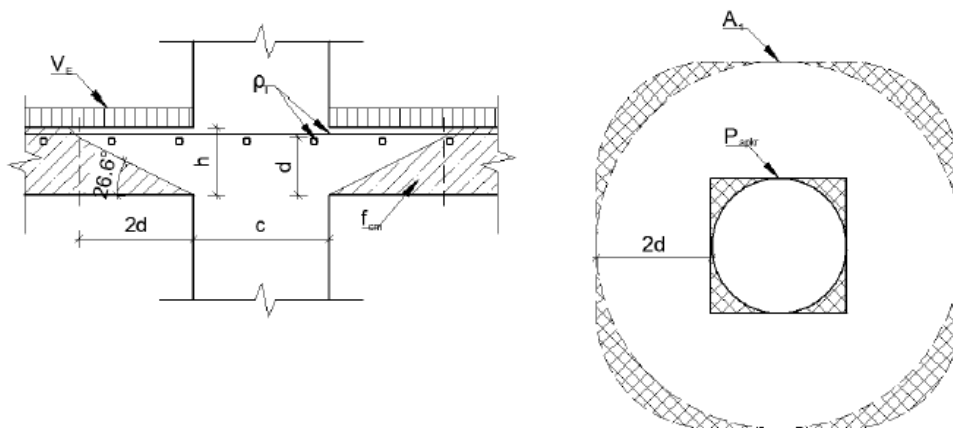
$$V_R = v_R \cdot A_l. \quad (1.2)$$

Projektuojant pagal skirtingas projektavimo normas skirtingai vertinama betono atlaikomoji jėga, priklausomai nuo betono darbo sąlygų. Įvairiose projektavimo normose darbo

sąlygos vertinamos skirtingai, tačiau bendrumas yra tas, kad betono atlaikomieji kirpimo įtempiai dalinami iš konstrukcijos darbo sąlygų koeficiento. Projektavimo normose (EC2) priimamas koeficientas β , kuris vertina perdangos plokštės ir kolonos jungtyje veikiančius lenkimo momentus. STR normose šios sąlygos vertinamos taip pat kaip ir EC2, o normose ACI318 tiesiog vertinamas darbo sąlygų koeficientas ϕ , neatsižvelgiant į lenkimo momento reikšmę. Skaiciuojant betono tangentinius įtempius vertinami argumentai: betono stipris, naudingasis plokštės aukštis, plokštės tempiamosios zonos armavimas ir pavojingas (jėgos perdavimo) plotas.

1.1.1. Praspaudimo skaičiavimo modelis pagal Eurokodą 2. Gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas. 1-1 dalis. Bendrosios ir pastatų taisyklės

Praspaudimo laikomosios galios modelyje EC2 priimta, kad pavojingas praspaudimo plotas yra perimetru, kuris nutolęs $2d$ atstumu nuo kolonos krašto, o praspaudžiamos nupjautinės piramidės posvyrio kampas priimamas $\theta = 26,6^\circ$ (žr. 1.1 pav.)



1.1 pav. EC2 praspaudimo modelio schema (Daubaras 2016)

Betono praspaudimo atlaikomoji jėga apskaičiuojama taikant formulę:

$$V_{R,c} = v_{R,c} \cdot A_1 / \beta = 0,18 \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{1/3} \cdot u_1 \cdot d / \beta; \quad (1.3)$$

$$\beta = 1 + k \frac{M_{Ed}}{V_{Ed}} \cdot \frac{u_1}{W_1}; \quad (1.4)$$

čia:

k – plokštės storio koeficientas;

ρ_l – plokštės tempiamosios zonos išilginio armavimo koeficientas;

f_{ck} – betono charakteristinis gniuždomasis stipris.

Skaiciuojant betono praspaudimo atlaikomąją galią yra įvedami ją mažinantys apribojimai. Pavyzdžiui, plokštės aukščio koeficientas, kuris esant plokštės naudingajam aukščiui, didesniai kaip 200 milimetrų, mažina plokštės praspaudimo laikomąją galią (1.5). Taip pat ribotas plokštės tempiamos zonos išilginio armatūros kiekis – ρ_l negali viršyti 0,02 reikšmės.

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2. \quad (1.5)$$

Tačiau, skaičiuojant bedrąją gelžbetoninės plokštės praspaudimo laikomąją galią, būtina įvertinti ir darbo sąlygų koeficientą, naudingąjį plokštės aukštį bei pagrindinį (pavojingą) praspaudimo perimetrą, kurie atsispindi (1.3) formulėje, kurioje:

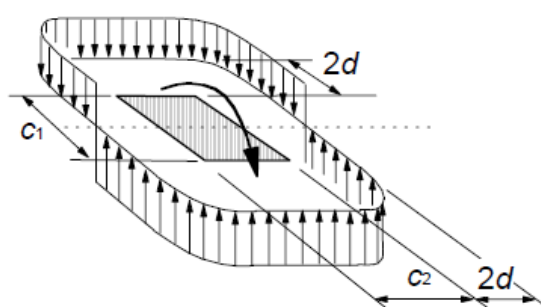
u – pagrindinio tikrinamojo perimetro ilgis, priklausantis nuo plokštės naudingojo aukščio d ir nuo kolonos kraštinės ilgio c (žr. 1.1 pav.);

d – naudingasis plokštės aukštis;

β – koeficientas, vertinantis lenkimo momento įtaką;

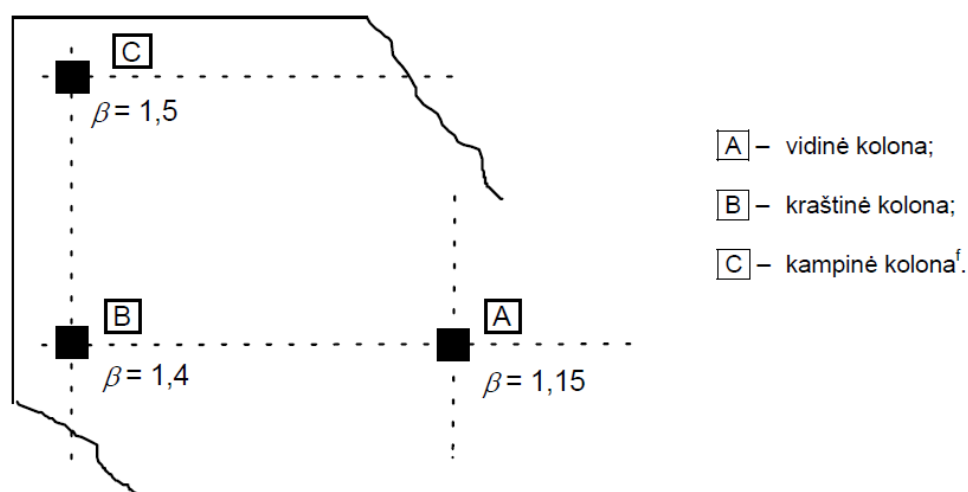
$\frac{M}{V}$ – veikiančio lenkimo momento ir skersinės jėgos santykis;

W_1 – atitinka 1.2 paveiksle pavaizduotą šlyties pasiskirstymą ir yra pagrindinio tikrinamojo perimetro u_1 funkcija.



1.2 pav. Šlyties pasiskirstymas dėl nesubalansuoto momento ties plokštės ir vidinės kolonos jungtimi (Eurokodas 2 2005)

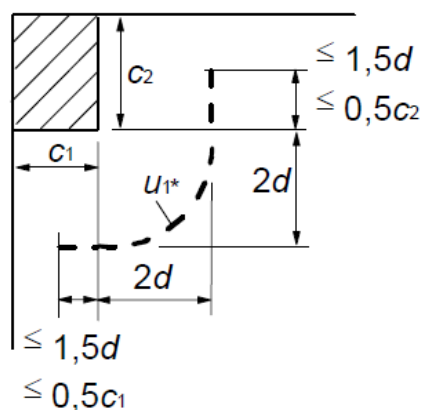
Pažymėtina, kad EC2 normose lenkimo momento įtaka praspaudimo laikomajam stipriui skaičiuoti vertinama dviem būdais: koeficientas β – gali būti skaičiuojamas pagal (1.4) formulę tiesiogiai vertinant lenkimo momento ir skersinės jėgos santykio įtaką ir netiesiogiai – kai koeficientą β galima pasirinkti pagal atitinkamą situaciją. Kai kolona yra vidinė – $\beta = 1,15$, kai kolona kraštinė – $\beta = 1,4$, o kai kolona kampinė – $\beta = 1,5$ (1.3 pav).



1.3 pav. Rekomenduojamų β koeficiento reikšmių priklausomybė nuo kolonos padėties perdangos plokštės atžvilgiu (Eurokodas 2 2005)

Priklausomai nuo kolonos padėties perdangos plokštės atžvilgiu, betono praspaudimo atlaikomieji įtempiai gali būti sumažinami nuo 13 % iki 33 %. Pabrėžtina, kad skaičiuojant kampinės kolonos praspaudimo laikomąją galią, M/V įtaka nevertinama. Koeficientas β (1.6) apskaičiuojamas įvertinant sumažintą pagrindinį perimetrą u_1^* (1.4 pav.).

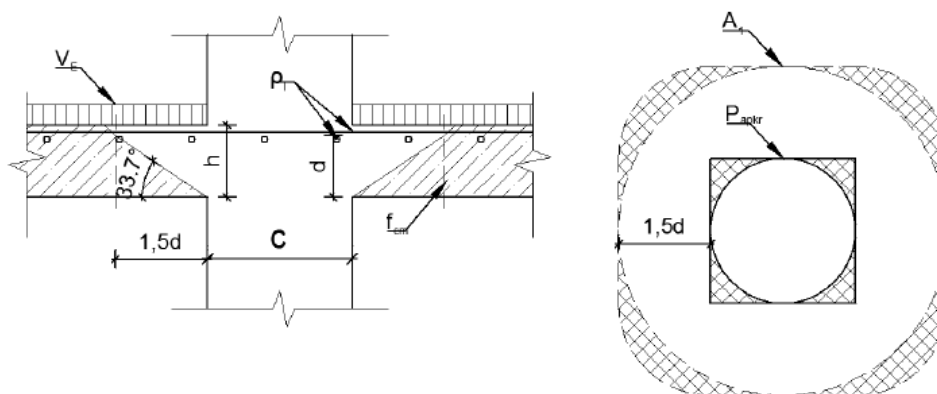
$$\beta = \frac{u_1}{u_1^*} . \quad (1.6)$$



1.4 pav. Kampinės kolonos sumažinto pagrindinio tikrinamojo perimetro ribos (Eurokodas 2 2005)

1.1.2. Praspaudimo skaičiavimo modelis pagal STR 2.05.05.2005 „Betoninių ir gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas“

Statybos techninis reglamentas 2.05.05:2005 – naudojamas Lietuvoje statybos techninis reglamentas. (toliau STR 2). Šios normos yra panašios į EC2, tačiau galima rasti nemažai nuostatų ir iš SNiP2 normų. Praspaudimo laikomosios galios skaičiavimo modelis panašus į 1.1.1. poskyryje aprašytą EC2 modelį. Esminis skirtumas, skaičiuojant gelžbetoninės plokštės praspaudimo laikomąją galią, yra tas, kad STR 2 normose, pagrindinio pjūvio perimetras u yra vertinamas kitaip: pavoingas pjūvis nuo kolonos krašto apibrėžiamas $1,5d$ atstumu, o tai atitinka $\theta = 37,7^\circ$ praspaudžiamos betono prizmės kampą (žr. 1.5 pav.)



1.5 pav. STR2.05.05:2005 praspaudimo modelio schema (Daubaras 2016)

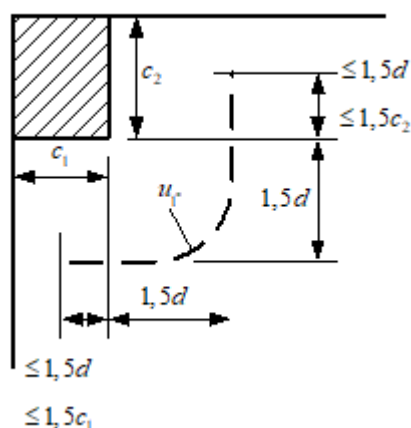
STR 2 normose betono praspaudimo atlaikomosios jėgos skaičiavimas yra analogiškas EC2 normose pateiktam skaičiavimui:

$$V_{R,c} = v_{R,c} \cdot A_1 / \beta = 0,18 \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{1/3} \cdot u_1 \cdot d / \beta. \quad (1.7)$$

STR 2 projektavimo normose koeficientą β , kaip ir normose EC2, leidžiama arba pasirinkti oruklausomai nuo kolono padėties, arba skaičiuoti, tiesiogiai įvertinant lenkimo momento ir skersinės jėgos įtaką praspaudimo atlaikomajai galiai.

Pabrėžtina, kad skaičiuojant kampinės kolonos praspaudimo laikomąją galią, M/V įtaka nevertinama. Koeficientas β (1.8) apskaičiuojamas įvertinant sumažintą pagrindinį perimetrą u_{1*} (1.6 pav.).

$$\beta = \frac{u_1}{u_{1*}}. \quad (1.8)$$

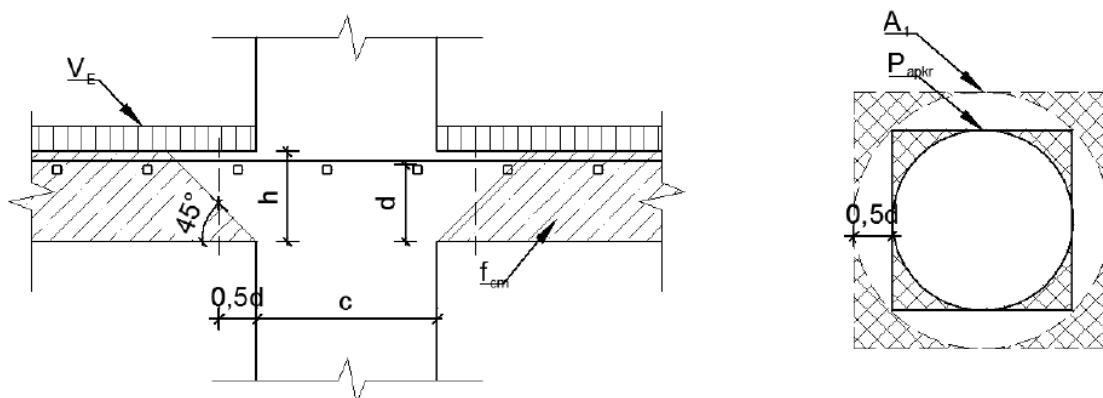


1.6 pav. Kampinės kolonos sumažinto pagrindinio tikrinamojo perimetro ribos (STR 2)

1.1.3. Praspaudimo skaičiavimo modelis pagal ACI318 „Statybos normos ir reikalavimai gelžbetoninėms konstrukcijoms“

ACI318 – Jungtinių Amerikos Valstijų gelžbetoninių konstrukcijų statybos normos ir reikalavimai.

Lyginant plokštės praspaudimo skaičiavimo modelį pagal amerikiečių normas su Lietuvoje galiojančiomis projektavimo normomis, pastebimas esminis skirtumas yra tas, kad vertinamas pavojingas praspaudžiamasis perimetras yra ženkliai mažesnis – $0,5d$ nuo kolonos krašto, o praspaudžiamos piramidės posvyrio kampas yra $\theta = 45^\circ$. Tačiau dėl vertinamo mažo atstumo nuo kolonos krašto iki pavojingo pjūvio krašto ACI318 normose analizuojamas kitoks iirties pobūdis nei anksčiau aprašytuose modeliuose (žr. 1.7 pav.).



1.7 pav. ACI318 praspaudimo modelio schema (Daubaras 2016)

Iš formulių matyti, kad, priėmus mažesnę praspaudimo plotą, tangentiniai įtempiai, veikiantys betone bus, didesni. Atlaikomosios plokštės praspaudimo galios skaičiavimas

skiriasi nuo Lietuvoje galiojančiose normose pateiktų skaičiavimų. Plokštės praspaudimo atlaikomoji galia apskaičiuojama pagal (1.9) formulę, pasirenkant mažiausią iš reikšmių:

$$V_{R,c} = \min \left\{ \begin{aligned} v_{R,c} \cdot \phi \cdot A_1 &= 4 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot \phi \cdot u \cdot d \\ v_{R,c} \cdot \phi \cdot A_1 &= \left(\frac{40 \cdot d}{u} + 2 \right) \cdot \sqrt{f'_c} \cdot \phi \cdot u \cdot d \end{aligned} \right\}. \quad (1.9)$$

Pažymėtina, kad JAV normose, skaičiuojant plokštės praspaudimo laikomąją galią, nėra ribojamas plokštės aukštis, tačiau ribojamas betono stipris iki 34,5 MPa. Didžiausia jėga, kuria galima apkrauti plokštę (žr. (1.10) formulę), priklauso nuo naudojamo betono stiprio, naudingojo plokštės aukščio, bei kolonos geometrijos ir jos kraštinės ilgio.

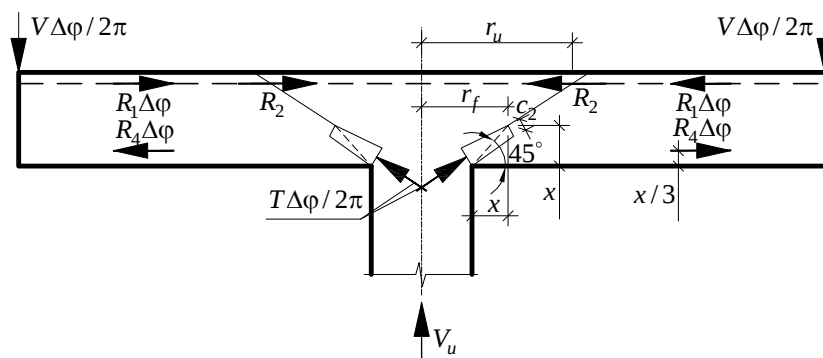
$$V_{R,c} = 6 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot u \cdot d. \quad (1.10)$$

Skirtingai nei Lietuvoje galiojančiose projektavimo normose, JAV normose, skaičiuojant betono atlaikomąją praspaudimo galią, nevertinamas nei tempiamos zonos išilginio armavimo koeficientas ρ_l , nei plokštės dydžio koeficientas k . Taip pat nėra vertinama ir lenkimo momento įtaka. Atlaikomoji praspaudimo galia mažinama per konstrukcijos darbo sąlygų koeficientą ϕ , kuris didina betone veikiančius kerpamuosius (tangentinus) įtempius.

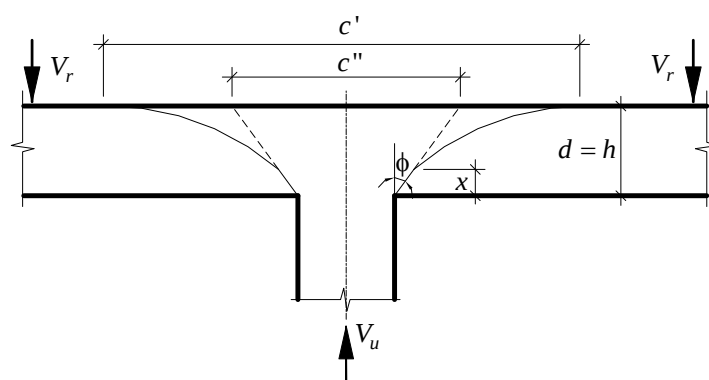
Pastebima, kad ACI normose, skaičiuojant plokštės praspaudimo laikomąją galią, lenkimo momento įtaka nevertinama.

1.1.4. Kitų autorių modelių apžvalga

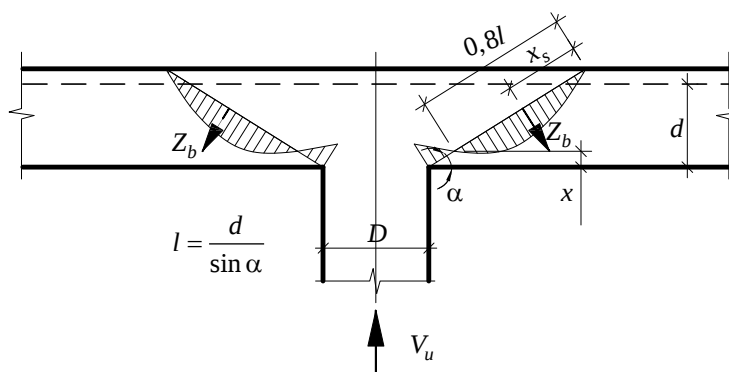
Praspaudimo tematika yra parašyta daug publikacijų. Ši tematika pradėta nagrinėti 1960 m., kai S. Kinnuenas ir B. Nylanderis (1.8 pav.) pasiūlė pirmą praspaudimo skaičiavimo modelį, kurio pagrindu mokslininkai J. Moe (1961 m.), M. Breastropas (1976 m.), T. Georgopolusas (1989 m.), C.E. Bromsas (1990 m.), J. Halgrenas (1998 m.), Ph. Menterey (2002 m.) (1.9-1.12 paveikslai) ir kt. yra pasiūlę modelio modifikacijų. Apibendrinant praspaudimo skaičiavimo modelius galima teigti, kad buvo taikomos skirtingos teorijos: vieni modeliai grįsti tamprumo ir plastiškumo teorijomis, kiti – mechanikos pagrindais, kuriuose suirimas įvyksta giuždomąją plokštės zoną nukerpant svarbiausiems įtempiams. Deja, visuose aptartuose skaičiavimo modeliuose nevertinama lenkimo momento įtaka.



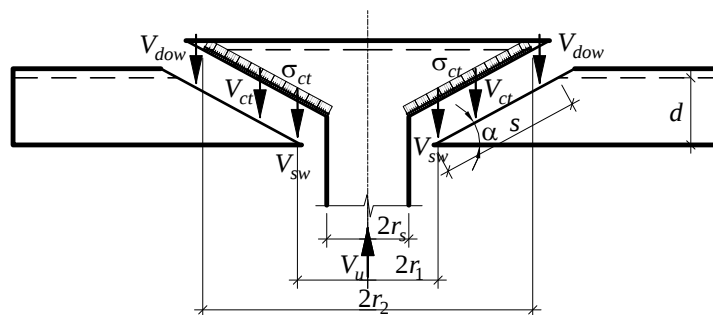
1.8 pav. Praspaudimo skaičiavimas pagal S. Kinnunen ir B. Nylanderio modelį (Kinnunen, Nylander 1960)



1.9 pav. Praspaudimo skaičiavimas pagal M. W. Breastrupo, M. P. Nielseno ir kitų modelį (Breastrup, Nielsen 1976)



1.10 pav. Praspaudimo skaičiavimas pagal T. Georgopoulou modelį (Georgopoulos 1989)



The diagram illustrates a beam-column joint. A horizontal beam is shown with a dashed centerline. A vertical column is attached to the bottom of the beam. At the joint, several force vectors are shown: V_{dow} (downward), V_c (upward), and V_{cc} (diagonal). The angle between the beam axis and the diagonal force V_{cc} is labeled α . The horizontal distance from the joint to the point of application of V_{dow} is labeled x . The vertical distance from the joint to the top of the beam is labeled d . A vertical force V_u is shown acting upwards on the column below the joint.

23

1.2. Pirmojo skyriaus išvados ir darbo tikslo formavimas

Atlikus literatūros šaltinių apžvalgą, nustatyta, kad projektavimo normos skirtingai vertina M/V įtaką praspaudimo laikomajai galiai: STR ir EC2 normose vertinama M/V , ACI318 – ne. Be to, M/V įtaka STR 2 ir EC2 normose vertinama taip pat skirtingai: skaičiuojant lenkimo momentą vertinantį koeficientą β , taikomi skirtingi pavoingo perimetro ilgiai, ir skirtinga lenkimo momento funkcija w_1 . Be to, atlikta literatūros šaltinių analizė parodė, kad ne visuose įvairių autorių pateiktuose skaičiavimo modeliuose vertinama M/V santykio įtaka laikomajai praspaudimo galiai skaičiuoti.

Todėl **darbo tikslas** – atlikti analizę ir nustatyti, kokia yra faktinė M/V įtaka praspaudimo stipriui projektavimo normose, kuriose ji vertinama ir kaip ši įtaka atstojama projektavimo normose, kuriose M/V nevertinama.

Tikslui pasiekti keliama tokie **uždaviniai**:

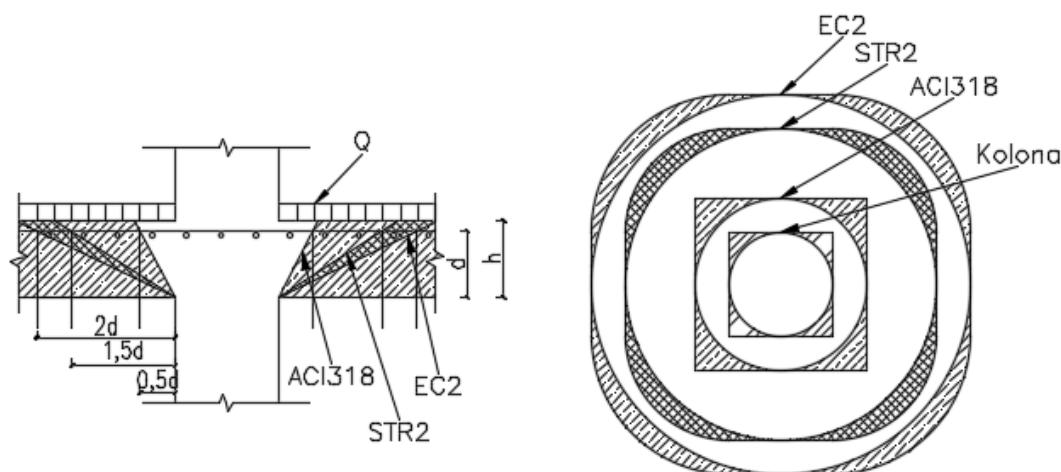
1. Atlikti skaičiavimo modelių lyginamąją analizę ir nustatyti, kokie parametrai vertinami projektavimo normose skaičiuojant praspaudimo stiprį.
2. Atlikti parametrinę praspaudimo modelių analizę ir nustatyti parametrus, turinčius didžiausią įtaką plokštės praspaudimo laikomajai galiai.
3. Nustatyti, kokią įtaką plokštės praspaudimo laikomajai galiai turi lenkimo momento ir skersinės jėgos santykis (M/V).
4. Atlikti praspaudimo skaičiavimo modelių laikomosios galios funkcijos argumentų statistinį vertinimą ir nustatyti, kokia jų įtaka praspaudimo stipriui.
5. Atlikti įvairių autorių eksperimentinių tyrimų analizę ir nustatyti įvairių normų modelių sisteminės bei atsitiktinės paklaidas, nustatyti modelių tikslumą, kai yra vertinama lenkimo momento įtaka.

2. PERDANGOS PLOKŠTĖS PRASPAUDIMO MODELIŲ ANALIZĖ

2.1. Skaičiavimo metodų lyginamoji analizė

Analizuojant įvairias projektavimo normas, randama daug skirtumų: skirtingas skaičiavimo modelio sudarymas, kitokios prielaidos, nevienodos koeficientų reikšmės, skirtingi konstrukcijų irties pobūdžiai, nevienodi atitinkamų parametrų ribojimai bei skirtingas lenkimo momento įtakos vertinimas arba nevertinimas.

Nagrinėjant įvairių normų praspaudimo laikomosios galios skaičiavimus, pastebima, jog nevienodai vertinamas irties pobūdis ir pavoingo perimetro ribos. Pavoingo tikrinamojo pjūvio atstumai nuo kolonos krašto iki pavoingo pjūvio krašto ir pagrindiniai tikrinamieji perimetrai pateikti 2.1 paveiksle.



2.1 pav. Normose pateikiamų praspaudimo pavoingų pjūvių ir perimetrų palyginimas

Nagrinėjant 2.1 paveikslą, pastebimi dideli skirtumai tarp praspaudimo skaičiavimo ribų. Lyginant EC2 su ACI318, matome, kad skaičiuojant pagal EC2 priimamas praspaudimo perimetras yra net 4 kartus didesnis, o lyginant STR2.05.05:2005 su ACI318 – praspaudimo perimetras didesnis 3 kartus. Apibrėžiant šių normų praspaudimo perimetro ilgį santykiu, gautume: $EC2:STR2.05.05:2005:ACI318 = 2:1,5:0,5$. Tačiau skaičiuojant praspaudimo laikomąją galią pagal skirtingas projektavimo normas, atsiradęs skirtumas tarp praspaudžamojo ploto išlyginamas per tangentinius įtempius.

$$V_R = v_R \cdot A_1 \cdot \quad (2.1)$$

Skaiciuojant betono praspaudimo laikomąją galią pagal EC2 ir STR2.05.05:2005 normose pateiktus praspaudimo modelius, praspaudimo atlaikomoji galia yra mažinama per koeficientą β , kurio reikšmė priklauso nuo lenkimo momento reikšmės arba konstrukcijos padėties (1.3 pav.). Esminis skirtumas yra tai, jog pagal EC2 pavoingas perimetras tęsiasi $2d$ atstumu nuo kolonos krašto, o pasak, STR2.05.05:2005 normų, – $1,5d$, tačiau abiem atvejais faktinis lenkimo momentas mažinamas ta pačia reikšme.

ACI318 normose lenkimo momentas nevertinamas – betono praspaudimo atlaikomoji galia mažinama per darbo sąlygų koeficientą ϕ , kurio reikšmė dažniausiai priimama 0,9. Pabrėžtina, kad reikšmę pagal patirtį gali koreguoti projektuotojas.

Pastebima, jog priešingai nei Amerikoje, Lietuvoje galiojančių projektavimo normų pateikti praspaudimo modeliai vertina plokštės aukščio įtaką, taip pat skaičiuojant vertinamas plokštės tempiamosios zonos armavimo koeficientas. Kadangi pagal ACI normose pateiktą praspaudimo modelį suirimas vyksta arti kolonos, todėl teigiama, kad tempiamoji išilginė armatūra neturi įtakos plokštės praspaudimo atlaikomajai galiai (2.1 pav.).

EC2 ir STR2 normose pateiktuose praspaudimo skaičiavimo modeliuose vertinama plokštės naudingojo aukščio įtaka koeficientu k . Šis parametras atlaikomajai praspaudimo jėgai turi įtakos tuo atveju, kai plokštės naudingasis aukštis nėra didesnis už 0,2 m. Priešingu atveju koeficientas k prilyginamas 2,0 (žr. (1.5) formulę). Taip pat šiose normose vertinamas plokštės tempiamosios zonos išilginis armavimas, tačiau skaičiavimuose armavimo koeficientas ρ_l turi nustatytą maksimalią reikšmę – 2 %. Jei armatūros kiekis skerspjūvyje yra didesnis nei 2 %, tokiu atveju armavimo koeficientas prilyginimas maksimaliai reikšmei – 0,02.

Įvairios projektavimo normos skaičiavimo modeliams turi nustatytus tam tikrų parametru apribojimus. Viršijus nustatytą maksimalią ribą, priimama maksimali leistina parametro reikšmė arba priešingai – jo įtaka nebevertinama. Normų praspaudimo analizės nustatytų parametru vertinimas pateiktas 2.1 lentelėje.

2.1 lentelė. Projektavimo normų praspaudimo laikomosios galios skaičiavimo modelių parametru vertinimas

Projektavimo normos	Parametro ribojimas				
	f_{cm}	d	k	ρ_l	β
EC2	Ne	Ne	Taip	Taip	Taip/Ne
STR2.05.05:2005	Ne	Ne	Taip	Taip	Taip/Ne
ACI318	Taip	Ne			

Kaip rodo 2.1 lentelėje pateiktų duomenų analizė, ACI318 normose pateiktame praspaudimo laikomosios galios skaičiavime yra ribojamas betono stipris. Tai reiškia, kad skaičiuojant praspaudimo laikomąją galią naudojamo betono reikšmė negali būti didesnė nei nustatyta maksimali leidžiamoji reikšmė – 43 MPa.

Pabrėžtina, jog visose normose nėra ribojamos plokštės naudingojo aukščio reikšmės. Tačiau EC2 ir STR2.05.05:2005 normose vienodai ribojama plokštės aukščio įtaka, kuri nustatoma atsižvelgiant į plokštės aukštį (žr. (1.5)). Pastebima, kad plokštės aukščio koeficientas k , įtakos praspaudimo laikomajai galiai turi tik tada, kai plokštė aukštesnė nei 0,2 m. Didėjant plokštės aukščiui, koeficientas k mažėja, o mažėjant k – mažėja ir praspaudimo laikomoji galia (žr. formules (1.3) ir (1.7)). Galima daryti išvadą, kad projektavimo normose, vertinant plokštės storio įtaką praspaudimo laikomajai galiai, mažiau pasitikima modelio tikslumu, kai plokštės yra storesnės kaip 0,2 m.

Pabrėžtina, kad Lietuvoje galiojančiose projektavimo normose vertinama lenkimo momento įtaka praspaudimo laikomajai galiai skaičiuoti gali būti vertinama dvejopai: galima pasirinkti koeficientą β , pagal atitinkamą schemą (1.3 pav.), kuris kinta intervale 1,15-1,5 arba apskaičiuoti (žr. (1.4) ir (1.6) formules).

Tušti langeliai žymi parametrus, kurie ACI318 projektavimo normose nėra įtraukti į praspaudimo laikomosios galios skaičiavimus. Pabrėžtina tai, jog ACI nevertina koeficiento β , bet atlaikomąją praspaudimo galią mažina per darbo sąlygų koeficientą ϕ (žr. (1.9)).

2.2. Plokštės praspaudimo laikomosios galios parametrinė analizė

Anksčiau aprašytuose skyriuose nustatyta, kad nėra bendros nuomonės ir modelio, kaip skaičiuoti plokštės laikomąją galią. Projektavimo normose ne tik skirtingai vertinama betono praspaudimo galia $V_{R,c}$, priimant skaičiavimuose skirtingus parametrus, bet ir skirtingai interpretuojas suirimo charakteris. Todėl tikslinga išsiaiškinti, kas turi daugiausia įtakos praspaudimo laikomajai galiai ir atlikti parametrinę analizę. Analizė atliekama plokštės praspaudimo atlaikomąją galią perskaičiuojant esant toms pačioms argumentų reikšmėms ir kintant tik analizuojamo argumento reikšmei. Atlikus analizę, visų skaičiavimo modelių gauti rezultatai pavaizduoti 2.2-2.5 paveiksluose.

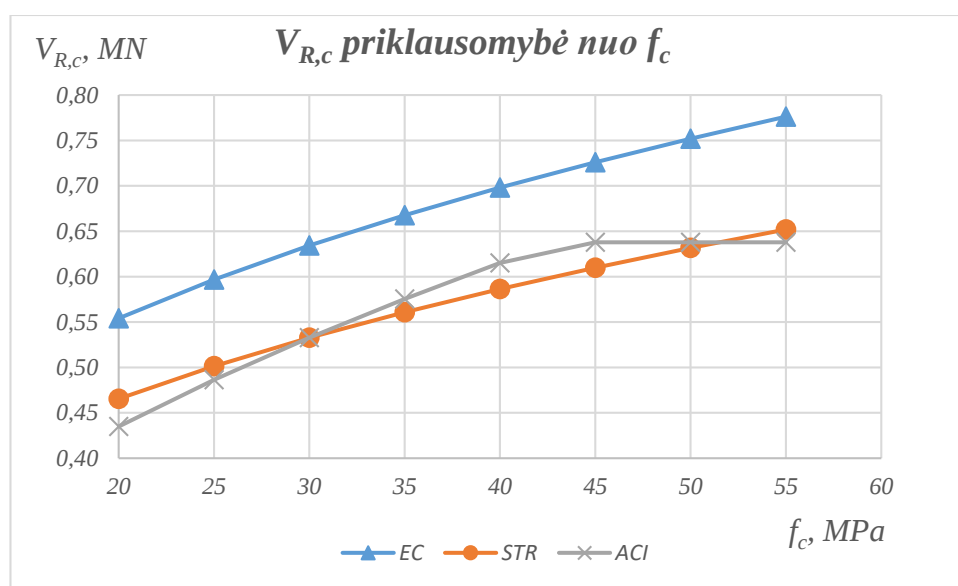
2.2.1. Plokštės betono stiprio įtaka praspaudimo laikomajai galiai

Skaičiuojant gelžbetoninės perdangos plokštės praspaudimo laikomąją galią pagal šiame darbe nagrinėjamas projektavimo normas, pasirinktos dažniausiai praktikoje pasitaikančios argumentų reikšmės.

Parametrinė analizė atliekama kintant betono stipriui f_{ck} nuo 20 iki 55 MPa. Kitų skaičiavimuose naudojamų parametų reikšmės:

$$d = 0,17 \text{ m}, c = 0,3 \text{ m}, \rho_l = 1 \% .$$

Visų modelių laikomosios galios kitimas priklausomai nuo betono stiprio, pavaizduotas 2.2 paveiksle.



2.2 pav. Plokštės praspaudimo laikomosios galios priklausomybė nuo betono stiprio

Grafike matomos skirtingų praspaudimo modelių laikomosios galios, priklausomos nuo betono stiprio, pasiskirstymo kreivės. Viena iš kreivių turi lūžį dėl projektavimo normose nustatytų tam tikrų apribojimų. Matoma, jog betono stipris tiesiogiai veikia praspaudimo laikomąją galią, nes didėjant betono stipriui, didėja ir betono praspaudimo atlaikomoji galia.

ACI318 projektavimo normų pateikto skaičiavimo modelio kreivė lūžta esant didesniai betono stipriui nei 43 MPa. Taip yra todėl, kad pasiekama normose nustatyta maksimali leidžiama skaičiavimuose naudoti f_c reikšmė. Pastebima, kad didėjant betono stipriui, tolygiai didėja EC2 ir STR2 laikomoji galia, tačiau pagal EC2 skaičiavimo modelį, laikomoji galia gaunama didesnė. Tai nulemia skaičiavimo modelyje priimtas didesnis vertinamas pavojingasis praspaudimo perimetras aplink koloną.

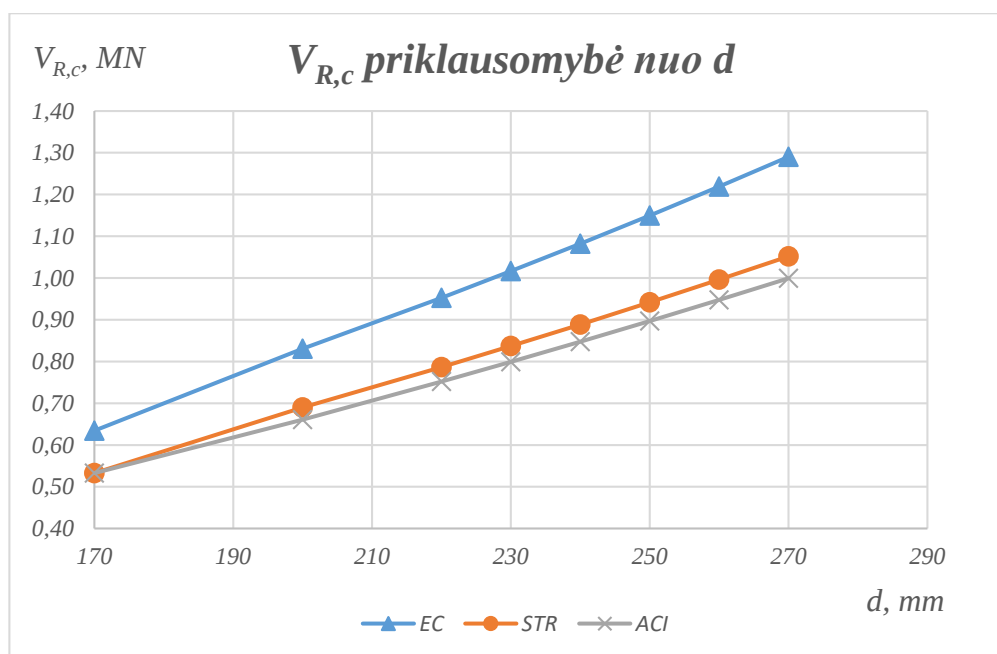
Taip pat matoma, kad ACI318 normose pateikto modelio laikomoji galia auga sparčiausiai, o toliau didėjant betono stipriui, atlaikomoji galia tampa mažiausia dėl normose nustatytos betono stiprio maksimalios, skaičiavimuose naudoti leidžiamos, reikšmės.

2.2.2. Plokštės naudingojo aukščio įtaka praspaudimo laikomajai galiai

Parametrinė analizė atliekama keičiant perdangos plokštės naudingąjį aukštį d nuo 0,17 m iki 0,27 m. Kitų, skaičiavimuose naudojamų, parametrų reikšmės:

$$f_{ck} = 30 \text{ MPa}, c = 0,3 \text{ m}, \rho_l = 1\% .$$

Visų modelių laikomosios galios kitimas priklausomai nuo plokštės naudingojo aukščio, pavaizduotas 2.3 paveiksle.



2.3 pav. Plokštės praspaudimo laikomosios galios priklausomybė nuo plokštės naudingojo aukščio

Pateikta plokštės praspaudimo laikomosios galios priklausomybė nuo plokštės naudingojo aukščio. Visose, šiame darbe, nagrinėjamose projektavimo normose, naudingasis plokštės aukštis turi gan didelę tiesioginę įtaką praspaudimo stipriui. Visų modelių laikomosios praspaudimo galios, priklausančios nuo plokštės storio, kreivių kitimas panašus. Pagal EC2 projektavimo normas, reikšmės gaunamos didžiausios, o tarp STR2.05.05:2005 ir ACI318 išvelgiamas nedidelis skirtumas tarp reikšmių.

Pabrėžtina, kad EC2 turi mažiausią atsargą praspaudimo stipriui, nes didinant plokštės naudingąjį aukštį, atlaikomoji galia auga sparčiausiai, bei yra didžiausia iš analizuojamų modelių.

Padidinus plokštės naudingąjį aukštį 5 cm, laikomoji galia padidėjo:
pagal EC2 – 51 %, STR2 – 49 %, ACI318 – 42 %.

Taigi daroma išvada, kad modelių praspaudimo laikomajai galiai, kurių pavojingo pjūvio riba labiau nutolusi nuo kolonos krašto, plokštės naudingasis aukštis turi didesnę įtaką.

2.2.3. Plokštės tempiamo sluoksnio išilginės armatūros kiekio įtaka praspaudimo laikomajai galiai

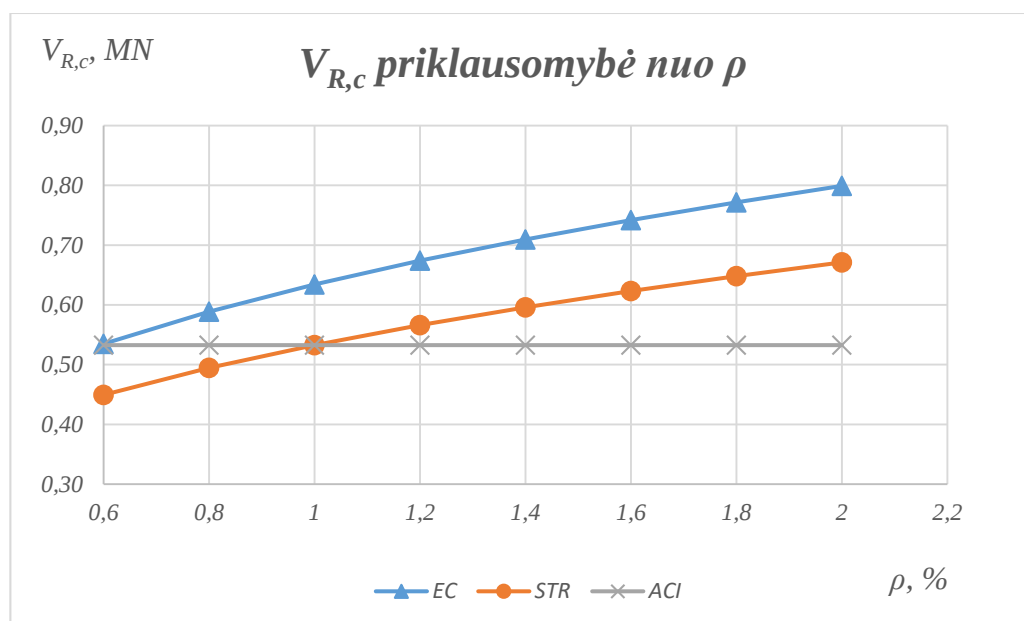
Parametrinė analizė atliekama keičiant kvadratinės plokštės tempiamos zonos išilginės armatūros kiekį ρ_l nuo 0,6 % iki 2 %. Kitų, skaičiavimuose naudojamų, parametrų reikšmės:

$$f_{ck} = 30 \text{ MPa}, d = 0,17 \text{ m}, c = 0,3 \text{ m}.$$

Visų modelių laikomosios galios kitimas priklausomai nuo plokštės tempiamos zonos armavimo kiekio, pavaizduotas 2.4 paveiksle.

Akivaizdu, kad normose EC2 ir STR2.05.05:2005 plokštės tempiamos zonos išilginio armavimo įtaka vertinama analogiškai, nes abiejų normų kreivės, didėjant armavimo procentui, didėja lygiagrečiai (didėja atlaikomoji praspaudimo galia). Tačiau atlaikomosios praspaudimo galios reikšmės skirtingos. Taip yra dėl skirtingai vertinamo atstumo, nuo kolonos krašto iki pavojingo pjūvio krašto (žr. 2.1 pav.). Kadangi, EC2 ir STR2.05.05:2005 projektavimo normose yra nustatyta maksimali išilginio armavimo koeficiento reikšmė ($\rho_l = 0,02$), tai didinant armatūros kiekį virš nustatytos maksimalios ribos, skerspjūvio tempiamoje zonoje, teorinė praspaudimo laikomoji galia nebedidėtų.

Pastebima, kad skaičiuojant, pagal ACI318 pateiktą modelį, laikomoji galia nedidėja, didėjant armatūros kiekiui, plokštės tempiamoje zonoje. Taip yra todėl, kad amerikiečių normos praspaudimo laikomosios galios skaičiavimuose nevertina armatūros įtakos praspaudimo stipriui.



2.4 pav. Plokštės tempiamos zonos išilginės armatūros kiekio įtaka plokštės praspaudimo laikomajai galiai

Esant labai mažam tempiamos išilginės armatūros kiekiui skerspjūvyje, atlaikomoji galia pagal ACI318 gali būti didesnė už EC2 ir STR2.05.05:2005, tačiau didinant armatūros kiekį, pagal Lietuvoje galiojančių normų pateiktus praspaudimo laikomosios galios skaičiavimo modelius, praspaudimo atlaikomoji galia auga ir tampa didesnė nei skaičiuojant pagal ACI318 pateiktą modelį.

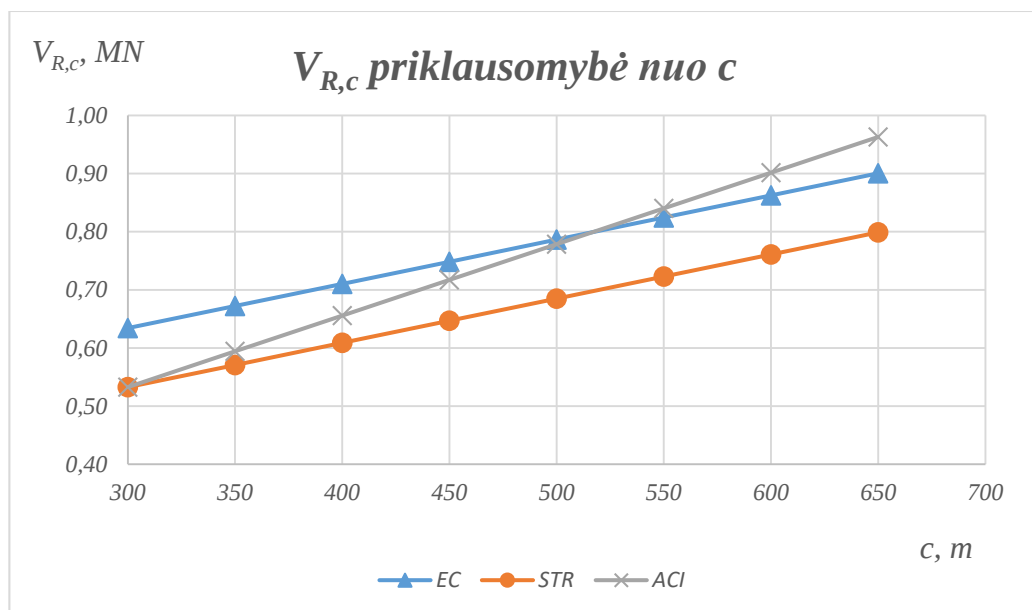
Esant 0,6 % išilginės armatūros plokštės tempiamos zonos skerspjūvyje, EC2 ir ACI318 reikšmės lygios – 0,53 MN, o STR2.05.05:2005 – 0,45 MN ir tai yra 15 % mažiau. Padidinus armavimo procentą iki maksimumo – 2 %, ACI318 reikšmė nekinta, o EC2 reikšmė išauga iki 0,8 MN ir tai 51 % daugiau nei pagal ACI318. Padidinus armavimo procentą iki maksimumo, STR2.05.05:2005 reikšmė išauga iki 0,67 MN ir yra 26 % didesnė nei ACI318, bet 14 % mažesnė nei EC2.

2.2.4. Kolonos kraštinės ilgio įtaka plokštės praspaudimo laikomajai galiai

Parametrinė analizė atliekama keičiant kvadratinės kolonos kraštinės ilgį c nuo 0,3 m iki 0,65 m. Kitų, skaičiavimuose naudojamų, parametrų reikšmės:

$$f_{ck} = 30 \text{ MPa}, d = 0,17 \text{ m}, \rho_l = 1 \%$$

Visų modelių laikomosios galios kitimas priklausomai nuo plokštės tempiamos zonos armavimo kiekio, pavaizduotas 2.5 paveiksle.



2.5 pav. Kvadratinės kolonos kraštinės ilgio įtaka plokštės praspaudimo laikomajai galiai

Pastebima, kad visų analizuojamų normų praspaudimo modelių laikomoji galia auga didėjant kolonos kraštinės ilgiui.

Išvelgiamas stiprus ryšys tarp EC2 ir STR2, didėjant kolonos skerspjūviui, tolygiai didėja ir laikomoji praspaudimo galia, tik, visais atvejais pagal STR2 reikšmė mažesnė. Tai pagrindžiama tuo, kad šių normų praspaudimo modeliai ganėtinai panašūs, tačiau EC2 normose teigiama, kad pavojingas praspaudimo pjūvis tęsiasi nuo kolonos krašto toliau nei teigiama STR2 normose. Tokiu atveju, esant didesniai atstumui nuo kolonos krašto iki pavojingo pjūvio krašto, gaunamas didesnis kirpimo plotas, kuris didina praspaudimo atlaikomąją galią.

Matoma, kad ACI318 normose pateikto modelio atlaikomajai galiai stipriai įtakos turi kolonos kraštinės ilgis c . Kadangi šiose normose teigiama, kad praspaudžiant plokštę, suirimas vyksta gan arti kolonos ($0,5d$ atstumu aplink koloną), tai praspaudimo plouią, kuris didina praspaudimo laikomąją galią, labiau įtakos turi kolonos kraštinės matmuo, nei perdangos plokštės storis. Todėl grafike matoma, kad didėjant kvadratinės kolonos kraštinės ilgiui, laikomoji galia pagal ACI318 auga sparčiausiai.

Kintant kolonos kraštinės ilgiui nuo $0,3\text{ m}$ iki $0,65\text{ m}$, praspaudimo laikomoji galia išaugo: EC2 – 43 %, STR2 – 5 %, ACI318 – 81 %.

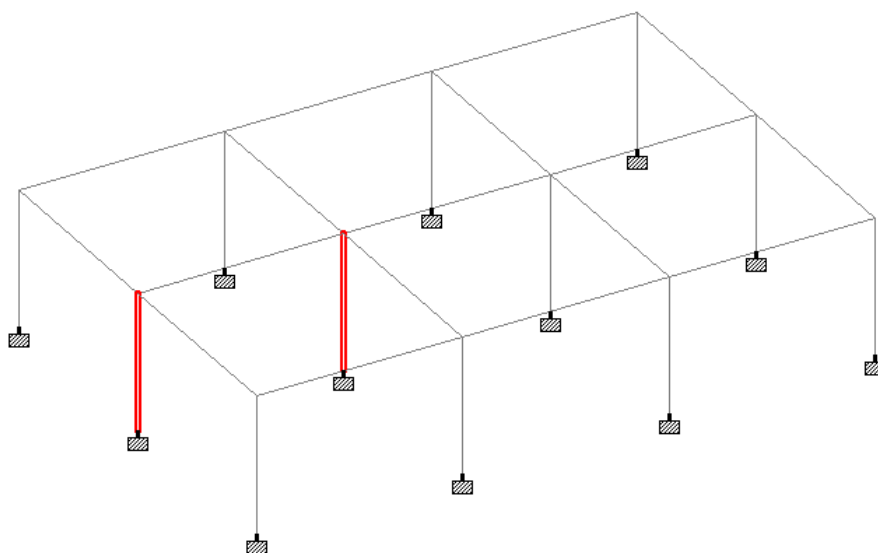
Galima teigti, kad kvadratinės kolonos kraštinės ilgis daugiausia įtakos turi praspaudimo laikomajai galiai, apskaičiuotai pagal ACI318 normose pateiktą praspaudimo modelį.

2.3. Koeficiento β ribų apskaičiavimas

2.3.1. Skaitinio modelio sudarymas

Siekiant nustatyti lenkimo momento įtaką praspaudimo laikomajai galiai, buvo sudarytas skaitinis modelis. Skaitinio modelio tikslas yra surasti nepalankiausius konstrukcijos „apkrovimo“ variantus ir nustatyti nagrinėjamų kolonų jungties su perdangos plokšte lenkimo momento ir skersinės jėgos santykius. Siekiant supaprastinti modelį, nuspręsta kolonų ir monolitinės perdangos sistemą pakeisti į kolonų ir sijų erdvinį rėmą. Skaitinis modelis sudarytas „Staad“ programa.

Rėmas sudarytas iš kolonų ir sijų, viena kryptimi yra trys tarpatramiai, kita – du. Abiem kryptim kolonų žingsnis 6 metrai. Skaičiuojamoji schema pavaizduota 2.6 paveiksle.



2.6 pav. Skaitinio modelio schema ir analizuojami elementai

Sudarius skaitinį modelį analizuojamos sijos ties kolona skersinės jėgos ir lenkimo momento reikšmės ties dvejomis kolonomis: ties vidine ir ties kraštine. Analizuojamos kolonos pavaizduotos 2.6 paveiksle. Kampinė kolona nenagrinėjama, nes skaičiuojant plokštės

praspaudimo laikomąją galią ties kampine kolona, lenkimo momento įtaka nevertinama (

$$\beta = \frac{u_1}{u_{1*}}).$$

2.3.2. Lenkimo momento ir skersinės jėgos M/V santykio ribų nustatymas

Norint nustatyti įrašas konstrukciniuose elementuose, reikia sudaryti apkrovų derinius. Apkrovų deriniai sudaromi tam, jog būtų nustatytas nepalankiausias apkrovimo variantas, kad konstrukciniams elementams būtų nustatyta didžiausia galima apkrova.

Šiame skaitiniame modelyje sudaryti 8 apkrovų variantai (Priedas B), naudojant 5 kPa apkrovą išdėstant ją šachmatiškai ar atsitiktinai, ir nustatyta analizuojamų kolonų ir sijų jungčių skersinių jėgų ir lenkimo momentų reikšmės. Tačiau plotais išskirstyta apkrova pakeista į linijines apkrovas, kurios priskiriamos sijoms.

Gautos įrašos, ties abiejomis kolonomis pateiktos 2.2 lentelėje.

2.2 lentelė. Kolonų jungčių su sija, lenkimo momento ir skersinės jėgos santykių reikšmės priklausomai nuo apkrovos derinio

Derinio Nr.	Vidinė kolona $M/V, m$	Kraštinė kolona $M/V, m$
1	0,052	0,45
2	0,052	0,45
3	0,34	0,78
4	0,38	0,46
5	0,41	0,49
6	0,14	0,43
7	0,052	0,45
8	0,39	0,47

Kaip matyti iš 2.2 lentelėje pateiktų skaičiavimo rezultatų lenkimo momento ir skersinės jėgos M/V santykių reikšmės yra skirtingos priklausomai nuo kolonos padėties. Vidinėje kolonoje atlikus įvairių apkrovų derinius nustatyta, kad mažiausias M/V santykis yra 0,052, o didžiausias – 0,47. Tuo metu kraštinėje kolonoje šis santykis yra ženkliai didesnis: jis svyruoja ribose 0,43 iki 0,78. Kaip matyti minimali riba skiriasi daugiau kaip 8 kartus, o maksimali – apie 2 kartus. Reikšmių ribos yra labai plačios palyginus su β reikšmėmis projektavimo normose ($\beta = 1.15$, ir $\beta = 1.4$), kur šis santykis tesiekia apie 1,2 karto. Tai rodo, kad M/V santykis nėra vienintelis parametras, lemiantis koeficiento β reikšmę.

2.4. Parametrinė koeficiento β analizė

Koeficientas β tiesiogiai įtakoja plokštės praspaudimo laikomąją galią, kadangi Lietuvoje galiojančiose normose koeficientas β gali būti apskaičiuotas arba parinktas, todėl tikslinga išnagrinėti, kaip kinta koeficiento reikšmė, kintant įtakingiems argumentams. Išanalizavus šio koeficiento skaičiavimo metodiką, matoma, kad įtakos jo reikšmei turi plokštės naudingasis aukštis d , kolonos kraštinės ilgis c bei lenkimo momento ir skersinės jėgos santykis M/V .

C priede pateiktos β koeficiento reikšmės, priklausomos nuo kintančių įtakingų argumentų, o grafiškai tai pavaizduotos 2.7-2.14 paveiksluose.

Atliekant šią analizę, pasirinkta analizuoti tik tris – didžiausią, didutinę ir mažiausią M/V reikšmes kad matyti, kaip kinta koeficiento β reikšmė, kintant įtakingiems argumentams. Skaičiavimams iš lentelės 2.2 pasirinktos šios M/V reikšmės:

Vidinei kolonai: 0,052; 0,14; 0,41;

Krašinei kolonai: 0,43; 0,48; 0,78.

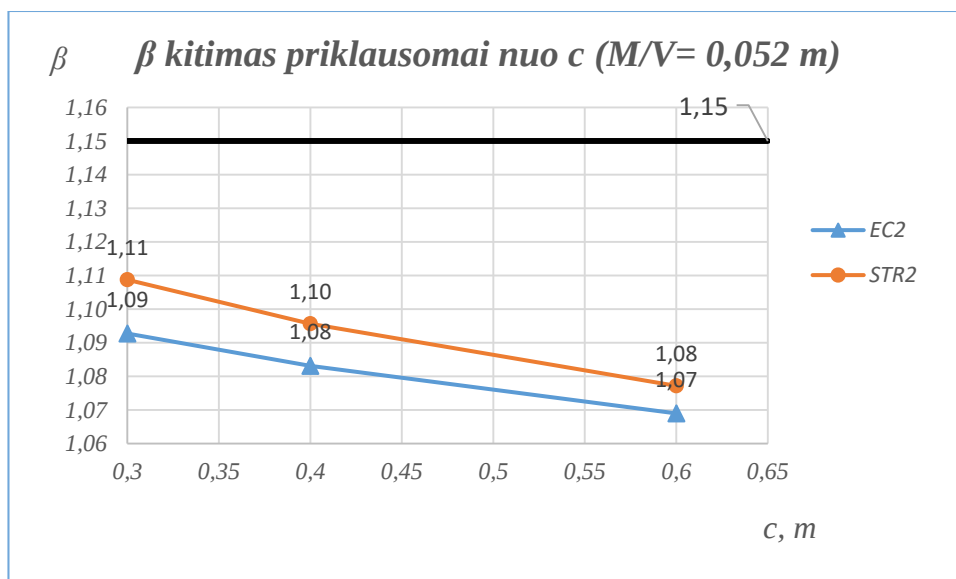
Kiti argumentai skaičiuojami kaip konstanta, jų reikšmės priimamos tokios: $d = 0,17\text{ m}$, $a = 0,4\text{ m}$.

2.4.1. Vidinės kolonos koeficiento β analizė

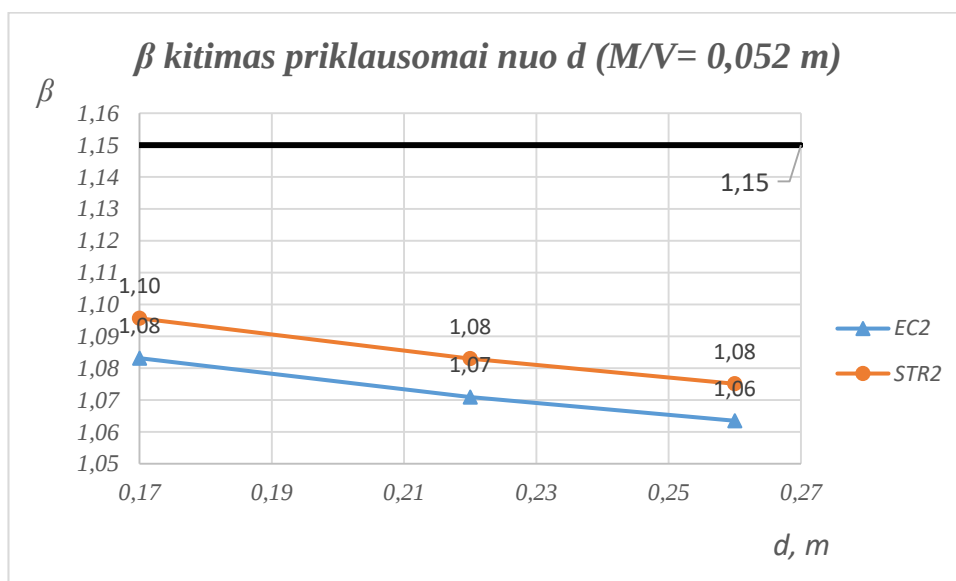
Skaičiuojant gelžbetoninės plokštės praspaudimo funkcijos lenkimo momentą, vertinantį argumentą β , buvo pasirinktos trys M/V reikšmės (0,052; 0,14; 0,41 kN), trys plokštės naudingąjo aukščio reikšmės (0,17; 0,22; 0,27 m). Kolonos kraštinės ilgis kinta nuo 0,3 iki 0,6 m.

Koeficiento β priklausomybė, vidinės kolonos atžvilgiu, kintant įtakingiems argumentams, pavaizduota 2.7-2.10 paveiksluose.

Iš grafiko pastebima, kad esant mažam lenkimo momento ir skersinės jėgos santykiui, koeficiento β reikšmė gaunama maža, o didėjant kolonos kraštinės ilgiui c , koeficientas mažėja. Taip yra todėl, kad didėjant kolonos matmenims didėja ir kritinis praspaudimo perimetras. Esant $M/V = 0,052\text{ kN}$, o c kintant nuo 0,3 iki 0,6 m, koeficientas β kinta ribose: pagal EC2 pateiktą modelį – nuo 1,09 iki 1,07, pagal STR2 – nuo 1,11 iki 1,08. Abiem atvejais reikšmė gaunama mažesnė nei leistina pasirinkti projektavimo normose (1,15).

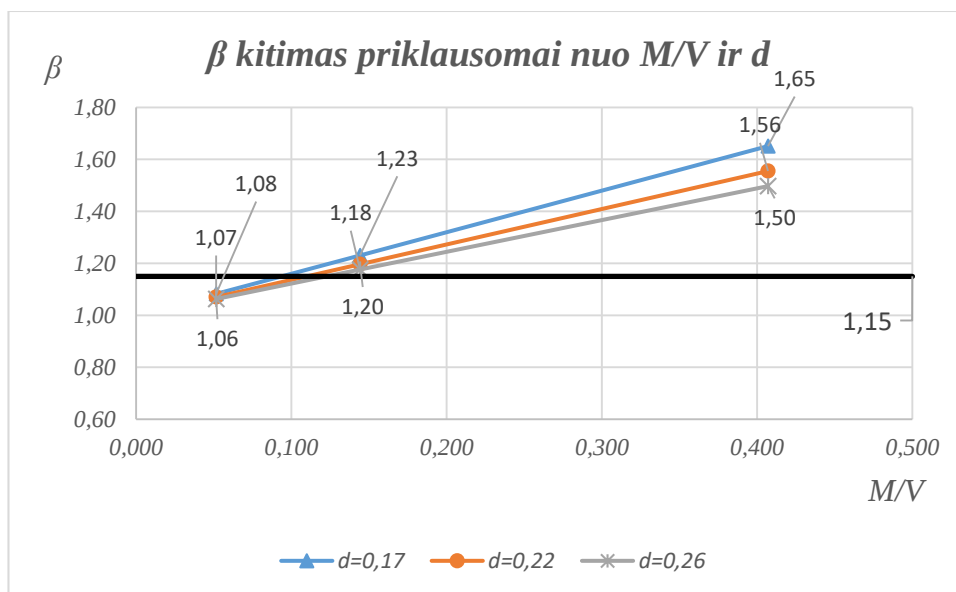


2.7 pav. Koeficiento β kitimas, kintant kolonos raštinės ilgiui c

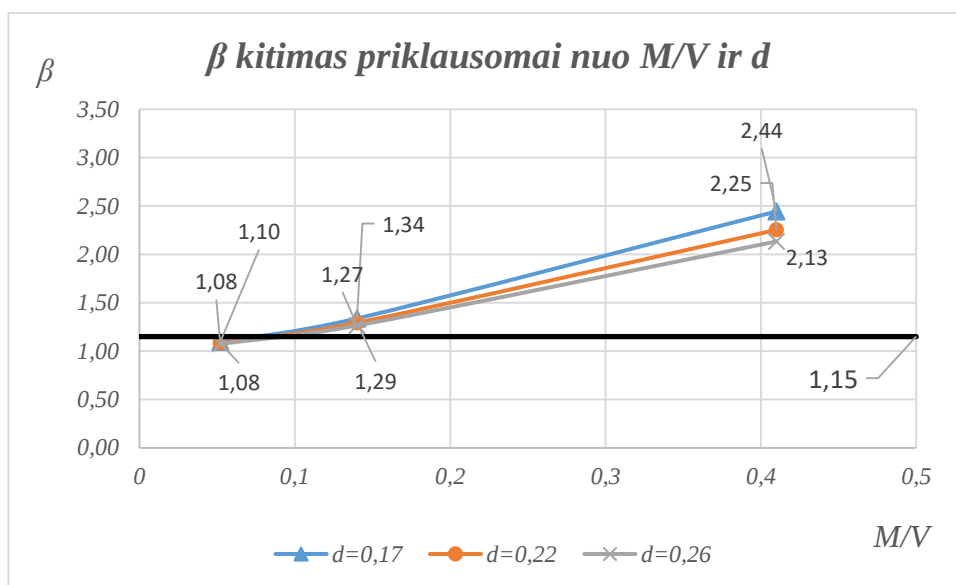


2.8 pav. Koeficiento β kitimas, kintant plokštės naudingajam aukščiui d

2.8 paveikse pateiktas koeficiento β reikšmių kitimas, kintant plokštės naudingajam aukščiui d , kai $M/V = 0,052$ m, o $c = 0,4$ m. Pastebima, kad didėjantis plokštės naudingasis aukštis, mažina koeficiento β apskaičiuojamąją reikšmę. Situacija analogiška, kaip ir kintant kolonos kraštinės ilgiui, o reikšmės labai artimos 2.7 paveiksle pavaizduotoms reikšmėms.



2.9 pav. Koeficiento β kitimas, kintant M/V ir esant skirtingiems d (Pagal EC2 normose pateiktą modelį)



2.10 pav. Koeficiento β kitimas, kintant M/V ir esant skirtingiems d (Pagal STR2 normose pateiktą modelį)

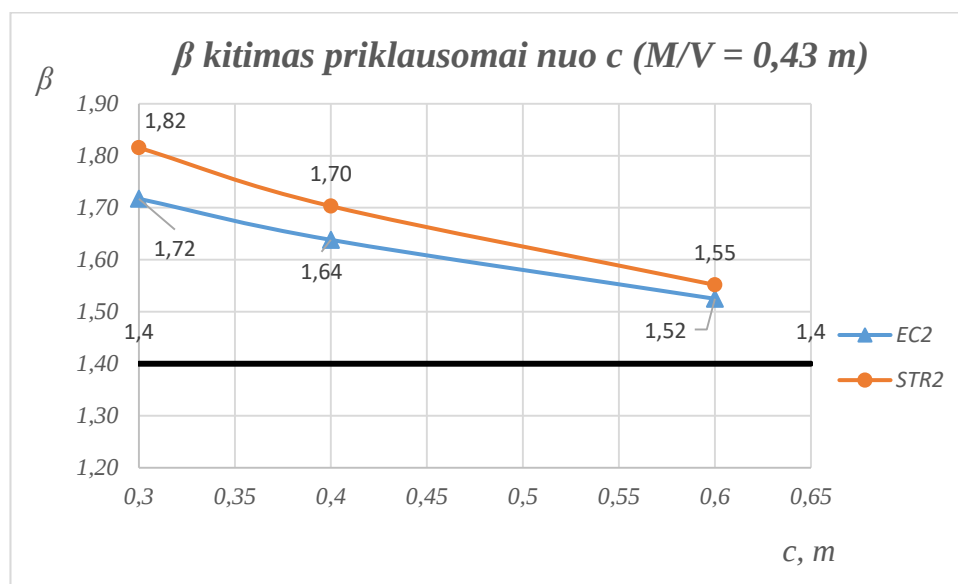
2.9 ir 2.10 paveiksluose pateiktas koeficiento β kitimas pagal skirtingose projektavimo normose pateiktus praspaudimo skaičiavimo modelius, kintant lenkimo momento ir skersinės jėgos santykiui M/V ir plokštės naudingajam aukščiui d . Kaip pastebima iš grafiko, M/V įtaka koeficiento β kitimui labai didelė. Nors ir didėjant plokštės naudingajam aukščiui, β mažėja, tačiau didėjantis M/V stipriai didina koeficiento β reikšmę. Didėjant M/V reikšmei nuo 0,052 iki 0,41, o d reikšmei nuo 0,17 iki 0,27, koeficientas β kinta ribose: pagal EC2 normose pateiktą

modelį – nuo 1,06 iki 1,56 (2.9 pav.), pagal STR2 normose pateiktą modelį – 1,08 iki 2,44 (2.10 pav.).

2.4.2. Kraštinės kolonos koeficiento β analizė

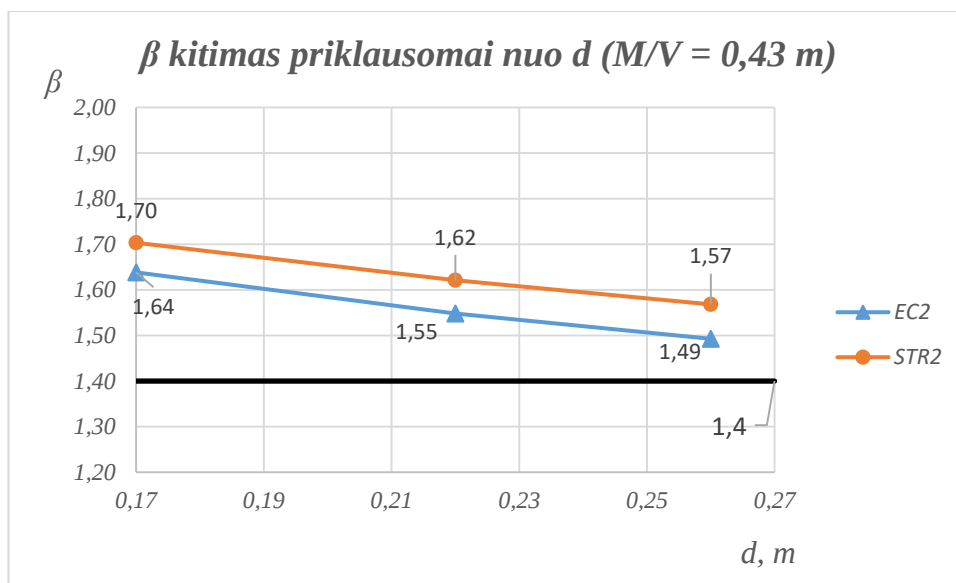
Skaiciuojant gelžbetoninės plokštės praspaudimo funkcijos lenkimo momentą, vertinantį argumentą β , buvo pasirinktos trys M/V reikšmės (0,43; 0,48; 0,78 kN) ir trys plokštės naudingojo aukščio reikšmės (0,17; 0,22; 0,27 m). Kolonos kraštinės ilgis kinta nuo 0,3 iki 0,6 m.

Koeficiento β priklausomybė, vidinės kolonos atžvilgiu, kintant įtakingiems argumentams, pavaizduota 2.11-2.14 paveiksluose.



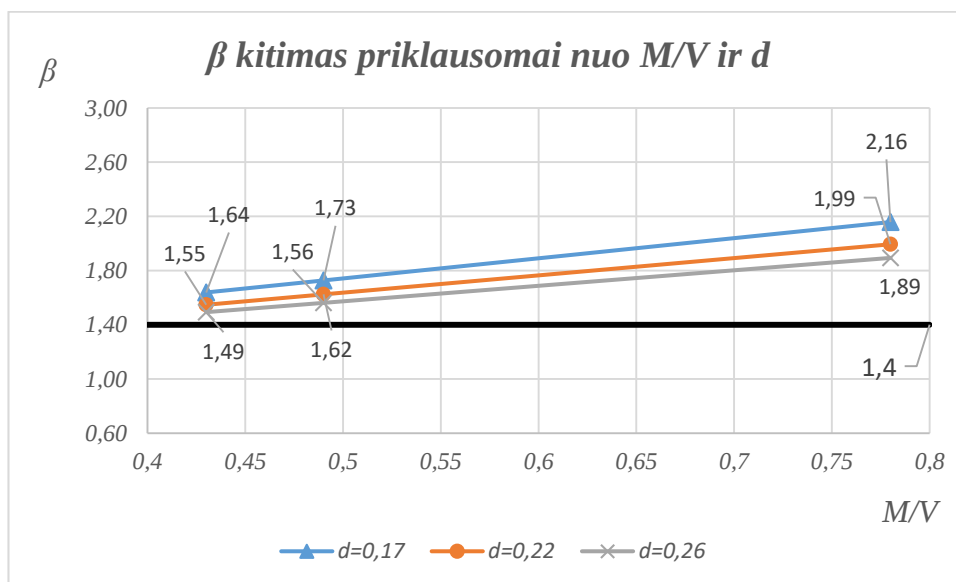
2.11 pav. Koeficiento β kitimas, kintant kolonos kraštinės ilgiui c

Iš grafiko pastebima, kad koeficiento β reikšmė mažėja, didėjant kolonos kraštinės ilgiui. Taip yra todėl, kad didėjant kolonos matmenims, didėja ir kritinis praspaudimo perimetras. Esant $M/V = 0,43$ kN, o c kintant nuo 0,3 iki 0,6 m, koeficientas β kinta ribose: pagal EC2 normose pateiktą modelį – nuo 1,72 iki 1,52, pagal STR2 – nuo 1,82 iki 1,55. Abiem atvejais reikšmė gaunama didesnė nei leistina pasirinkti projektavimo normose (1,4).

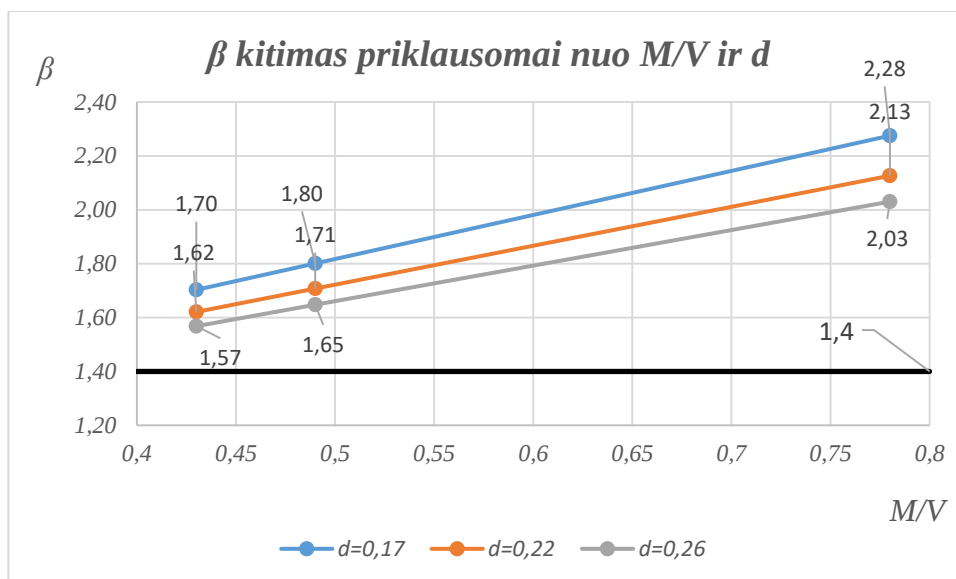


2.12 pav. Koeficiento β kitimas, kintant plokštės naudingajam aukščiui d

2.12 paveikse pateiktas koeficiento β reikšmių kitimas, kintant plokštės naudingajam aukščiui d , kai $M/V = 0,052$ kN, o $c = 0,4$ m. Pastebima, kad didėjantis plokštės naudingasis aukštis, mažina koeficiento β apskaičiuojamąją reikšmę. Situacija analogiška, kaip ir kintant kolonos kraštinės ilgiui, o reikšmės artimos 2.11 paveiksle nurodytoms reikšmėms.



2.13 pav. Koeficiento β kitimas, kintant M/V ir esant skirtingiems d (pagal EC2)



2.14 pav. Koeficiento β kitimas, kintant M/V ir esant skirtingiems d (pagal STR2)

2.13 ir 2.14 paveiksluose pateiktas koeficiento β kitimas pagal skirtingose projektavimo normose pateiktus praspaudimo skaičiavimo modelius, kintant lenkimo momento ir skersinės jėgos santykiui M/V ir plokštės naudingajam aukščiui d . Kaip pastebima iš grafiko, M/V įtaka koeficiento β kitimui labai didelė. Nors ir didėjant plokštės naudingajam aukščiui, β mažėja, tačiau didėjantis M/V stipriai didina koeficiento β reikšmę. Didėjant M/V reikšmei nuo 0,43 iki 0,78, o d reikšmei nuo 0,17 iki 0,27, koeficientas β kinta ribose: pagal EC2 normose pateiktą modelį – nuo 1,49 iki 2,16 (2.13 pav.), pagal STR2 normose pateiktą modelį – 1,57 iki 2,28 (2.14 pav.).

2.5. Praspaudimo modelių laikomosios galios funkcijos argumentų statistinis vertinimas

Kaip matyti iš 3.2. skyriuje pateiktos parametrinės analizės, skaičiuojant praspaudimo stiprį, skaičiavimo formulės argumentų įtaka yra skirtinga. Tačiau skaičiavimo formulės funkcijos argumentai, be to yra ir atsitiktiniai dydžiai, dažniausiai pasiskirstę pagal normalųjį dėsnį, kurių variacija gali skaičiavimo rezultatams turėti dar didesnės įtakos. Tokių argumentų kaip f_c , ρ_l , d , c , M/V variacijos koeficientai yra paprastai pateikiami projektavimo normų „Projektavimo pagrindai“ prieduose, o jų įtaka aprašoma konstrukcijų patikimumo skaičiavime. Todėl, analizuojant tik laikomosios galios formulę, funkcijos argumentų variacijos įtaką galima apskaičiuoti taip:

$$V_r = f(f_c, \rho_l, d, c, M/V) = f(X_1, X_2, \dots, X_n), \quad (2.2)$$

$$\sigma_{V_r} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (dV_r / dX_i \cdot \sigma_i)^2} \quad (2.3)$$

čia:

σ_{V_r} – modelio atsitiktinė paklaida;

$(dV_r / dX_i \cdot \sigma_i)^2$ – modelio atsitiktinės paklaidos dedamoji, kurią išreiškus procentine reikšme galima spręsti apie argumento įtaką visai modelio paklaidai;

dV_r / dX_i – praspaudimo laikomosios galios dalinė išvestinė pagal kintamąjį narį;

σ_i – kintamojo nario savybės kvadratinė nuokrypa;

V_r – praspaudimo laikomosios galios funkcija, priklausanti nuo kintamųjų: betono stiprio f_c , armavimo koeficiento ρ_l , plokštės naudingojo aukščio d , kvadratinės kolonos kraštinės ilgio c , lenkimo momento ir skersinės jėgos santykio M/V .

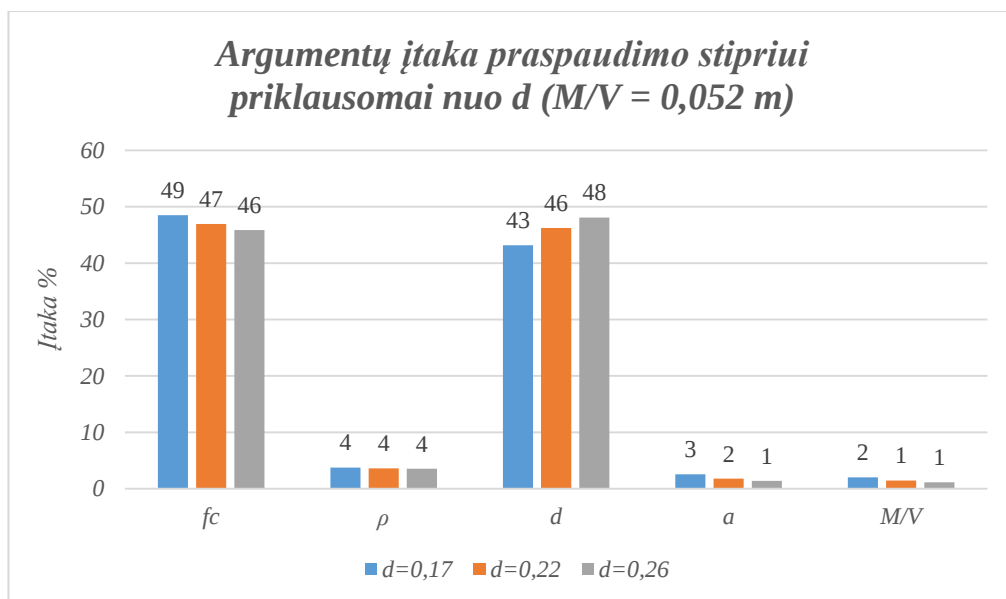
Kiekvieno funkcijos argumento įtaka išreikšta % išraiška ir pateikta sekančiuose poskyriuose.

Analizė atliekama, priimant, kad nekinta kolonos matmuo a , priimamas lygus 0,4 m bei betono stipris f_{ck} , priimamas lygus 30 MPa.

2.5.1. Teorinis praspaudimo stiprio skaičiavimo formulės parametrų vertinimas pagal EC2

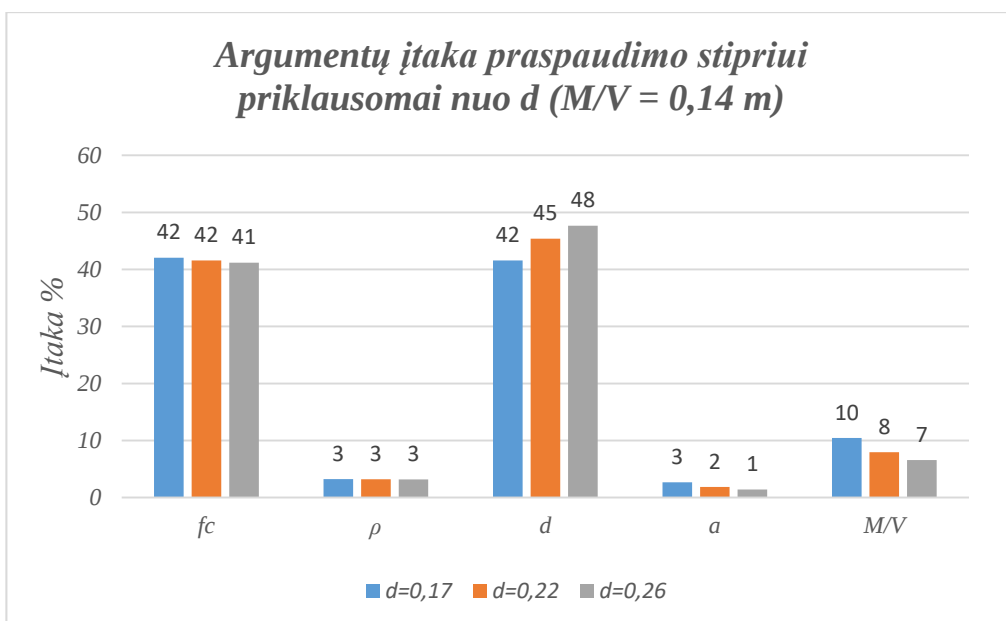
Vidinė kolona

Argumentų įtaka plokštės praspaudimo stipriui ties vidine kolona pavaizduota 2.15-2.17 paveiksluose.



2.15 pav. Funkcijos argumentų įtaka praspaudimo stipriui priklausomai nuo d ($M/V = 0,052$ m)

2.15 pav. pateikta funkcijos $V_R = v_R \cdot A_l$ argumentų įtaka kintant naudingam aukščiui nuo 0,17 iki 0,26 m, tačiau esant mažam M/V santykiui. Iš grafiko matyti, kad ženkiausią įtaką skaičiuojamajai atlaikomajai praspaudimo galiai turi kiti veiksniai, tokie kaip betono stipris f_c (46-49 %) ir naudingasis plokštės aukštis d (43-48 %).



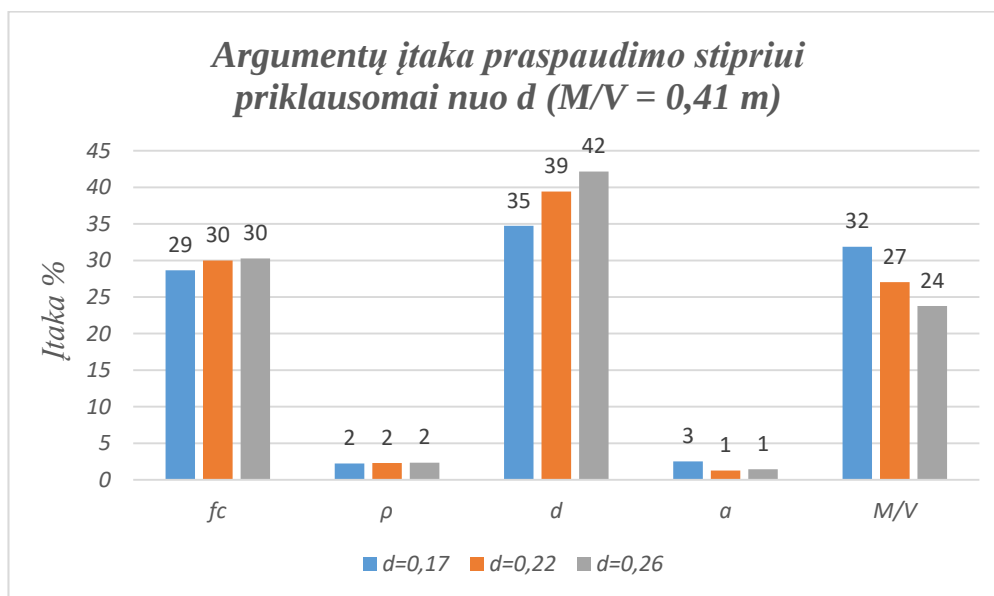
2.16 pav. Funkcijos argumentų įtaka praspaudimo stipriui priklausomai nuo d ($M/V = 0,14$ m)

2.16 pav. pateikta funkcijos argumentų įtaka praspaudimo stipriui priklausomai nuo d ($M/V=0,14$). Kaip matyti iš grafiko, didėjant naudingam aukščiui nuo 0,17 iki 0,26 funkcijos

argumentų įtaka ženkliai kinta: naudingo aukščio įtaka didėja nuo 42 iki 48 %, tuo tarpu M/V įtaka pradeda ženkliai mažėti (nuo 10 iki 7 %), o betono stipris turi gan didelę įtaką praspaudimo stiprio laikomajai galiai ir kinta 41-42 % ribose. Kitų funkcijos argumentų įtaka (ρ , a) kintant naudingam aukščiui yra neženkliai – varijuoja 1-3 % ribose.

2.17 pav. pateikta funkcijos argumentų įtaka praspaudimo stipriui priklausomai nuo d ($M/V=0,41$). Kaip matyti iš paveikslo, didėjant naudingam aukščiui nuo 0,17 iki 0,26 funkcijos argumentų įtaka ženkliai kinta: naudingo aukščio įtaka didėja nuo 35 iki 42 %, tuo tarpu M/V įtaka pradeda ženkliai mažėti (nuo 32 iki 24 %), o betono stiprio įtaka kinta nuo 29 iki 30 %. Kitų funkcijos argumentų įtaka (ρ , a) kintant naudingam aukščiui yra neženkliai – kinta 1-3 % ribose.

Pastebima, kad didėjant M/V reikšmei ir didėjant naudingajam plokštės aukščiui, argumentų įtaka stipriai keičiasi. Iš 2.15-2.17 pav. matoma, kad didėjant M/V , jo įtaka praspaudimo laikomajai galiai didėja, tačiau didėjantis naudingasis aukštis mažina M/V įtaką. Analogišką įtaką turi naudingasis plokštės aukštis, jam didėjant, jo įtaka praspaudimo stipriui didėja, tačiau didėjant M/V – naudingo aukščio įtaka mažėja.



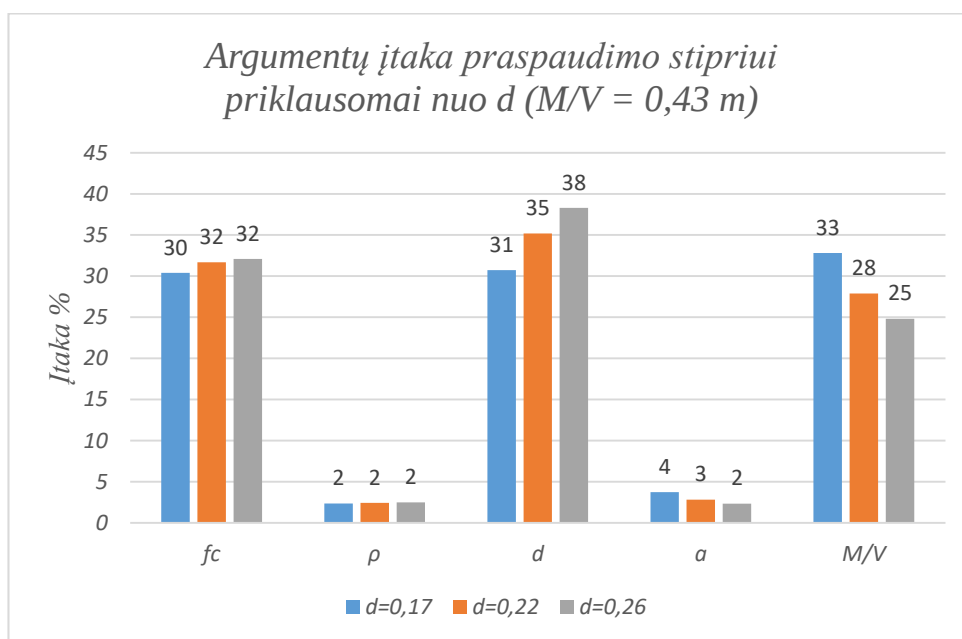
2.17 pav. Funkcijos argumentų įtaka praspaudimo stipriui priklausomai nuo d ($M/V = 0,41$ m)

Svarbu tai, kad 2.15 paveiksle matoma, jog esant mažam lenkimo momento ir skersinės jėgos santykiui ($M/V = 0,051$), ir didėjant naudingam plokštės aukščiui – betono stiprio įtaka mažėja. Iš 2.17 pav. matoma, kad padidėjus M/V reikšmei ($M/V = 0,41$) ir didėjant d – betono stiprio įtaka didėja, o iš 2.16 pav. matoma, kad kai $M/V = 0,14$, tai didėjant naudingajam plokštės aukščiui, betono stiprio įtaka kinta labai mažai.

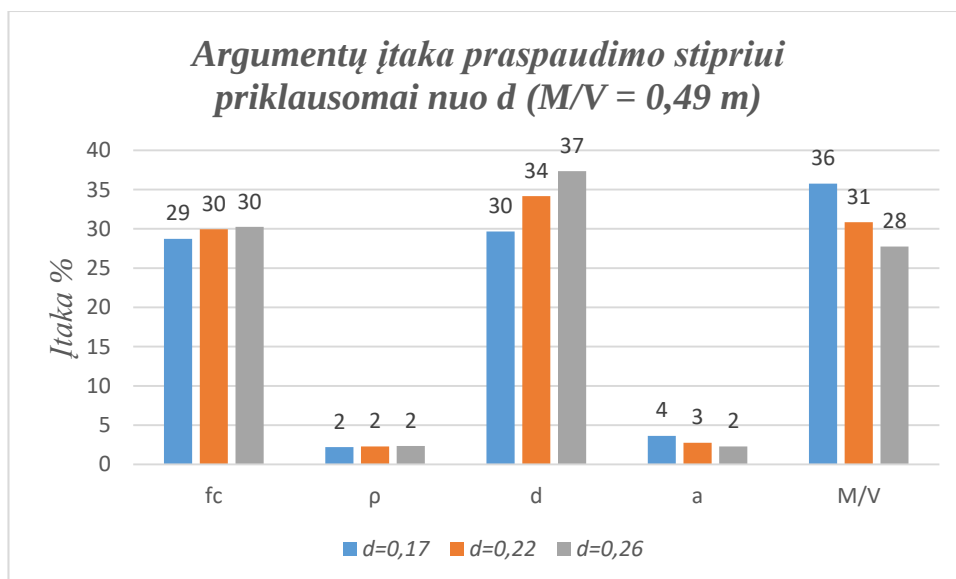
Apibendrinant, galima pastebėti, kad esant mažam M/V , praspaudimo laikomosios galios stipriui didžiausią įtaką turi betono stipris (f_c) ir naudingasis plokštės aukštis (d) (2.15 pav.). Augant lenkimo momento ir skersinės jėgos santykiui (M/V), didėja M/V įtaka praspaudimo stipriui, o f_c įtaka mažėja (2.16-2.17 pav.).

Kraštinė kolona

Argumentų įtaka plokštės praspaudimo stipriui ties kraštine kolona pavaizduota 2.18-2.20 paveiksluose. 2.18 pav. pateikta funkcijos V_R argumentų įtaka kintant naudingam aukščiui nuo 0,17 iki 0,26 ir esant $M/V = 0,43$. Iš grafiko matyti, kad ženkliausią įtaką skaičiuojamajai atlaikomajai praspaudimo galiai turi naudingasis plokštės aukštis d (31-38 %). Betono stiprio f_c įtaka 30-32 %, o lenkimo momento ir skersinės jėgos santykis M/V 21-27 %. Armavimo koeficientas ρ ir kvadratinės kolonos matmuo a įtakos turi vos kelis procentus (2-4 %).

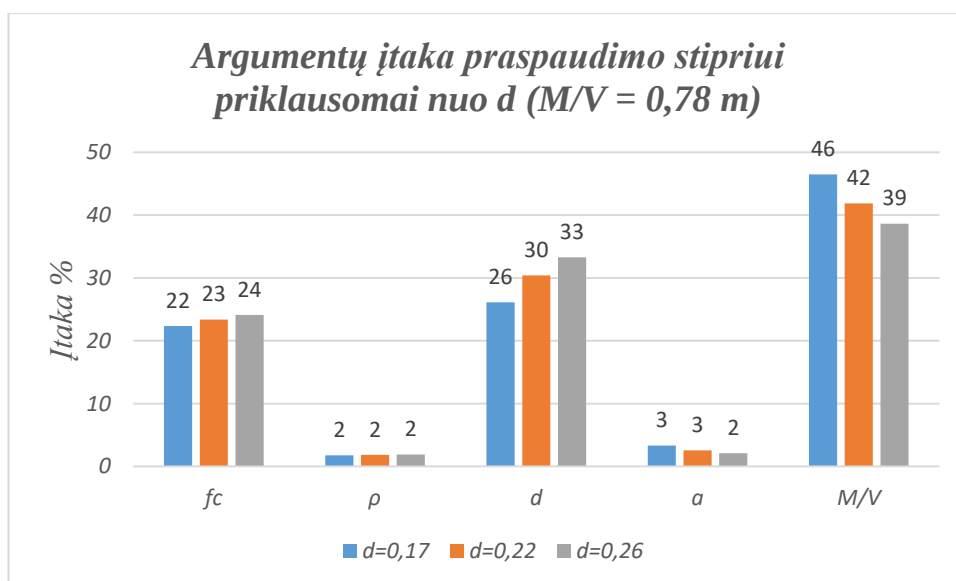


2.18 pav. Funkcijos argumentų įtaka praspaudimo stipriui priklausomai nuo d ($M/V = 0,43$)



2.19 pav. Funkcijos argumentų įtaka praspaudimo stipriui priklausomai nuo d ($M/V = 0,49$ m)

2.19 pav. pateikta funkcijos argumentų įtaka praspaudimo stipriui priklausomai nuo d ($M/V=0,49$). Kaip matyti iš grafiko, didėjant naudingam aukščiui nuo 0,17 iki 0,26 funkcijos argumentų įtaka ženkliai kinta: naudingo aukščio įtaka didėja nuo 30 iki 37 %, tuo tarpu M/V įtaka pradeda ženkliai mažėti (nuo 36 iki 28 %), o betono stipris turi gan didelę reikšmę praspaudimo laikomajai galiai (30 %), tačiau kintant naudingajam aukščiui, betono stiprio įtaka kinta neženkiai. Kitų funkcijos argumentų įtaka (ρ , a) kintant naudingam aukščiui yra neženkli – kinta 2-4 % ribose.



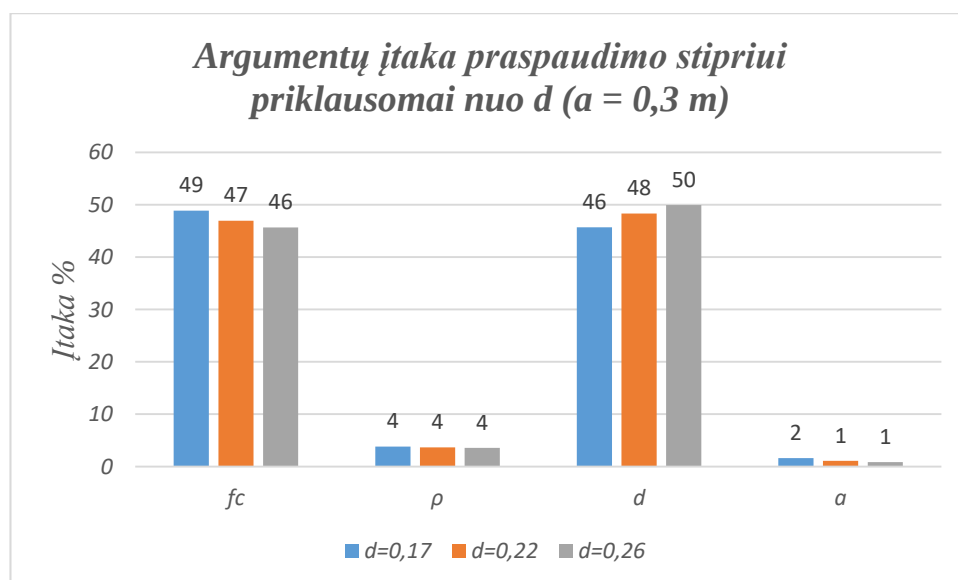
2.20 pav. Funkcijos argumentų įtaka praspaudimo stipriui priklausomai nuo d ($M/V = 0,78$ m)

2.20 pav. pateikta funkcijos argumentų įtaka praspaudimo stipriui priklausomai nuo d ($M/V=0,78$). Kaip matyti iš grafiko, didėjant naudingam aukščiui nuo 0,17 iki 0,26 funkcijos argumentų įtaka ženkliai kinta: naudingo aukščio įtaka didėja nuo 26 iki 33 %, tuo tarpu M/V įtaka pradeda ženkliai mažėti (nuo 46 iki 39 %), o betono stiprio įtaka kinta nuo 22 iki 24 %. Kitų funkcijos argumentų įtaka (ρ , a) kintant naudingam aukščiui yra neženkliai – kinta 2-3 % ribose.

Apžvelgus 2.18-2.20 paveikslus, galima pastebėti, kad didėjant naudingajam plokštės aukščiui, praspaudimo ties kraštine kolona laikomosios galios įtaka nuo d didėja, o nuo M/V – mažėja. Analogiška elgsena yra didėjant M/V , kai M/V reikšmė didėja, praspaudimo laikomosios galios įtaka nuo d mažėja, o nuo M/V – didėja. Įtaka nuo betono stiprio, keičiantis d reikšmei, kinta labai nereikšmingai (iki 1 %), o didėjant M/V reikšmei, įtaka nuo f_c ženkliai mažėja. Kintant tiek naudingam plokštės aukščiui, tiek lenkimo momento ir skersinės jėgos santykiui, įtaka nuo armavimo procento ir nuo kvadratinės kolonos matmens, išlieka maža (2-3 %).

Kampinė kolona

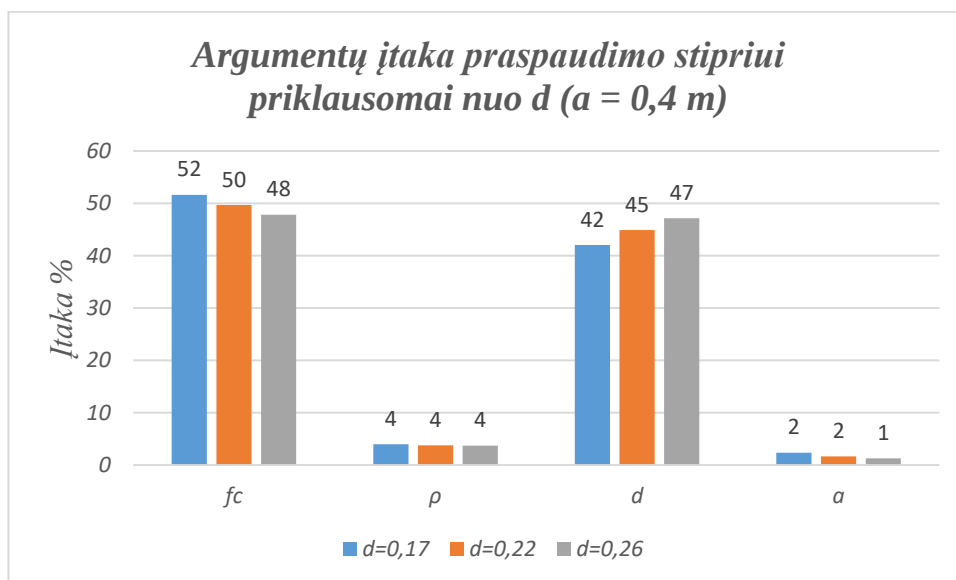
Argumentų įtaka plokštės praspaudimo stipriui ties kampine kolona pavaizduota 2.21-2.23 paveiksluose.



2.21 pav. Funkcijos argumentų įtaka praspaudimo stipriui priklausomai nuo d ($a = 0,3$ m)

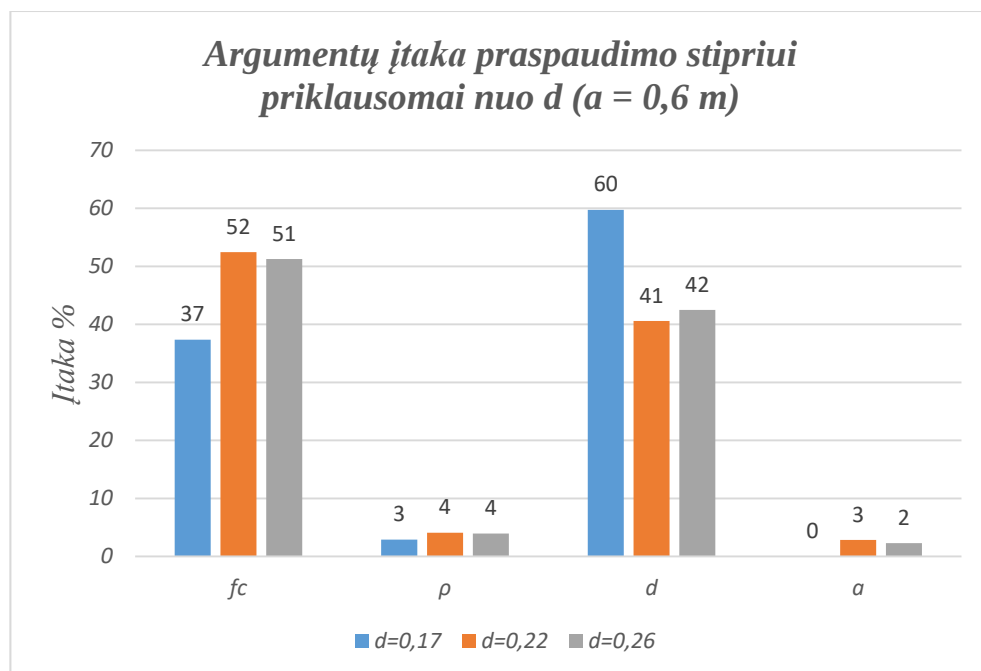
2.21 pav. pateikta funkcijos V_R argumentų įtaka praspaudimo stipriui priklausomai nuo d ($a=0,3$). Kaip matyti iš grafiko, didėjant naudingam aukščiui nuo 0,17 iki 0,26 funkcijos argumentų įtaka neženkliai kinta: naudingo aukščio įtaka didėja nuo 46 iki 50 %, tuo tarpu a

įtaka mažėja (nuo 2 iki 1 %), o betono stiprio įtaka kinta nuo 49 iki 46 %. Armavimo koeficiento ρ įtaka, kintant plokštės naudingajam aukščiui, nekinta, o išlieka pastovi – 4 %.



2.22 pav. Funkcijos argumentų įtaka praspaudimo stipriui priklausomai nuo d ($a = 0,4$ m)

2.22 pav. pateikta funkcijos argumentų įtaka praspaudimo stipriui priklausomai nuo d ($a=0,4$). Kaip matyti iš grafiko, didėjant naudingam aukščiui nuo 0,17 iki 0,26 funkcijos argumentų įtaka pastebimai kinta: naudingo aukščio įtaka didėja nuo 42 iki 47 %, o a įtaka mažėja (nuo 2 iki 1 %). Betono stipris turi gan didelę įtaką praspaudimo laikomajai galiai (52-48 %), tačiau kintant naudingajam aukščiui, armavimo koeficiento įtaka nekinta.



2.23 pav. Funkcijos argumentų įtaka praspaudimo stipriui priklausomai nuo d ($a = 0,6 m$)

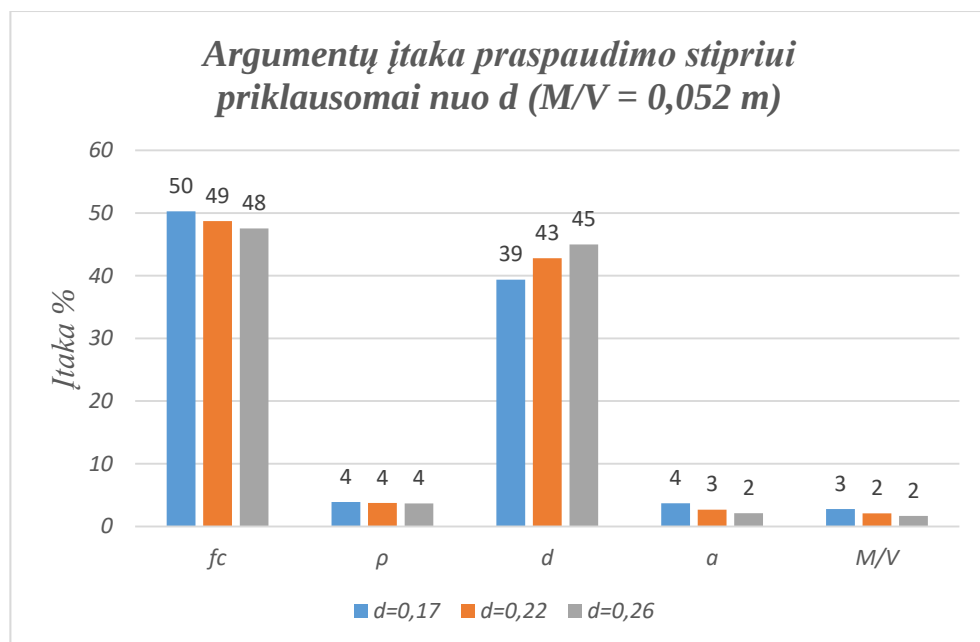
2.23 pav. pateikta funkcijos argumentų įtaka praspaudimo stipriui priklausomai nuo d ($a = 0,6$). Kaip matyti iš grafiko, didėjant naudingam aukščiui nuo 0,17 iki 0,26 funkcijos argumentų įtaka pastebimai kinta: naudingo aukščio įtaka kinta nuo 42 iki 60 %, o a įtaka kinta (nuo 3 iki 0 %). Betono stipris turi gan didelę reikšmę praspaudimo laikomajai galiai (52-37 %), tačiau kintant naudingajam aukščiui, armavimo koeficientas kinta neženkiai.

Pastebima, kad esant $d = 0,17 mm$, įtaka nuo d išauga iki 60 %, betono įtaka praspaudimo laikomajai galiai lygi 37 %, o kolonos kraštinės matmuo a neįtakoja praspaudimo laikomosios galios. Taip yra dėl praspaudimo skaičiavimo modelyje (1.4 pav.) pateiktų ribų, kai atstumas, priklausantis nuo naudingojo aukščio, yra mažesnis už atstumą, priklausantį nuo kolonos matmens. Tokiu atveju praspaudimo laikomajai galiai įtakos kolonos matmuo neturi.

2.5.2. Teorinis praspaudimo stiprio skaičiavimo formulės parametrų vertinimas pagal STR2.05.05:2005

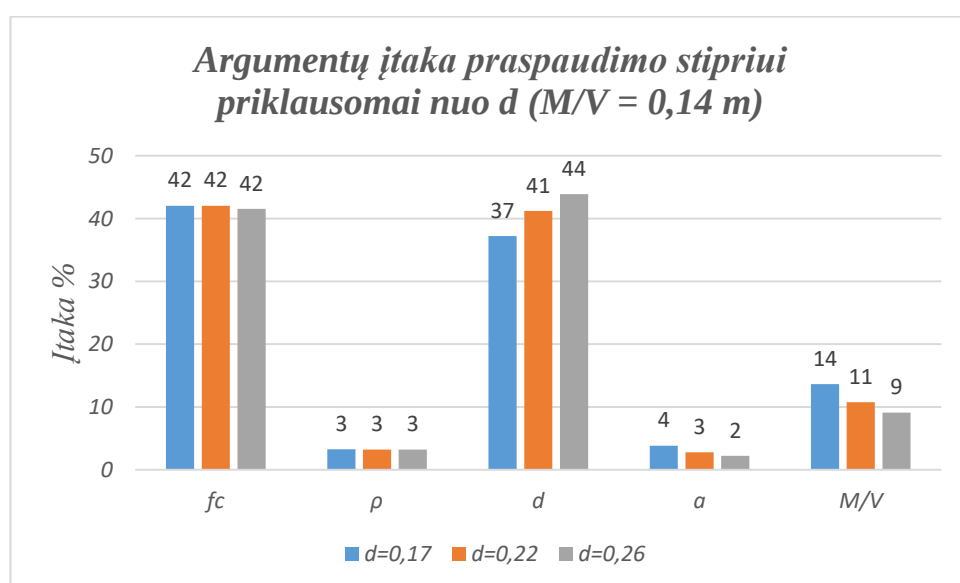
Vidinė kolona

Argumentų įtaka plokštės praspaudimo stipriui ties vidine kolona pavaizduota 2.24-2.26 paveiksluose.



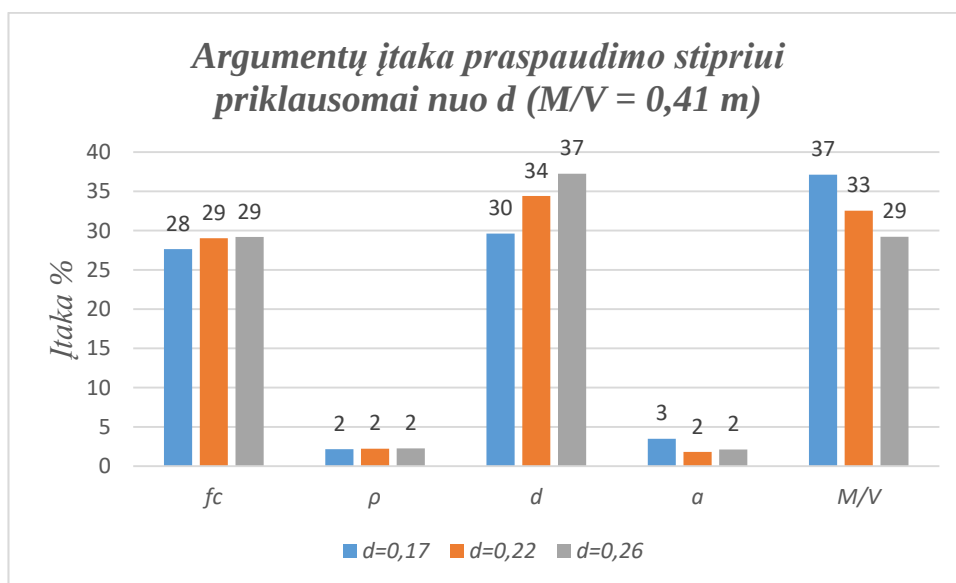
2.24 pav. Funkcijos argumentų įtaka praspaudimo stipriui priklausomai nuo d ($M/V = 0,051$ m)

2.24 paveiksle pavaizduota funkcijos V_R priklausomybė nuo d , kai $M/V = 0,051$. Iš grafiko matyti, kad esant mažam M/V , didelę įtaką praspaudimo laikomajai galiai turi betono stipris bei plokštės naudingasis aukštis, o likusių argumentų (ρ , a , M/V) įtaka maža vos 2-4 %. Tačiau didėjant plokštės naudingajam aukščiui, įtaka nuo d didėja, o nuo f_c – mažėja. Didėjant plokštės naudingajam aukščiui, įtaka praspaudimo laikomajai galiai nuo f_c mažėja nuo 50 iki 48 %, o nuo d didėja nuo 39 iki 45 %.



2.25 pav. Funkcijos argumentų įtaka praspaudimo stipriui priklausomai nuo d ($M/V = 0,14$ m)

2.25 paveiksle pavaizduota funkcijos V_R priklausomybė nuo d . Iš grafiko matyti, kad padidėjus M/V , argumentų įtaka praspaudimo stipriui ženkliai pakito, lyginant su 2.24 pav. Matoma, kad padidėjus M/V reikšmei, sumažėjo įtaka nuo f_c ir d , o nuo M/V – padidėjo. Kintant plokštės naudingajam aukščiui, betono stiprio įtaka praspaudimo laikomajai galiai išlieka pastovi – 42 %, plokštės naudingojo aukščio įtaka didėja nuo 37 iki 44 %, o M/V įtaka mažėja nuo 14 iki 9 %. Reikšmė praspaudimo laikomajai galiai nuo kolonos kraštinės ilgio ir nuo išilginio armavimo koeficiento svyruoja tarp 2 ir 4 %.



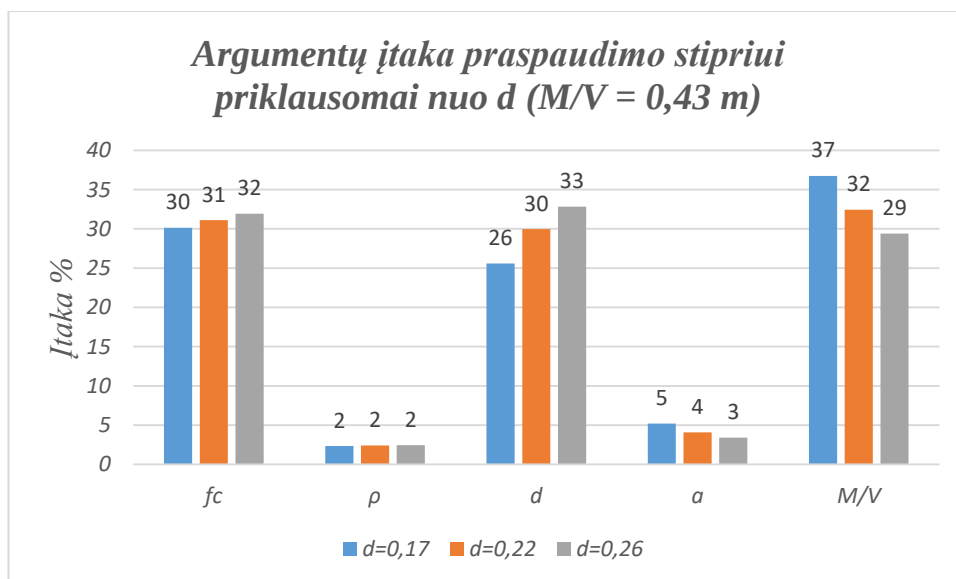
2.26 pav. Funkcijos argumentų įtaka praspaudimo stipriui priklausomai nuo d ($M/V = 0,41 m$)

2.26 paveiksle pavaizduota funkcijos V_R priklausomybė nuo d . Iš grafiko matyti, kad padidėjus M/V , argumentų įtaka praspaudimo stipriui ženkliai pakito, lyginant su 2.24 ir 2.25 pav. Matoma, kad padidėjus M/V reikšmei, stipriai sumažėjo įtaka nuo f_c ir d , o nuo M/V – padidėjo. Didėjant plokštės naudingajam aukščiui, betono stiprio įtaka praspaudimo laikomajai galiai svyruoja nuo 28 iki 29 %, plokštės naudingojo aukščio įtaka didėja nuo 30 iki 37 %, o M/V įtaka mažėja nuo 37 iki 29 %.

Apibendrinant galima teigti, kad didėjant plokštės naudingajam aukščiui, įtaka praspaudimo laikomajai galiai nuo d – didėja, o įtaka nuo M/V – mažėja. Tačiau didėjanti M/V reikšmė, mažina visų funkcijos argumentų įtaką praspaudimo laikomajai galiai.

Kraštinė kolona

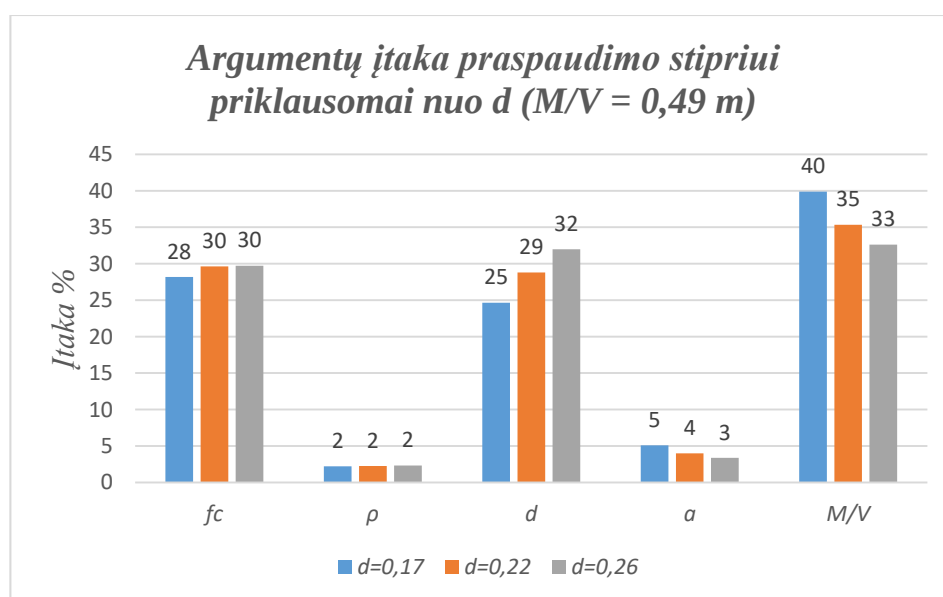
Argumentų įtaka plokštės praspaudimo stipriui ties kraštine kolona pavaizduota 2.27-2.29 paveiksluose.



2.27 pav. Funkcijos argumentų įtaka praspaudimo stipriui priklausomai nuo d ($M/V = 0,43$ m)

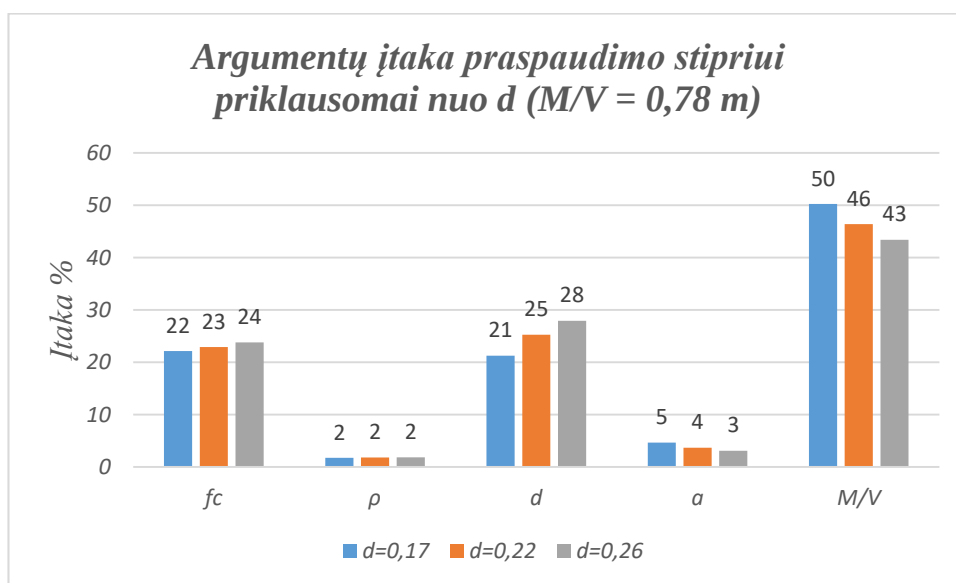
2.27 pav. pateikta funkcijos V_R argumentų įtaka kintant plokštės naudingajam aukščiui nuo 0,17 iki 0,26 ir esant $M/V = 0,43$. Iš grafiko matyti, kad ženkliausią įtaką skaičiuojamajai atlaikomajai praspaudimo galiai turi lenkimo momento ir skersinės jėgos santykis M/V (29-37 %), betono stipris f_c (30-32 %), naudingasis plokštės aukštis d (26-33%). Armavimo koeficientas ρ ir kvadratinės kolonos matmuo a įtakos turi vos kelis procentus (2-5 %).

Pastebima, kad didėjant d , didėja įtaka nuo plokštės naudingojo aukščio ir betono stiprio f_c , o nuo M/V ir a įtaka mažėja.



2.28 pav. Funkcijos argumentų įtaka praspaudimo stipriui priklausomai nuo d ($M/V = 0,49$ m)

2.28 pav. pateikta funkcijos argumentų įtaka praspaudimo stipriui priklausomai nuo d ($M/V=0,18$). Kaip matyti iš grafiko, didėjant naudingam aukščiui nuo 0,17 iki 0,26 funkcijos argumentų įtaka ženkliai kinta: naudingo aukščio įtaka padidėja nuo 34 iki 41 %, tuo tarpu M/V įtaka pradeda ženkliai mažėti (nuo 30 iki 23 %), o betono stipris turi gan didelę įtaką praspaudimo laikomajai galiai (31 %), tačiau kintant naudingajam aukščiui, betono stiprio įtaka nekinta. Kitų funkcijos argumentų įtaka (ρ , a) kintant naudingam aukščiui yra neženkli – kinta 2-3 % ribose.



2.29 pav. Funkcijos argumentų įtaka praspaudimo stipriui priklausomai nuo d ($M/V = 0,78 m$)

2.29 pav. pateikta funkcijos argumentų įtaka praspaudimo stipriui priklausomai nuo d ($M/V=0,18$). Kaip matyti iš grafiko, didėjant naudingam aukščiui nuo 0,17 iki 0,26 funkcijos argumentų įtaka ženkliai kinta: naudingo aukščio įtaka padidėja nuo 21 iki 28 %, tuo tarpu M/V įtaka pradeda mažėti (nuo 50 iki 43 %), o betono stipris turi 22-24 % įtakos praspaudimo laikomajai galiai. Kitų funkcijos argumentų įtaka (ρ , a) kintant naudingam aukščiui yra neženkli – kinta 2-5 % ribose.

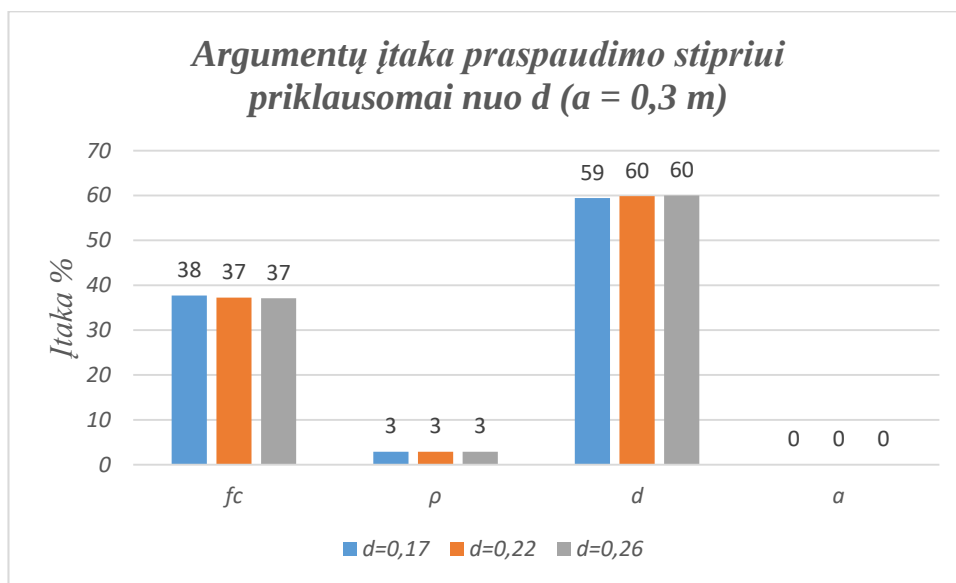
Kampinė kolona

Argumentų įtaka plokštės praspaudimo stipriui ties vidine kolona pavaizduota 2.30-2.32 paveiksluose.

Skaičiuojant kampinės kolonos praspaudimo laikomąją galią, lenkimo momento įtaka nevertinama.

Esant plokštės naudingajam aukščiui 0,17-0,26 m ribose, kolonos parametrai neturi įtakos praspaudimo laikomajai galiai. Taip yra dėl STR2 projektavimo normose pateikto modelio, kai

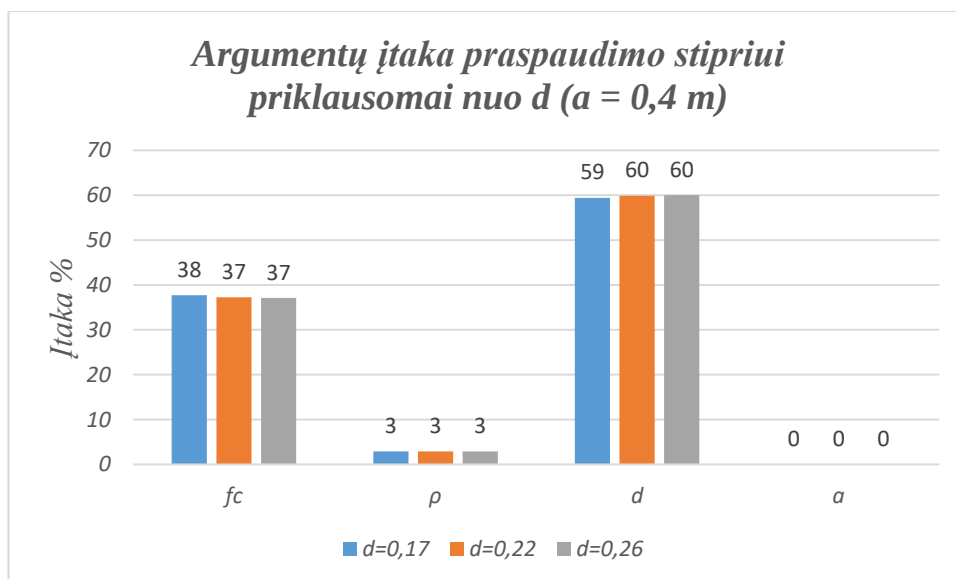
skaičiuoti sumažintam praspaudimo perimetrai u_1^* yra nustatytos ribos, kai vertinamas arba kolonos kraštinės matmuo, arba plokštės naudingasis aukštis (1.6 pav.). Esant atvejui, kai vertinamas plokštės naudingasis aukštis, pagal pateiktas išvestines A priede, matoma, kad kolonos matmuo a išsiprastina, todėl kolonos parametrai praspaudimo laikomajai galiai įtakos neturi.



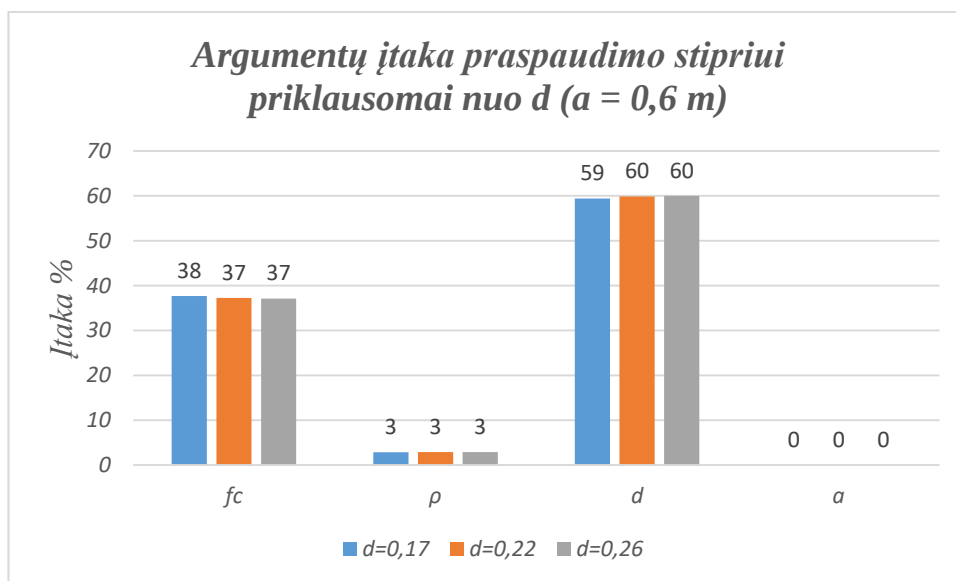
2.30 pav. Funkcijos argumentų įtaka praspaudimo stipriui priklausomai nuo d ($a = 0,3$ m)

2.30 pav. pateikta funkcijos V_R argumentų įtaka praspaudimo stipriui priklausomai nuo d ($a = 0,3$). Kaip matyti iš grafiko, didėjant naudingam aukščiui nuo 0,17 iki 0,26 funkcijos argumentų įtaka kinta neženkliai: naudingo aukščio įtaka didėja nuo 59 iki 60 %, o betono stiprio įtaka mažėja nuo 38 iki 37 %. Armavimo koeficiento ρ įtaka, kintant plokštės naudingajam aukščiui, nekinta, o išlieka pastovi – 3 %, kolonos kraštinis ilgis a praspaudimo laikomosios galios neįtakoja.

2.31 pav. pateikta funkcijos argumentų įtaka praspaudimo stipriui priklausomai nuo d ($a = 0,4$). Kaip matyti iš grafiko, didėjant naudingam aukščiui nuo 0,17 iki 0,26 funkcijos argumentų įtaka analogiška kaip 2.30 paveiksle.



2.31 pav. Funkcijos argumentų įtaka praspaudimo stipriui priklausomai nuo d ($a = 0,4$ m)



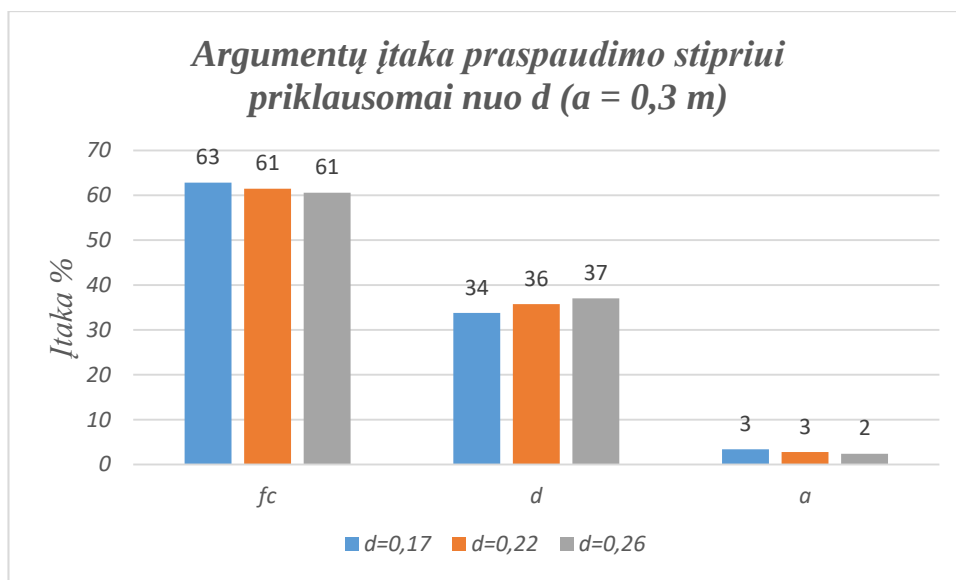
2.32 pav. Funkcijos argumentų įtaka praspaudimo stipriui priklausomai nuo d ($a = 0,6$ m)

Pažymėtina, kad kintant d reikšmei, įtaka nuo d ir f_c kinta nežymiai, o ρ įtaka nekinta. Varijuojant plokštės naudingajam aukščiui ir kolonos kraštinės ilgiui, įtaka nuo a lygi 0. Taip yra dėl STR2 projektavimo normose pateikto skaičiavimo modelio (1.6 pav.).

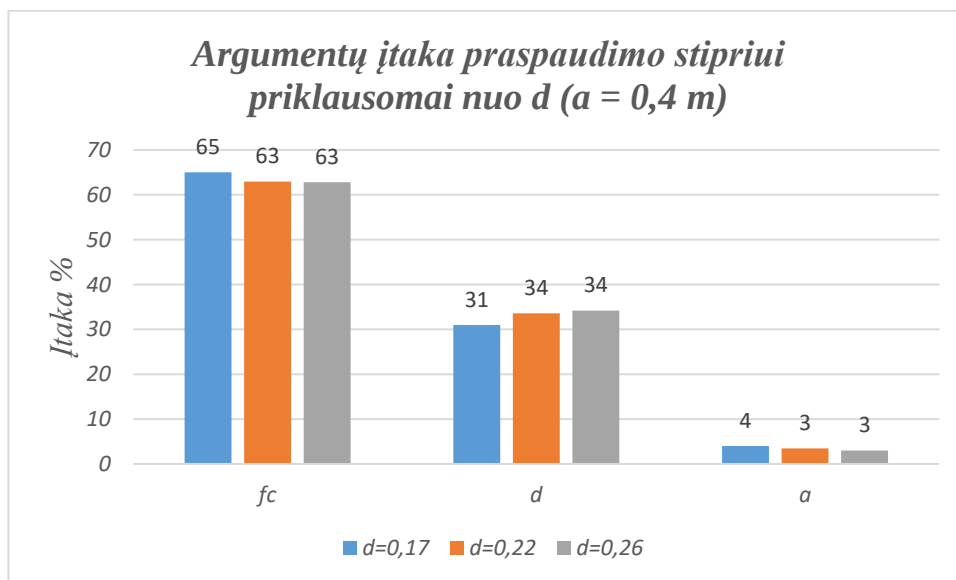
2.5.3. Teorinis praspaudimo stiprio skaičiavimo formulės parametrų vertinimas pagal ACI318

Vidinė kolona

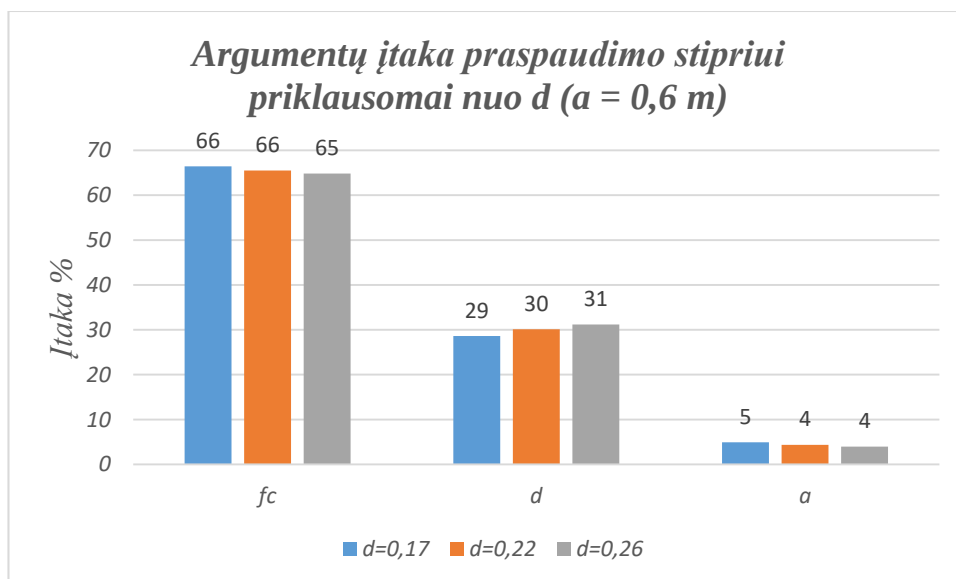
Argumentų įtaka plokštės praspaudimo stipriui ties vidine kolona pavaizduota 2.33-2.35 paveiksluose.



2.33 pav. Funkcijos argumentų įtaka praspaudimo stipriui priklausomai nuo d ($a = 0,3$ m)



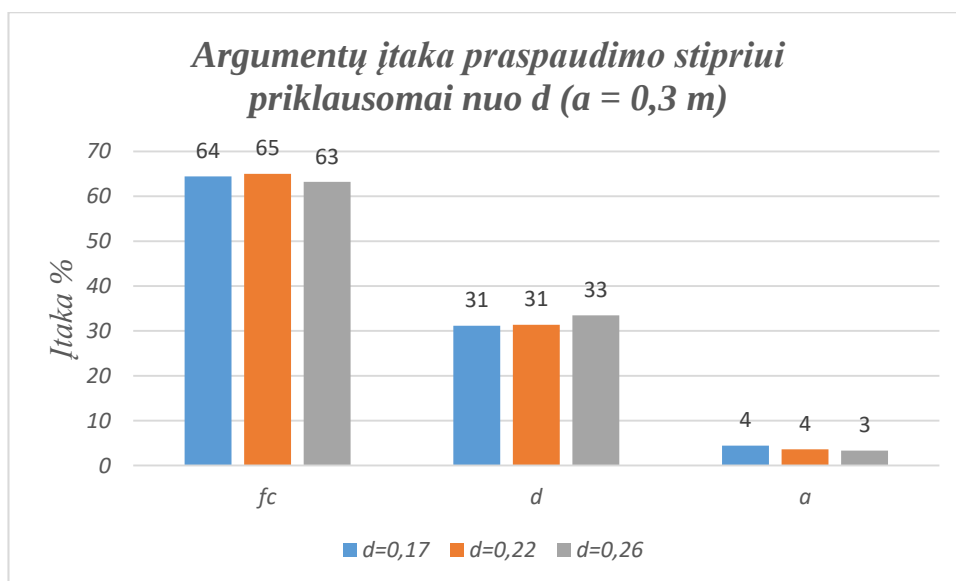
2.34 pav. Funkcijos argumentų įtaka praspaudimo stipriui priklausomai nuo d ($a = 0,4$ m)



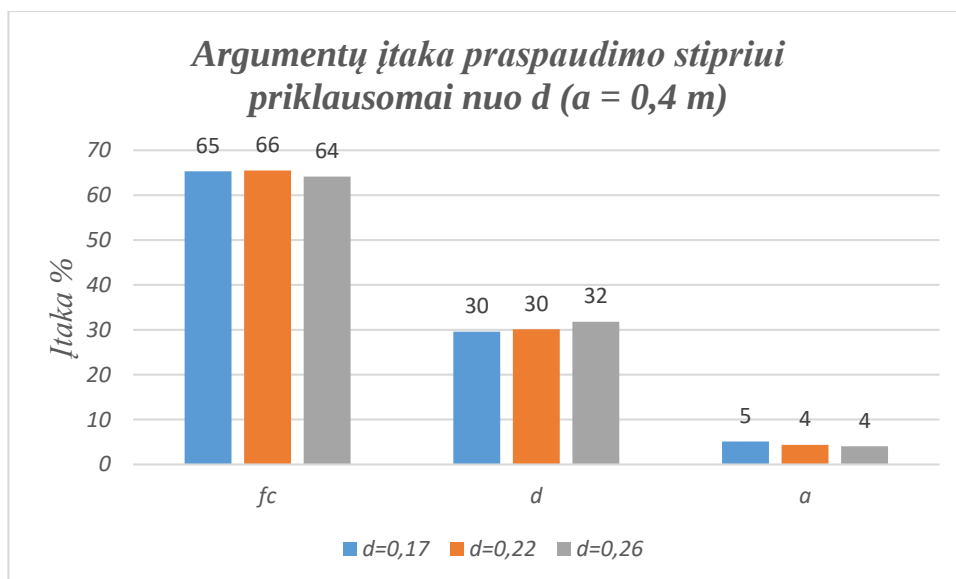
2.35 pav. Funkcijos argumentų įtaka praspaudimo stipriui priklausomai nuo d ($a = 0,6$ m)

Kraštinė kolona

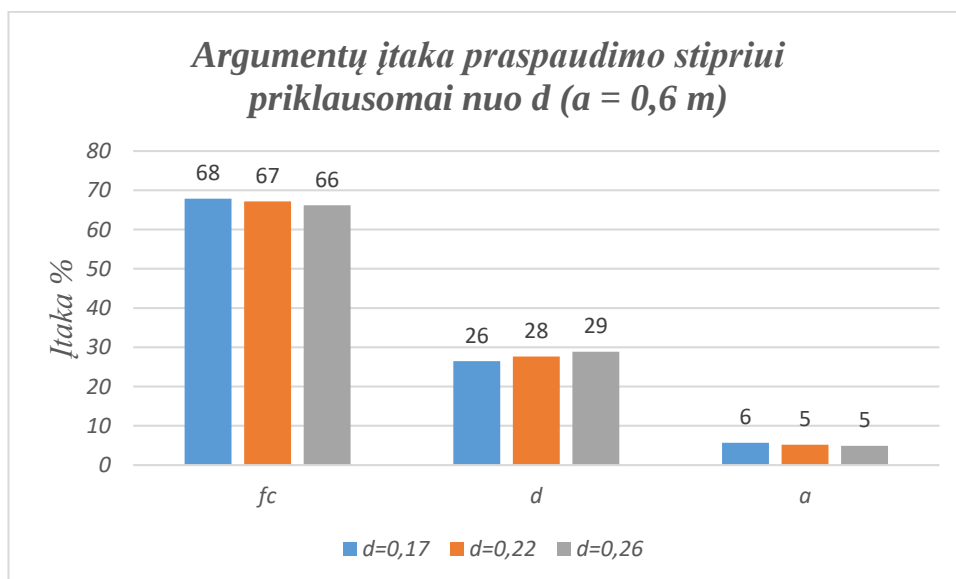
Argumentų įtaka plokštės praspaudimo stipriui ties vidine kolona pavaizduota 2.36-2.38 paveiksluose.



2.36 pav. Funkcijos argumentų įtaka praspaudimo stipriui priklausomai nuo d ($a = 0,3$ m)



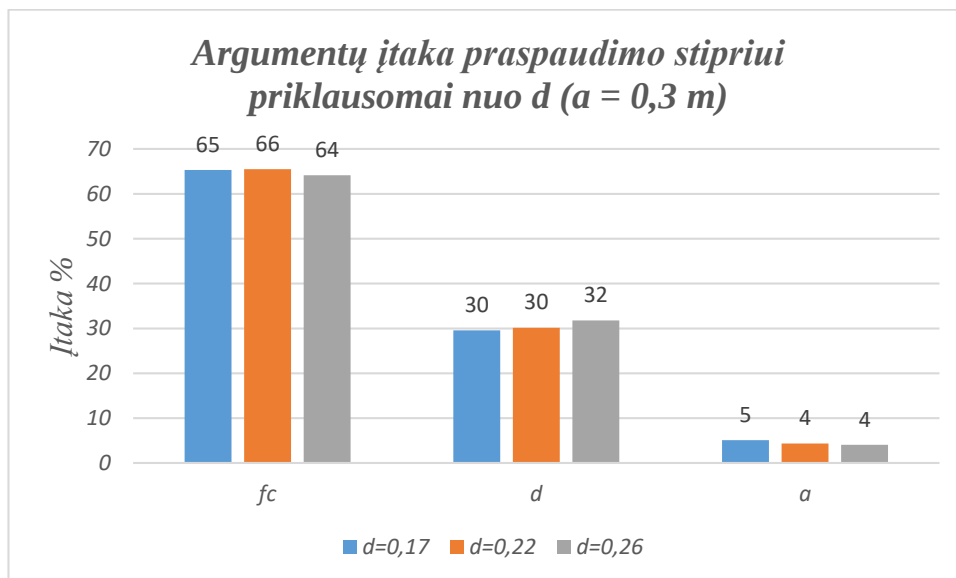
2.37 pav. Funkcijos argumentų įtaka praspaudimo stipriui priklausomai nuo d ($a = 0,4$ m)



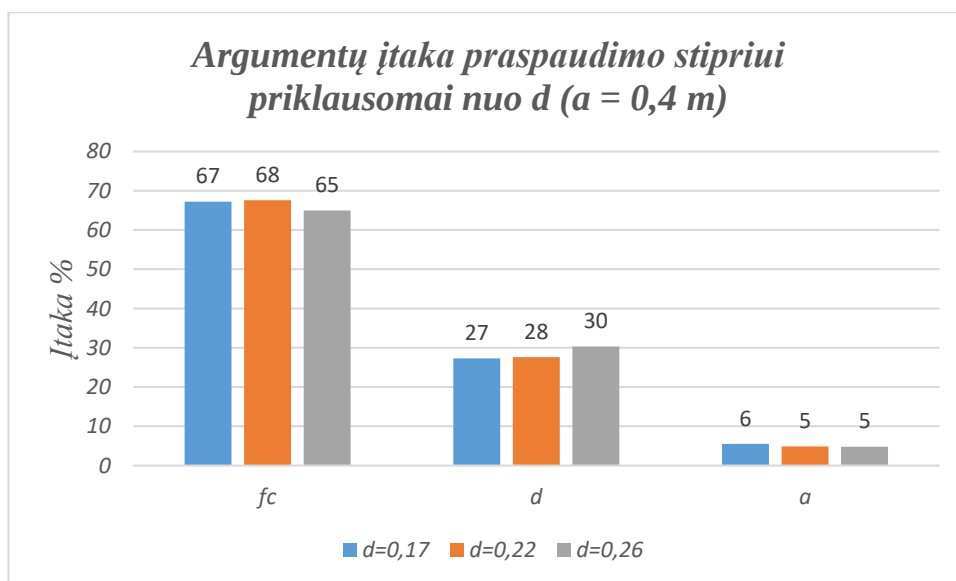
2.38 pav. Funkcijos argumentų įtaka praspaudimo stipriui priklausomai nuo d ($a = 0,6$ m)

Kampinė kolona

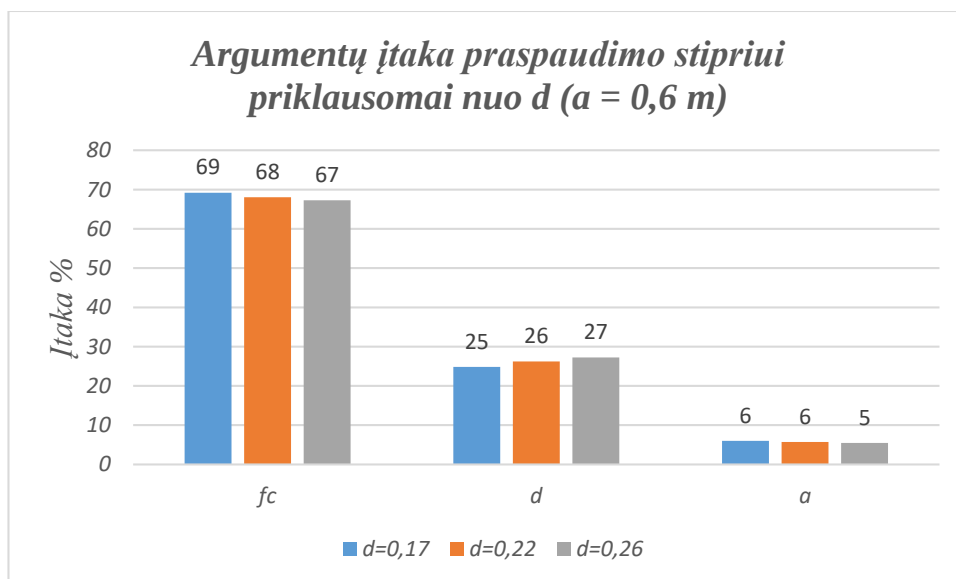
Argumentų įtaka plokštės praspaudimo stipriui ties vidine kolona pavaizduota 2.39-2.41 paveiksluose.



2.39 pav. Funkcijos argumentų įtaka praspaudimo stipriui priklausomai nuo d ($a = 0,3$ m)



2.40 pav. Funkcijos argumentų įtaka praspaudimo stipriui priklausomai nuo d ($a = 0,4$ m)



2.41 pav. Funkcijos argumentų įtaka praspaudimo stipriui priklausomai nuo d ($a = 0,6 m$)

Apžvelgus 2.33-2.41 paveikslus, pastebima, jog visais nagrinėjamais atvejais, skaičiuojant pagal ACI318 normose pateiktą praspaudimo skaičiavimo modelį, gaunama, jog praspaudimo laikomajai galiai, didžiausią įtaką turi betono gniuždomasis stipris (61-69 %). Sekantis parametras turintis nemažą įtaką praspaudimo stipriui, yra plokštės naudingasis aukštis d (25-37 %), o kolonos matmuo, praspaudimo laikomąją galią įtakoja vos 3-6 %.

Apibendrinant galima teigti, jog skaičiuojant pagal ACI318 normose pateiktą metodiką, praspaudimo laikomajai galiai didžiausią įtaką daro betono stipris, o mažiausią – kolonos kraštinės ilgis. Taip pat pastebima, jog didėjant d ir a , jų įtaka didėja, o f_c mažėja, tačiau labai neženkiai.

2.6. Antrojo skyriaus išvados

Atlikus įvairių praspaudimo modelių lyginamąją analizę nustatyta, kad skaičiuojant praspaudimo stiprį pagal EC2 ir STR 2 normose pateiktus modelius, vertinami tie patys praspaudimo funkcijos argumentai (f_c , d , c , ρ_l), o pagal ACI318 normose pateiktą modelį nevertinamas plokštės tempiamos zonos išilginio armavimo koeficientas ρ_l . Tačiau kritinis praspaudimo perimetras visose analizuojamose normose vertinamas skirtingai.

Vienos normos skaičiuojant praspaudimo stiprį vertina lenkimo momento įtaką, kitos – ne. Be to projektavimo normose, kuriose vertinamas M/V santykis, kampinei kolonai jis vertinamas kitaip nei kraštinei ar vidinei kolonai. Kampineje kolonoje M/V santykis skaičiavimuose neregistruoja ir ši įtaka yra vertinama per sumažintą pavojingąjį perimetrą u_{1*} , o

kraštinės ir vidinės kolonų skaičiavimuose šis santykis neatskiriamas nuo plokštės naudingojo aukščio d .

Atlikus parametrinę analizę, nustatyta, kad svarbiausi argumentai praspaudimo laikomajai galiai yra plokštės betono stipris f_c ir plokštės naudingasis aukštis d , kiti veiksniai (c ir ρ_l) yra mažiau įtakingi.

Atlikus koeficiento β parametrinę analizę, nustatyta, kad koeficiento reikšmei didžiausią įtaką turi lenkimo momento ir skersinės jėgos santykio M/V reikšmė. Net ir didėjant kolonos kraštinės ilgiui c ir plokštės naudingajam aukščiui d , koeficiento β reikšmė mažėja, tačiau esant didelei M/V reikšmei, koeficiento β reikšmės gaunamos didesnės nei pateiktos normose, vidinei kolonai (1,5-2,44), kraštinei kolonai (1,89-2,28).

Atlikus praspaudimo skaičiavimo modelių laikomosios galios funkcijos argumentų statistinę analizę ties vidine kolona, nustatyta, kad reikšmingiausi nariai yra šie: a) modeliuose, kuriuose vertinama lenkimo momento įtaka esant $M/V = 0,052$ – f_c (apie 48 %), d (apie 45 %), kiti argumentų įtaka maža vos 1-2 %. Esant $M/V = 0,41$ – d (apie 40 %), f_c (apie 30 %), M/V (apie 27 %), kolonos kraštinės ilgio c įtaka praspaudimo laikomajai galiai yra apie 2 %. Modeliuose, kuriuose nevertinama lenkimo momento įtaka, svarbiausi funkcijos argumentai yra betono stipris f_c (apie 50 %) ir plokštės naudingasis aukštis d (apie 45 %).

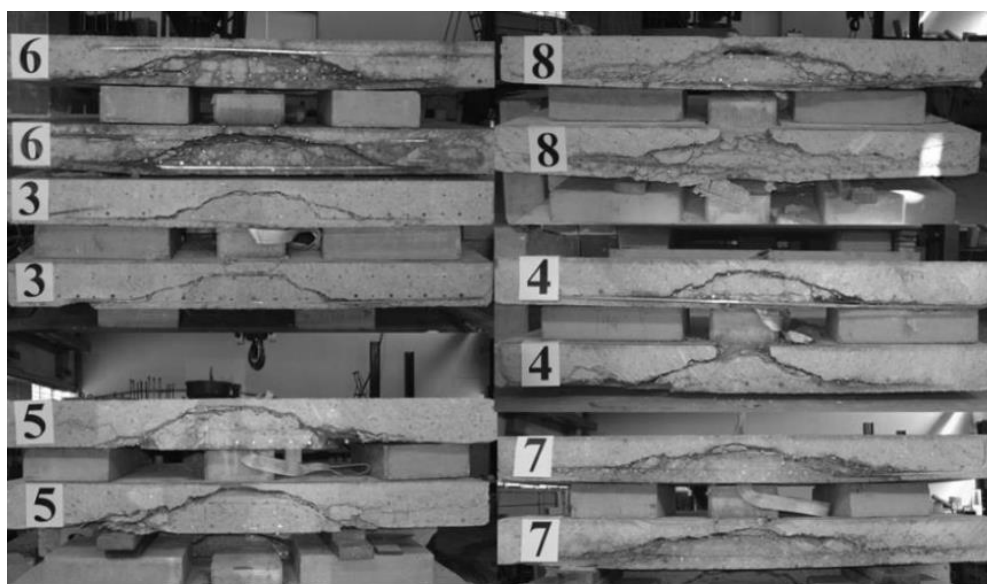
Atlikus praspaudimo skaičiavimo modelių laikomosios galios funkcijos argumentų statistinę analizę ties kraštine kolona, nustatyta, kad modeliuose, kuriuose vertinama lenkimo įtaka, reikšmingiausi nariai esant didelei M/V reikšmei yra plokštės naudingasis aukštis d ir lenkimo momento ir skersinės jėgos santykis M/V . Modeliuose, kuriuose nevertinama lenkimo įtaka, reikšmingiausi nariai yra betono stipris f_c (apie 65 %) ir plokštės naudingasis aukštis d (apie 30 %).

3. EKSPERIMENTINIŲ TYRIMŲ ANALIZĖ

Šiame baigiamajame darbe siekiant nustatyti modelių tikslumą bei išsiaiškinti praspaudimo laikomosios galios funkcijos argumentų įtaką praspaudimo stipriui, buvo surinkti įvairių šalių autorių eksperimentinių tyrimų duomenys. Didesnė dalis eksperimentų atlikta nesuteikiant kolonai lenkimo momento (3.1 lentelė), mažesnė dalis – suteikiant (3.3 lentelė).

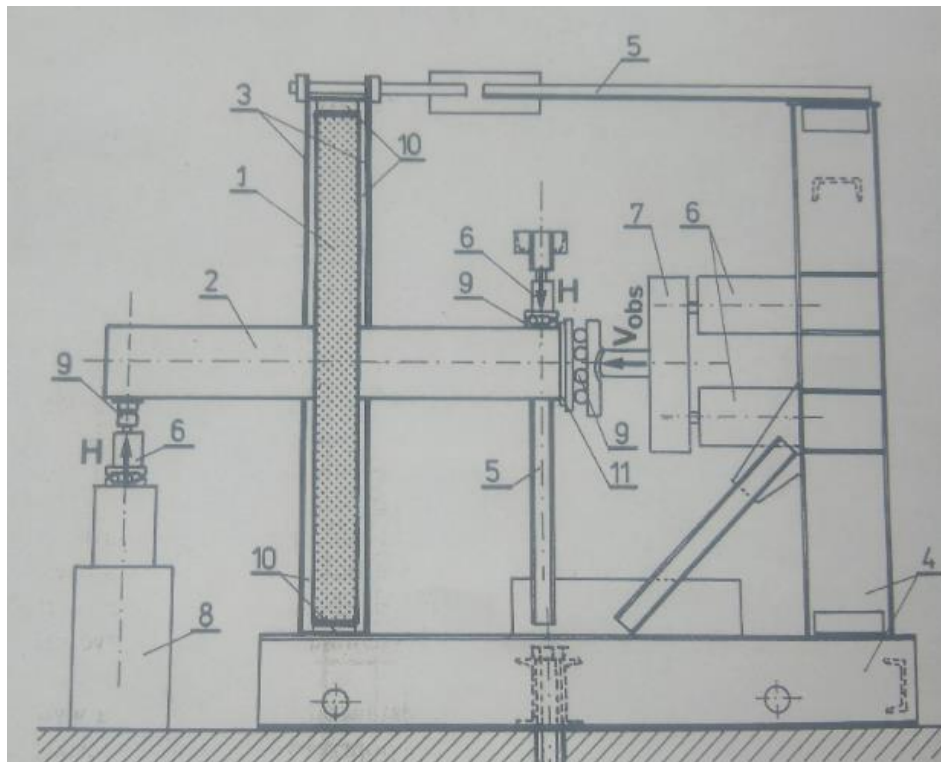
Surinkti duomenys naudojami plokštės praspaudimo sisteminėms ir atsitiktinėms paklaidoms nustatyti. Atliekama modelių regresinė analizė, nustatomas konstrukcijos patikimumas bei nustatoma kiekvieno argumento įtaka, praspaudimo laikomosios galios skaičiavimo tikslumui.

Visi bandymai atliekami tol, kol bandinio praspaudžiamoji zona suyra. Suirę bandiniai pavaizduoti 3.1 paveiksle.

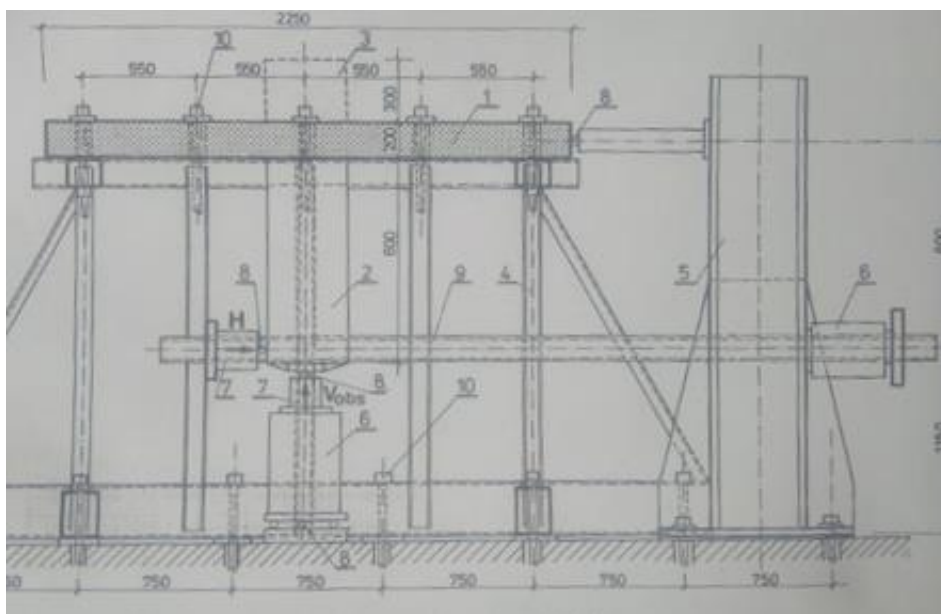


3.1 pav. Gelžbetoninių plokščių skerspjūviai atlikus bandymus, kuriuose nebuvo kolonai suteiktas lenkimo momentas (Daubaras 2016)

Bandymai atliekami suteikiant lenkimo momentą yra sudėtingesti, jų aptinkama literatūroje rečiau. Įvairūs autoriai taiko skirtingas praspaudimo schemas: vieni plokštes į bandymo standus montuoja horizontaliai, kiti – vertikaliai. Paprastai lenkimo momentas ir veikiančioji jėga suteikiami per du hidraulinius kėliklius. Keletas bandymo schemų pavaizduotos 3.2 ir 3.3 paveiksluose.



3.2. pav. Gelžbetoninės plokštės praspaudimo bandinio schema, suteikiant kolonai lenkimo momentą (Kozickiego, Urbana, Kosinskij et.al. 1988)



3.3 pav. Gelžbetoninės plokštės praspaudimo bandinio schema, suteikiant kolonai lenkimo momentą (Pajaka 1988)

3.1. Gelžbetoninių plokščių praspaudimo laikomosios galios eksperimentiniai tyrimai, kuriuose nevertinamas lenkimo momentas

Analizei literatūroje rasta 65 gelžbetoninių plokščių be skersinės armatūros praspaudimo laikomosios galios tyrimo duomenų, kurie pateikti 3.1 lentelėje. Analizuojamų plokščių naudingasis aukštis d varijuoja nuo 57 iki 356 mm, tad normose, kuriose vertinamas plokštės aukščio koeficientas k , dažnai buvo peržengiama maksimali leistina šio koeficiento riba ($=2,0$). Betono stipris f_c varijuoja nuo 19,5 MPa iki 59 MPa ir visų bandymų plokštės buvo armuotos išilgine tempiama armatūra, kurios kiekis skerspjūvyje kinta nuo 0,3 iki 3,7 %. Vienose normose šis argumentas nevertinamas, o kitose ir vertinamas, ir ribojamas. Nedidelė dalis eksperimentų buvo atlikti, kai armavimo koeficientas ρ_l viršijo 2 %, tad teoriniuose skaičiavimuose šie atvejai bus skaičiuojami kai $\rho_l = 2$ %.

Eksperimentai buvo atliekami, bandant plokštės bandymo stenduose. Plokštė atremiama visu perimetru, o apkrova perduodama spaudžiant per vidurį esančią koloną, tol, kol plokštė suyra. Eksperimentams naudota vidinės kolonos schema, kai EC2 ir STR2 projektavimo normose leidžiama pasirinkti koeficientą $\beta = 1,15$.

Apskaičiuotos plokštės praspaudimo laikomosios galios reikšmės pateiktos Plokščių be skersinės armatūros praspaudimo laikomosios galios eksperimentinių ir teorinių reikšmių palyginimas pateiktas 3.2 lentelėje.

Pabrėžtina, kad šios reikšmės buvo skaičiuotos taip pat su apskaičiuotomis koeficiento β reikšmėmis pagal eksperimentinių tyrimų pateiktus duomenis. Apskaičiuotos koeficiento β reikšmės pateiktos D priede.

3.1 lentelė. Gelžbetoninių plokščių be skersinės armatūros eksperimentinių tyrimų duomenys
(Daubaras 2016)

Autorius	Bandinys	d, mm	c, mm	f_{cm}, MPa	$\rho_l, \%$	V_{test}, MN
Nolting	2	114	287	23,4	1,06	0,362
	3	114	287	25,7	1,15	0,309
	4	57	115	29,1	0,72	0,086
	5	57	115	29,2	1,63	0,113
	6	356	402	24,9	0,37	2,114
	7	356	402	25,3	0,39	2,202
S. M. Allam	S-1	75	100	40	0,92	0,170
S. H. Meisami	CS-43	94	150	42,4	0,3	0,242

A. P. Ramos	AR2	80	200	49	2,34	0,258
	AR3	80	200	48,9	2,34	0,270
	AR4	80	200	46,8	2,34	0,252
	AR5	80	200	53,9	2,34	0,251
	AR6	80	200	44,6	2,34	0,250
	AR7	80	200	46,2	2,34	0,288
	BD1	101	100	54,8	0,89	0,293
	BD2	101	100	52,8	0,89	0,268
	BD4	101	100	46	0,89	0,293
	BD5	101	100	41,4	0,89	0,208
	BD6	101	100	43,3	0,89	0,225
	BD7	101	100	44,2	0,89	0,221
	BD8	101	100	44,1	0,89	0,221
B. Wieczorek	A-1	164	400	23,9	0,74	0,540
	E-2	200	400	23,9	0,74	0,623
	K-3	200	400	23,9	0,74	0,639
A. Perez. Caldentey	1	200	450	37,2	1,07	0,974
	2	200	450	37,6	1,07	0,956
A. Abdullah	RS0	118	250	35,5	0,48	0,284
Urban	Pm1/1-0.8	98	160	26,7	0,81	0,210
	Pm1/1-1.5	99	160	23,9	1,43	0,260
	Pd1/1-1.5	99	320	30,1	1,43	0,360
Oliveria et.	L1b	108	120	59	1,04	0,322
	L1c	107	120	59	1,04	0,318
Teng et.	OC11	105	200	36	1,81	0,423
Elstner and Hognestad	A-1b	118	254	25,2	1,2	0,365
	A-1c	118	254	29	1,2	0,356
	A-1d	118	254	36,6	1,2	0,351
	A-1e	118	254	20,3	1,2	0,356
	A-2b	114	254	19,5	2,5	0,400
	A-2c	114	254	37,4	2,5	0,467
	A-7b	114	254	27,9	2,5	0,512
	A-3b	114	254	22,6	3,7	0,445
	A-3c	114	254	26,5	3,7	0,534
	A-3d	114	254	34,5	3,7	0,547
	A-4	118	356	26,1	1,2	0,400
	A-5	114	356	27,8	2,5	0,534
	B-9	114	254	43,9	2	0,505
	B-14	114	254	50,5	3	0,578
Moe	S1-60	114	254	23,3	1,1	0,389
	S1-70	114	254	24,5	1,1	0,393
	S5-60	114	203	22,2	1,1	0,343

Regan	S5-70	114	203	23	1,1	0,378
	H1	114	254	26,1	1,1	0,372
	M1A	114	305	20,8	1,5	0,433
	1/2	77	200	23,4	1,2	0,176
	1/4	77	200	32,3	0,9	0,194
	1/6	79	200	21,9	0,8	0,165
	1/7	79	200	30,4	0,8	0,186
	2/1	200	250	34,9	1	0,825
	2/2	128	160	33,3	1	0,390
	2/3	128	160	34,3	1	0,365
	2/4	64	80	33,3	1	0,117
	2/5	64	80	34,3	1	0,105
	2/6	64	80	36,2	1	0,105
	3/1	95	150	23,2	0,8	0,197
	3/3	95	150	37,8	0,8	0,214

Daugumos bandinių geometriniai duomenys nėra pasitaikantys realioje statyboje. Atliekant eksperimentus, bandiniai sumažinami dėl didelių kaštų, apkrovą suteikiančio stendo matmenų bei dėl to, kad bandinių laikomoji galia neviršytų naudojamo preso galios.

Visiems bandiniams taikomos ribos, nustatytos normose, kaip ir realiai projektuojamiems elementams.

3.1.1. Perdangos plokštės praspaudimo laikomosios galios reikšmių palyginimas

Plokščių be skersinės armatūros praspaudimo laikomosios galios eksperimentinių ir teorinių reikšmių palyginimas pateiktas 3.2 lentelėje.

3.2 lentelė. Bandinių be skersinės armatūros praspaudimo laikomosios galios lyginimas su apskaičiuotomis reikšmėmis

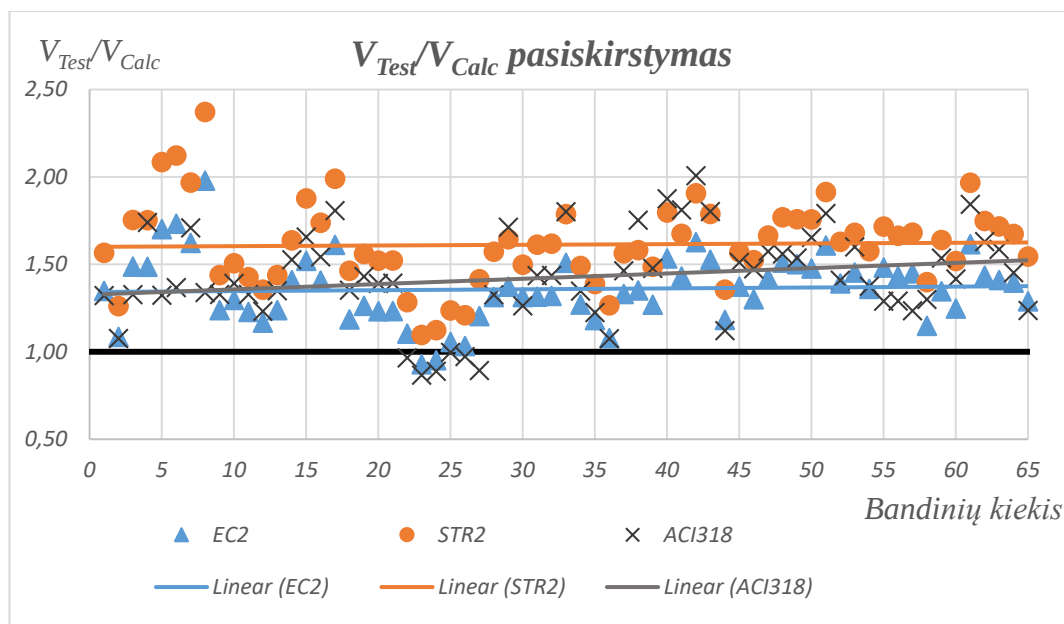
$V_{test},$ MN	$V_{calc, EC2},$ kN	$V_{calc, STR2},$ kN	$V_{cal, ACI318},$ kN	$V_{Test}/V_{calc},$ EC2	$V_{Test}/V_{calc},$ STR2	$V_{Test}/V_{calc},$ ACI318
0,362	0,27	0,23	0,27	1,35	1,57	1,32
0,309	0,28	0,25	0,29	1,09	1,26	1,08
0,086	0,06	0,05	0,06	1,49	1,75	1,33
0,113	0,08	0,06	0,06	1,49	1,75	1,74
2,114	1,24	1,01	1,60	1,70	2,08	1,32
2,202	1,27	1,04	1,61	1,73	2,12	1,37
0,170	0,10	0,09	0,10	1,62	1,97	1,71
0,242	0,12	0,10	0,18	1,98	2,37	1,34

0,258	0,21	0,18	0,19	1,24	1,44	1,33
0,270	0,21	0,18	0,19	1,30	1,51	1,39
0,252	0,21	0,18	0,19	1,23	1,43	1,33
0,251	0,22	0,19	0,20	1,17	1,36	1,23
0,250	0,20	0,17	0,19	1,24	1,44	1,35
0,288	0,20	0,18	0,19	1,41	1,64	1,53
0,293	0,19	0,16	0,18	1,52	1,88	1,66
0,268	0,19	0,15	0,17	1,41	1,74	1,54
0,293	0,18	0,15	0,16	1,61	1,99	1,81
0,208	0,18	0,14	0,15	1,18	1,46	1,35
0,225	0,18	0,14	0,16	1,26	1,56	1,43
0,221	0,18	0,15	0,16	1,23	1,52	1,39
0,221	0,18	0,15	0,16	1,23	1,52	1,39
0,540	0,49	0,42	0,56	1,10	1,28	0,97
0,623	0,67	0,57	0,72	0,93	1,10	0,87
0,639	0,67	0,57	0,72	0,95	1,12	0,89
0,974	0,92	0,79	0,98	1,06	1,24	1,00
0,956	0,93	0,79	0,98	1,03	1,21	0,97
0,284	0,24	0,20	0,32	1,20	1,41	0,89
0,210	0,16	0,13	0,16	1,31	1,57	1,33
0,260	0,19	0,16	0,15	1,37	1,64	1,71
0,360	0,27	0,24	0,29	1,31	1,50	1,26
0,322	0,24	0,20	0,22	1,31	1,61	1,44
0,318	0,24	0,20	0,22	1,32	1,62	1,44
0,423	0,28	0,24	0,23	1,51	1,79	1,80
0,365	0,29	0,24	0,27	1,27	1,49	1,35
0,356	0,30	0,26	0,29	1,18	1,39	1,22
0,351	0,33	0,28	0,33	1,08	1,27	1,07
0,356	0,27	0,23	0,24	1,33	1,56	1,46
0,400	0,30	0,25	0,23	1,35	1,58	1,75
0,467	0,37	0,31	0,32	1,27	1,49	1,48
0,512	0,33	0,28	0,27	1,53	1,80	1,88
0,445	0,31	0,27	0,25	1,43	1,68	1,81
0,534	0,33	0,28	0,27	1,63	1,91	2,01
0,547	0,36	0,31	0,30	1,53	1,79	1,80
0,400	0,34	0,30	0,36	1,18	1,35	1,12
0,534	0,39	0,34	0,35	1,37	1,57	1,51
0,505	0,39	0,33	0,34	1,30	1,52	1,47
0,578	0,41	0,35	0,37	1,42	1,66	1,57
0,389	0,26	0,22	0,25	1,51	1,77	1,56
0,393	0,26	0,22	0,26	1,50	1,76	1,54
0,343	0,23	0,20	0,21	1,48	1,76	1,65

0,378	0,24	0,20	0,21	1,61	1,91	1,79
0,372	0,27	0,23	0,26	1,39	1,63	1,41
0,433	0,30	0,26	0,27	1,45	1,68	1,60
0,176	0,13	0,11	0,13	1,36	1,57	1,37
0,194	0,13	0,11	0,15	1,48	1,72	1,29
0,165	0,12	0,10	0,13	1,43	1,66	1,29
0,186	0,13	0,11	0,15	1,45	1,68	1,23
0,825	0,72	0,59	0,63	1,15	1,40	1,30
0,390	0,29	0,24	0,25	1,35	1,64	1,54
0,365	0,29	0,24	0,26	1,25	1,52	1,42
0,117	0,07	0,06	0,06	1,62	1,97	1,84
0,105	0,07	0,06	0,06	1,44	1,75	1,63
0,105	0,07	0,06	0,07	1,41	1,72	1,59
0,197	0,14	0,12	0,14	1,40	1,67	1,45
0,214	0,17	0,14	0,17	1,29	1,55	1,24

Plokščių be skersinės armatūros praspaudimo laikomosios galios eksperimentinių ir teorinių reikšmių palyginimas pateiktas 3.2 lentelėje.

3.2 lentelėje pateikti rezultatai rodo, kad beveik visais atvejais eksperimentinė plokštės praspaudžiamoji galia didesnė nei apskaičiuotoji. Galima teigti, jog kuriant skaičiavimo modelius, siekiama įvesti dalinio patikimumo koeficientus, kurie sumažintų skaičiuojamąją laikomąją galią ir konstrukcijos atlaikomoji galia būtų gaunama mažesnė nei ši konstrukcija atlaikytų realiomis eksploataavimo sąlygomis. Laikomosios galios pasiskirstymas tarp eksperimentinių ir teorinių reikšmių pavaizduotas 3.4 paveiksle.



3.4 pav. Tiriamųjų plokščių praspaudimo laikomosios galios pasiskirstymas, taikant skirtingose projektavimo normose pateiktas praspaudimo skaičiavimo metodikas

Pateiktame grafike matomas didelis santykinių reikšmių išsibarstymas. Pastebima, kad atliktų skaičiavimų V_{Test}/V_{Calc} santykio aritmetinis vidurkis visiems skaičiavimo modeliams viršija ribą, lygią 1,0. Visose projektavimo normose skaičiavimo modeliai turi paklaidas, tačiau visų modelių paklaidos sudaromos siekiant apsidrausti. Pagal gautas reikšmes teigiama, kad didžiausia atsarga gaunama skaičiuojant pagal STR normose norodytą modelį, kadangi, apskaičiavus pagal šį modelį gaunamas didžiausias aritmetinis vidurkis – apie 1,6. Skaičiuojant praspaudimo laikomąją galią, mažiausia atsarga gaunama naudojant EC2 normose pateiktą praspaudimo modelį.

3.1.2. Gelžbetoninių plokščių praspaudimo laikomosios galios regresinė analizė

Regresinė analizė atliekama, siekiant nustatyti, kokią įtaką turi atskiri plokštės praspaudimo funkcijos argumentai plokštės praspaudimo laikomajai galiai. Regresinė analizė leidžia prognozuoti V_{test}/V_{calc} santykio tikslumą.

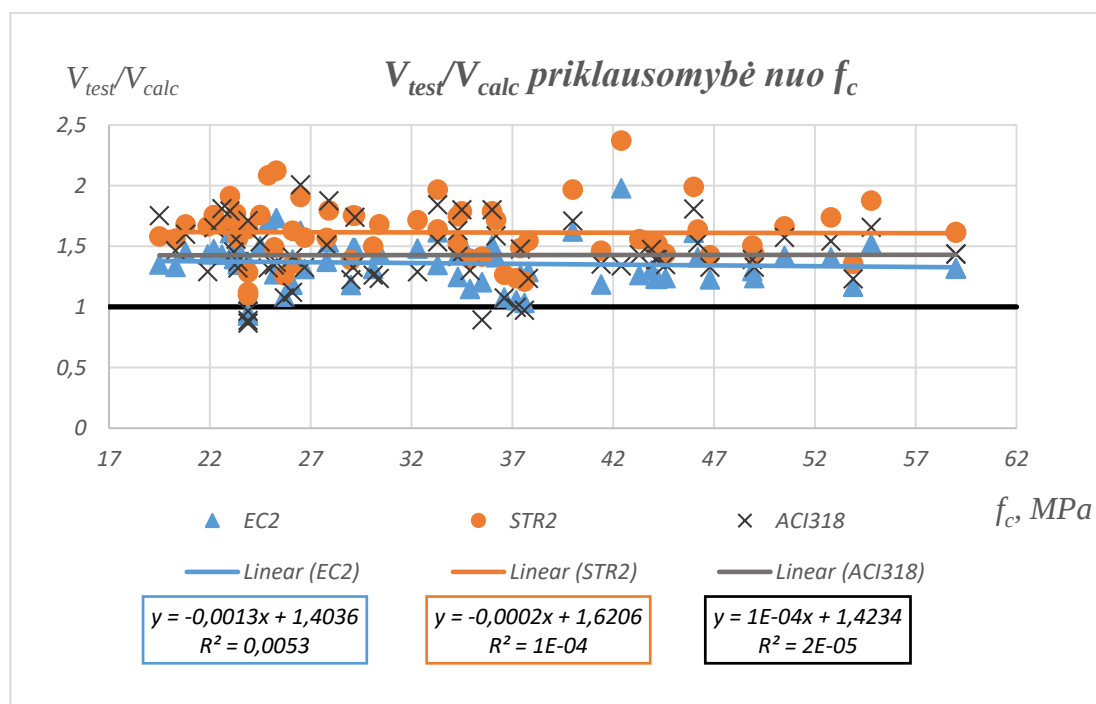
Regresinei analizei atlikti naudojami 3.1 ir Plokščių be skersinės armatūros praspaudimo laikomosios galios eksperimentinių ir teorinių reikšmių palyginimas pateiktas 3.2 lentelėje.

lentelėse pateikti eksperimentinių tyrimų duomenys.

3.1.3. Tikslumo priklausomybė nuo betono stiprio f_c

Skirtingų normų plokštės praspaudimo laikomosios galios apskaičiavimo modelių regresinė analizė V_{test}/V_{calc} santykiui priklausomai nuo plokštės betono stiprio grafiškai pateikiama 3.5 paveiksle. Grafike nurodomos skirtingose projektavimo normose pateiktų praspaudimo skaičiavimo modelių regresinės analizės lygtys ir determinacijos koeficientai.

3.5 paveiksle pateiktas V_{test}/V_{calc} reikšmių išsibastymas priklausomai nuo betono stiprio f_c reikšmės. Taip pat grafike pateiktos regresinės analizės lygtys, kuriose labai svarbus yra laisvasis narys, kuris nusako modelio paklaidą. Matoma, kad didžiausia laisvojo nario reikšmė yra STR2 normose pateiktam modeliui – 1,62. Tai reiškia, kad vidutiniškai plokštės tikroji praspaudimo laikomoji galia 62 % bus didesnė už teoriškai apskaičiuotą pagal skaičiavimo modelį. Mažiausia paklaida gaunama skaičiuojant pagal EC2 normose pateikto plokštės praspaudimo laikomosios galios skaičiavimo modelį – 40 %. Pagal tiesės koeficiento x neigiamą reikšmę, sprendžiama, kad didėjant betono stipriui f_c – modelio paklaida mažėja. Grafike pateiktas determinacijos koeficientas R^2 , kuris visiems modeliams yra labai mažas, todėl galima teigti, kad V_{test}/V_{calc} santykis nėra tiesiškai priklausomas nuo betono stiprio f_c reikšmės.

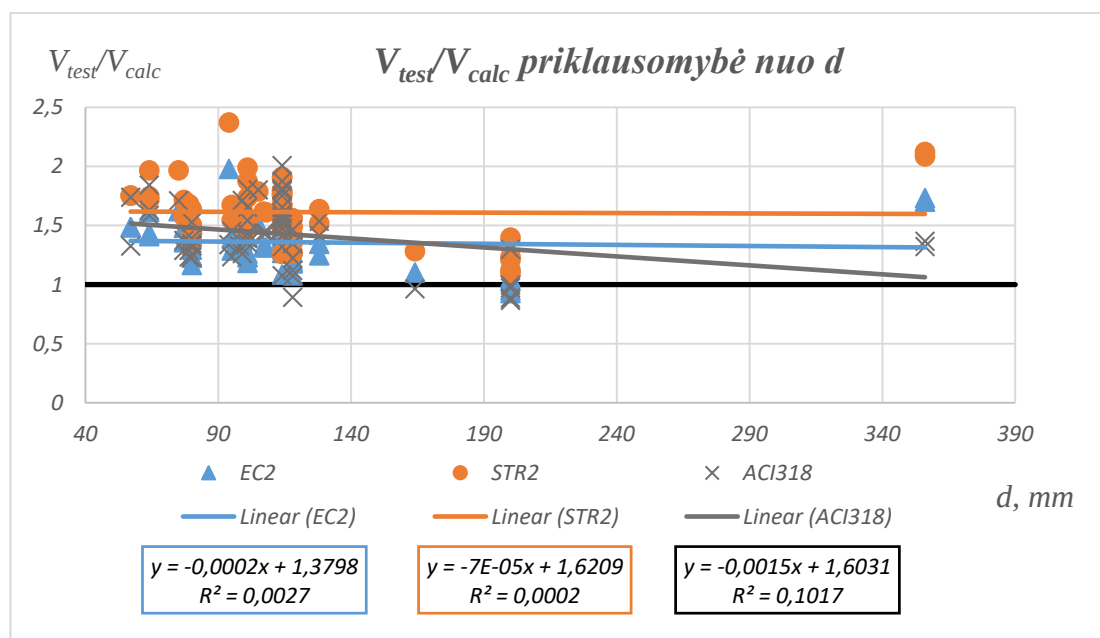


3.5 pav. Eksperimentų metu gautų ir apskaičiuotų praspaudimo laikomosios galios santykio reikšmių priklausomybė nuo plokštės betono stiprio f_c

3.1.4. Tikslumo priklausomybė nuo plokštės naudingojo aukščio d

Skirtingų normų plokštės praspaudimo laikomosios galios apskaičiavimo modelių regresinė analizė V_{test}/V_{calc} santykiui priklausomai nuo plokštės naudingojo aukščio grafiškai pateikiama 3.6 paveiksle. Grafike nurodomos skirtingose projektavimo normose pateiktų praspaudimo skaičiavimo modelių regresinės analizės lygtys ir determinacijos koeficientai.

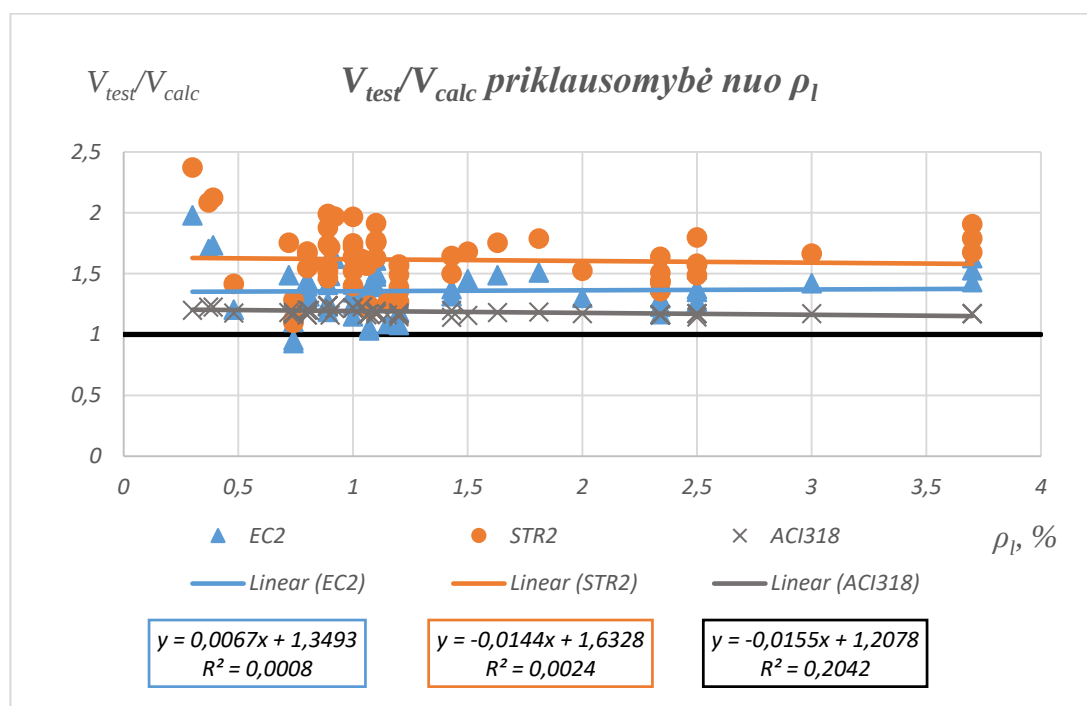
3.6 paveiksle pateiktas V_{test}/V_{calc} reikšmių išsibarstymas priklausomai nuo plokštės naudingojo aukščio d reikšmės. Taip pat grafike pateiktos regresinės analizės lygtys, kuriose labai svarbus yra laisvasis narys, kuris nusako modelio paklaidą. Matoma, kad didžiausia laisvojo nario reikšmė yra STR2 ir ACI318 normose pateiktiems modeliams – atitinkamai 1,62 ir 1,60. Tai reiškia, kad vidutiniškai plokštės tikroji praspaudimo laikomoji galia 62 % (STR2) ir 60 % (ACI318) bus didesnė už teoriškai apskaičiuotą pagal skaičiavimo modelį. Mažiausia paklaida gaunama skaičiuojant pagal EC2 normose pateikto plokštės praspaudimo laikomosios galios skaičiavimo modelį – 38 %. Pagal tiesės koeficiento x neigiamą reikšmę, sprendžiama, kad didėjant plokštės naudingajam aukščiui d – modelio paklaida mažėja. Grafike pateiktas determinacijos koeficientas R^2 , kuris visiems modeliams yra labai mažas, todėl galima teigti, kad V_{test}/V_{calc} santykis nėra tiesiškai priklausomas nuo plokštės naudingojo aukščio d reikšmės.



3.6 pav. Eksperimentų metu gautų ir apskaičiuotų praspaudimo laikomosios galios santykio reikšmių priklausomybė nuo plokštės naudingojo aukščio

3.1.5. Tikslumo priklausomybė nuo tempiamos plokštės zonos armavimo koeficiento ρ_l

Skirtingų normų plokštės praspaudimo laikomosios galios apskaičiavimo modelių regresinė analizė V_{test}/V_{calc} santykiui priklausomai nuo tempiamos plokštės zonos armavimo koeficiento grafiškai pateikiama 3.7 paveiksle. Grafike nurodomos skirtingose projektavimo normose pateiktų praspaudimo skaičiavimo modelių regresinės analizės lygtys ir determinacijos koeficientai.



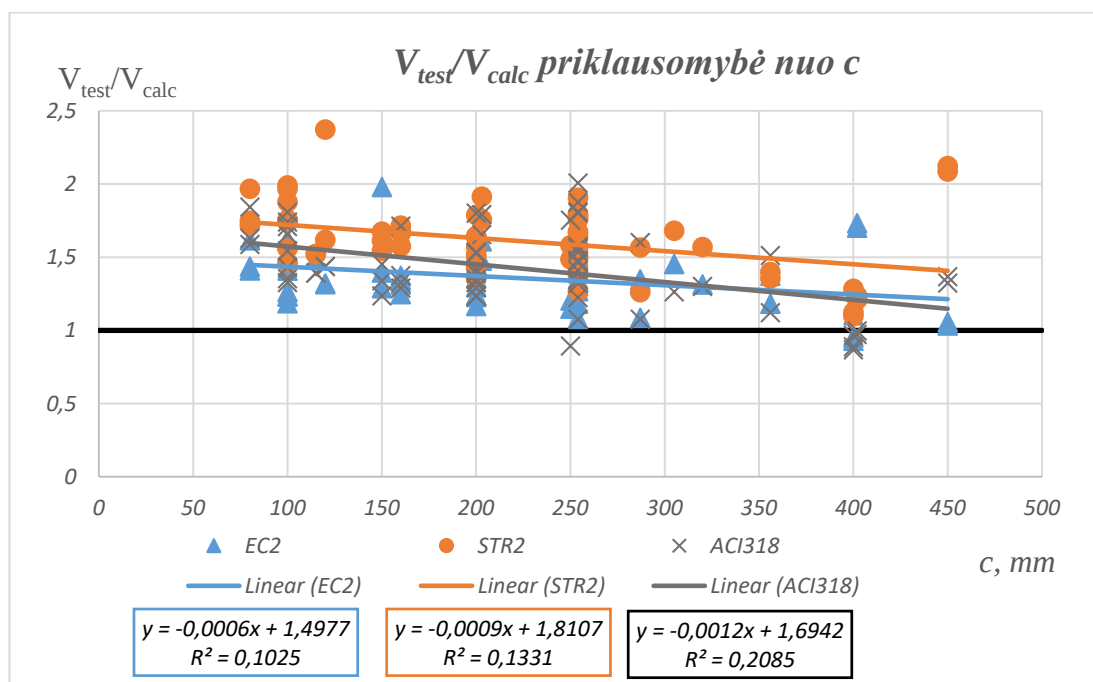
3.7 pav. Eksperimentų metu gautų ir apskaičiuotų praspaudimo laikomosios galios santykio reikšmių priklausomybė nuo plokštės išilginio armavimo koeficiento

3.7 paveiksle pateiktas V_{test}/V_{calc} reikšmių išsibarstymas priklausomai nuo tempiamos plokštės zonos armavimo koeficiento ρ_l reikšmės. Taip pat grafike pateiktos regresinės analizės lygtys, kuriose labai svarbus yra laisvasis narys, kuris nusako modelio paklaidą. Matoma, kad didžiausia laisvojo nario reikšmė yra STR2 normose pateiktam modeliui – 1,63. Tai reiškia, kad vidutiniškai plokštės tikroji praspaudimo laikomoji galia 63 % bus didesnė už teoriškai apskaičiuotą pagal skaičiavimo modelį. Mažiausia paklaida gaunama skaičiuojant pagal ACI318 normose pateikto plokštės praspaudimo laikomosios galios skaičiavimo modelį – 21 %. Pabrėžtina, kad praspaudimo laikomosios galios skaičiavimo modelyje, pateiktame ACI318 projektavimo normose, koeficientas ρ_l nevertinamas. Pagal tiesės koeficiento x neigiamą reikšmę, sprendžiama, kad didėjant plokštės tempiamos zonos

armavimo koeficientui ρ_l – modelio paklaida mažėja STR2 ir ACI318 normose pateiktiems praspaudimo skaičiavimo modeliams, o pagal EC2 normose pateiktą modelį, matoma, kad didėjant ρ_l reikšmei – modelio paklaida didėja. Grafike pateiktas determinacijos koeficientas R^2 , kuris visiems modeliams yra labai mažas, todėl galima teigti, kad V_{test}/V_{calc} santykis nėra tiesiškai priklausomas nuo plokštės tempiamos zonos armavimo koeficiento reikšmės.

3.1.6. Tikslumo priklausomybė nuo kolonos kraštinės ilgio c

Skirtingų normų plokštės praspaudimo laikomosios galios apskaičiavimo modelių regresinė analizė V_{test}/V_{calc} santykiui priklausomai nuo kolonos kraštinės ilgio grafiškai pateikiama 3.8 paveiksle. Grafike nurodomos skirtingose projektavimo normose pateiktų praspaudimo skaičiavimo modelių regresinės analizės lygtys ir determinacijos koeficientai.



3.8 pav. Eksperimentų metu gautų ir apskaičiuotų praspaudimo laikomosios galios santykio reikšmių priklausomybė nuo kolonos kraštinės ilgio

3.8 paveiksle pateiktas V_{test}/V_{calc} reikšmių išsibarstymas priklausomai nuo kolonos kraštinės ilgio c reikšmės. Taip pat grafike pateiktos regresinės analizės lygtys, kuriose labai svarbus yra laisvasis narys, kuris nusako modelio paklaidą. Matoma, kad didžiausia laisvojo nario reikšmė yra STR2 normose pateiktam modeliui – 1,81. Tai reiškia, kad vidutiniškai plokštės tikroji praspaudimo laikomoji galia 81 % bus didesnė už teoriškai apskaičiuotą pagal skaičiavimo modelį. Mažiausia paklaida gaunama skaičiuojant pagal EC2 normose pateikto

plokštės praspaudimo laikomosios galios skaičiavimo modelį – 50 %. Pagal tiesės koeficiento x neigiamą reikšmę, sprendžiama, kad didėjant kolonos kraštinės ilgiui c – modelio paklaida mažėja. Grafike pateiktas determinacijos koeficientas R^2 , kuris visiems modeliams yra labai mažas, todėl galima teigti, kad V_{test}/V_{calc} santykis nėra tiesiškai priklausomas nuo kolonos kraštinės ilgio c reikšmės.

3.2. Gelžbetoninių plokščių praspaudimo laikomosios galios eksperimentiniai tyrimai, kuriuose vertinamas lenkimo momentas

Surinkta 25 gelžbetoninių plokščių be skersinės armatūros praspaudimo laikomosios galios tyrimo duomenų, kurie pateikti 3.3 lentelėje. Analizuojamų plokščių naudingasis aukštis varijuoja nuo 120 iki 164 mm, o normose, kuriose vertinamas plokštės aukščio koeficientas, nebuvo peržengiama maksimali leistina šio koeficiento riba. Betono stipris varijuoja nuo 15,38 iki 41,11 MPa ir visų bandymų plokštės buvo armuotos išilgine tempiama armatūra, kurių kiekis skerspjūvyje kinta nuo 0,32 iki 1,5 %. Vienose normose šis argumentas nevertinamas, o kitose ir vertinamas ir ribojamas, o šiuose eksperimentiniuose bandymuose nebuvo atvejų, kai armavimo koeficientas ρ_l viršijo 2 % ribą, todėl jo reikšmės skaičiavimuose naudojamos tokios, kokios buvo eksperimentiniuose bandymuose.

3.3 lentelė. Gelžbetoninių plokščių be skersinės armatūros eksperimentinių tyrimų duomenys

Autorius	Bandinys	d, mm	c, mm	f_{ck}, MPa	$\rho_l, \%$	$M/V, m$	V_{test}, kN
Kosinskij	-	130	250	19,38	1,5	0,125	392
	I	130	250	24	1,5	0,125	588
	IIB	130	250	15,38	1,5	0,125	490
	III	130	250	20,63	1,5	0,125	586
	IV	130	250	19,63	1,5	0,125	529
Kozickiego	-	130	250	20,75	1,02	0,250	255
	A	130	250	17,13	1,02	0,250	353
Pajak	VHP-1	164	400	20,93	1	0,250	441,3
	VHP-2	164	400	24,53	1	0,250	490,3
	VHO-1	149	400	22,47	1	0,250	343,2
	VHO-3	164	400	25,72	1	0,250	490,3
	VHO-4	159	400	28,31	1	0,250	539,4
	VHO-1A	156,5	400	41,11	1	0,250	588,4
	VHO-3A	154	400	28,42	1	0,250	441,3
	VHO-4A	156,5	400	38,04	1	0,250	539,4
Urbana	K-I-1,0	120	250	16,34	0,33	0,250	176,4
	K-II-1,1	120	250	24,43	0,33	0,250	215,6

K-III-1,2	120	250	24,08	0,33	0,250	254,8
KA-I-1,3	120	250	21,43	0,33	0,250	205,8
KA-II-1,4	120	250	26,83	0,33	0,250	230,3
KA-III-1,5	120	250	21,65	0,33	0,250	264,6
K-I-2,0	120	250	23,19	0,33	0,500	107,8
K-I-3,0	120	250	21,48	0,33	0,750	73,5
K-II-3,0	120	250	24,59	0,33	0,750	102,9
K-III-3,0	120	250	20,5	0,33	0,750	102,9

Dalis bandinių dėl savo geometrinių savybių nėra pasitaikantys realioje statyboje. Atliekant eksperimentus, bandiniai sumažinami, dėl didelių kaštų, apkrovą suteikiančio įrankio gabaritų, bei dėl to, kad bandinių laikomoji galia neviršytų naudojamo preso galios.

Visiems bandiniams taikomos ribos, nustatytos normose, kaip ir realiai projektuojamiems elementams.

3.2.1. Perdangos plokštės praspaudimo laikomosios galios reikšmių palyginimas

Eksperimentinių ir teorinių reikšmių palyginimas plokščių be skersinės armatūros vertinant lenkimo momento įtaką pateiktas 3.4 lentelėje.

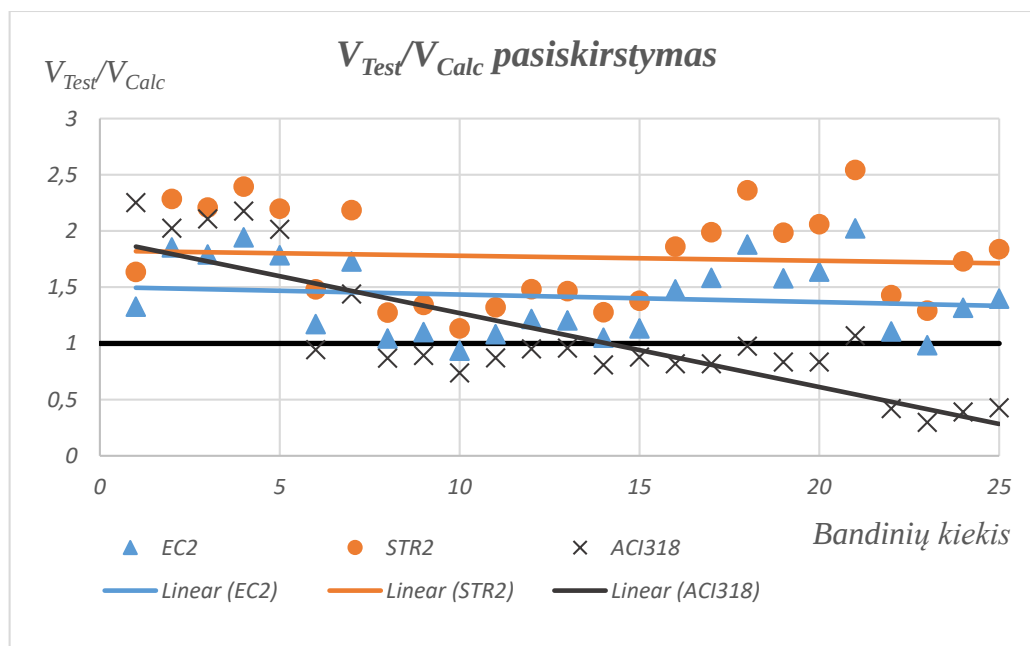
3.4 lentelė. Bandinių be skersinės armatūros praspaudimo laikomosios galios lyginimas su apskaičiuotomis reikšmėmis

V_{test}, kN	$V_{calc, EC2}, kN$	$V_{calc, STR2}, kN$	$V_{calc, ACI318}, kN$	$V_{test}/V_{calc}, EC2$	$V_{test}/V_{calc}, STR2$	$V_{test}/V_{calc}, ACI318$
392	295,34	239,59	173,98	1,33	1,64	2,25
588	317,16	257,29	290,41	1,85	2,29	2,02
490	273,49	221,87	232,48	1,79	2,21	2,11
586	301,60	244,68	269,25	1,94	2,39	2,18
529	296,63	240,64	262,64	1,78	2,20	2,01
255	217,64	172,17	270,03	1,17	1,48	0,94
353	204,18	161,52	245,35	1,73	2,19	1,44
441,3	422,88	346,34	507,80	1,04	1,27	0,87
490,3	445,80	365,10	549,73	1,10	1,34	0,89
343,2	367,17	302,89	465,31	0,93	1,13	0,74
490,3	452,89	370,91	562,91	1,08	1,32	0,87
539,4	443,24	363,85	567,49	1,22	1,48	0,95
588,4	488,48	401,47	613,86	1,20	1,47	0,96
441,3	420,17	345,75	545,79	1,05	1,28	0,81
539,4	475,95	391,17	613,86	1,13	1,38	0,88
176,4	119,11	94,77	215,37	1,48	1,86	0,82
215,6	136,20	108,37	263,35	1,58	1,99	0,82

254,8	135,55	107,85	261,45	1,88	2,36	0,97
205,8	130,33	103,70	246,65	1,58	1,98	0,83
230,3	140,50	111,79	275,98	1,64	2,06	0,83
264,6	130,79	104,06	247,91	2,02	2,54	1,07
107,8	97,50	75,39	256,58	1,11	1,43	0,42
73,5	74,77	56,89	246,93	0,98	1,29	0,30
102,9	78,17	59,48	264,21	1,32	1,73	0,39
102,9	73,57	55,98	241,24	1,40	1,84	0,43

3.4 lentelėje pateikti rezultatai rodo, kad beveik visais atvejais eksperimentinė plokštės praspaudžiamoji galia didesnė nei apskaičiuotoji. Galima teigti, jog kuriant skaičiavimo modelius, siekiama įvesti dalinio patikimumo (atsargos) koeficientus, kurie sumažintų skaičiuojamąją laikomąją galią ir konstrukcijos atlaikomoji galia būtų gaunama mažesnė nei ši konstrukcija atlaikytų realiomis eksploataavimo sąlygomis. Tačiau skaičiuojant pagal ACI318 normose pateiktą modelį, gaunama, kad didžioji dalis apskaičiuotų reikšmių yra didesnės už gautas atlikus eksperimentinius bandymus. Taip yra todėl, jog šiose normose nėra vertinamas koeficientas β , kuris tiesiogiai mažina apskaičiuotą praspaudimo laikomąją galią (žr. (1.3) ir (1.7) formules) kitose analizuojamų normų pateiktuose praspaudimo laikomosios galios skaičiavimo modeliuose. Iš eksperimentinių tyrimų gautų rezultatų apskaičiuotosios koeficiento β reikšmės pateiktos D priede. Koeficiento β reikšmės apskaičiuotos pagal EC2 normose pateiktą metodiką, pagal eksperimentinių tyrimų duomenis, reikšmė varijuoja 1,28-2,8 ribose, pagal STR 2 – 1,34-3,11 ribose.

Laikomosios galios pasiskirstymas tarp eksperimentinių ir apskaičiuotųjų reikšmių, pavaizduotas 3.9 paveiksle.



3.9 pav. Tiriamų plokščių praspaudimo laikomosios galios pasiskirstymas, taikant skirtingose projektavimo normose pateiktas praspaudimo skaičiavimo metodikas

Pateiktame grafike matomas didelis santykinių reikšmių išsibarstymas. Pastebima, kad atliktų skaičiavimų V_{test}/V_{calc} santykio aritmetinis vidurkis visiems skaičiavimo modeliams viršija ribą lygią 1,0. Visose projektavimo normose skaičiavimo modeliai turi paklaidas, tačiau visų modelių paklaidos sudaromos siekiant apsidrausti. Pagal gautas reikšmes teigiama, kad didžiausia atsarga gaunama skaičiuojant pagal STR normose norodytą modelį, kadangi, apskaičiavus pagal šį modelį gaunamas didžiausias aritmetinis vidurkis – apie 1,7, kuris kinta nežymiai ir tai reiškia, kad praspaudimo laikomoji galia, gauta eksperimentiškai, vidutiniškai bus 70 % didesnė nei apskaičiuota teoriškai. Skaičiuojant praspaudimo laikomąją galią, mažesnė atsarga gaunama pagal EC2 normose pateiktą praspaudimo modelį (apie 40 %). Pastebima, kad skaičiuojant pagal ACI318 normose pateiktą praspaudimo modelį, paklaidos reikšmė sparčiai kinta – nuo 1,8 iki 0,3. Tai reiškia, kad vienu atveju gaunama 80 % atsarga, kitu – gaunama, kad konstrukcijos apskaičiuotoji laikomoji galia, tesiekia vos 30 % konstrukcijos realios praspaudimo laikomosios galios.

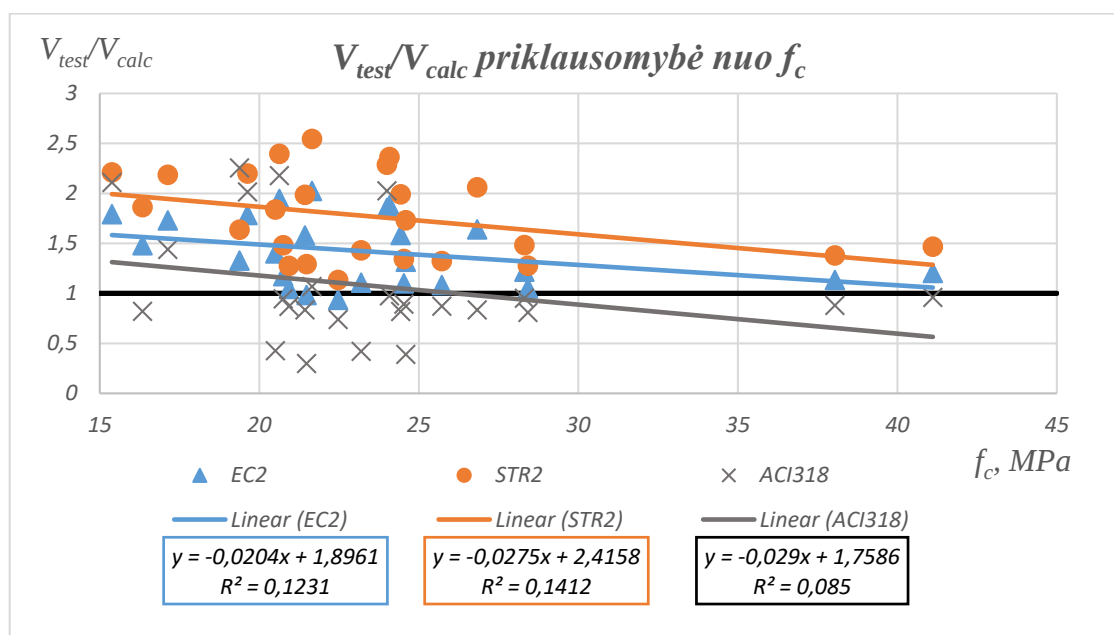
3.3. Gelžbetoninių plokščių praspaudimo laikomosios galios regresinė analizė, kai eksperimentuose vertinamas lenkimo momentas

Regresinė analizė atliekama, siekiant nustatyti, kokią įtaką daro atskiri plokštės praspaudimo funkcijos argumentai plokštės praspaudimo laikomajai galiai. Regresinė analizė leidžia prognozuoti V_{test}/V_{calc} santykio tikslumą.

Regresinei analizei atlikti naudojami 3.3 ir 3.4 lentelėse pateikti eksperimentinių tyrimų duomenys.

3.3.1. Tikslumo priklausomybė nuo betono stiprio f_c

Skirtingų normų plokštės praspaudimo laikomosios galios apskaičiavimo modelių regresinė analizė V_{test}/V_{calc} santykiui priklausomai nuo plokštės betono stiprio grafiškai pateikiama 3.10 paveiksle. Grafike nurodomos skirtingose projektavimo normose pateiktų praspaudimo skaičiavimo modelių regresinės analizės lygtys ir determinacijos koeficientai.



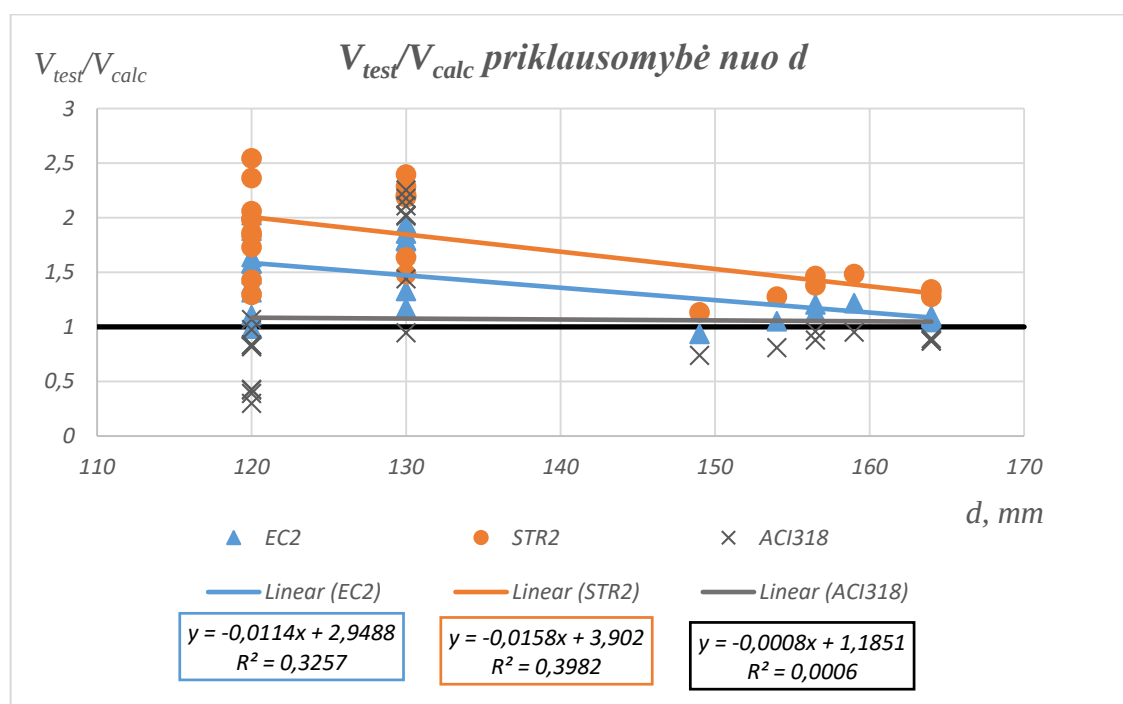
3.10 pav. Eksperimentų metu gautų ir apskaičiuotų praspaudimo laikomosios galios santykio reikšmių priklausomybė nuo plokštės betono stiprio

3.10 paveiksle pateiktas V_{test}/V_{calc} reikšmių išsibarstymas priklausomai nuo betono stiprio f_c reikšmės. Taip pat grafike pateiktos regresinės analizės lygtys, kuriose labai svarbus yra laisvasis narys, kuris nusako modelio paklaidą. Matoma, kad didžiausia laisvojo nario reikšmė

yra STR2 normose pateiktam modeliui – 2,42. Tai reiškia, kad vidutiniškai plokštės tikroji praspaudimo laikomoji galia 142 % bus didesnė už teoriškai apskaičiuotą pagal skaičiavimo modelį. Mažiausia paklaida gaunama skaičiuojant pagal EC2 normose pateikto plokštės praspaudimo laikomosios galios skaičiavimo modelį – 90 %. Pagal tiesės koeficiento x neigiamą reikšmę, sprendžiama, kad didėjant betono stipriui f_c – modelio paklaida mažėja. Grafike pateiktas determinacijos koeficientas R^2 , kuris visiems modeliams yra labai mažas, todėl galima teigti, kad V_{test}/V_{calc} santykis nėra tiesiškai priklausomas nuo betono stiprio f_c reikšmės.

3.3.2. Tikslumo priklausomybė nuo plokštės naudingojo aukščio d

Skirtingų normų plokštės praspaudimo laikomosios galios apskaičiavimo modelių regresinė analizė V_{test}/V_{calc} santykiui priklausomai nuo plokštės naudingojo aukščio grafiškai pateikiama 3.11 paveiksle. Grafike nurodomos skirtingose projektavimo normose pateiktų praspaudimo skaičiavimo modelių regresinės analizės lygtys ir determinacijos koeficientai.



3.11 pav. Eksperimentų metu gautų ir apskaičiuotų praspaudimo laikomosios galios santykio reikšmių priklausomybė nuo plokštės naudingojo aukščio

3.11 paveiksle pateiktas V_{test}/V_{calc} reikšmių išsibarstymas priklausomai nuo plokštės naudingojo aukščio d reikšmės. Taip pat grafike pateiktos regresinės analizės lygtys, kuriose labai svarbus yra laisvasis narys, kuris nusako modelio paklaidą. Matoma, kad didžiausia

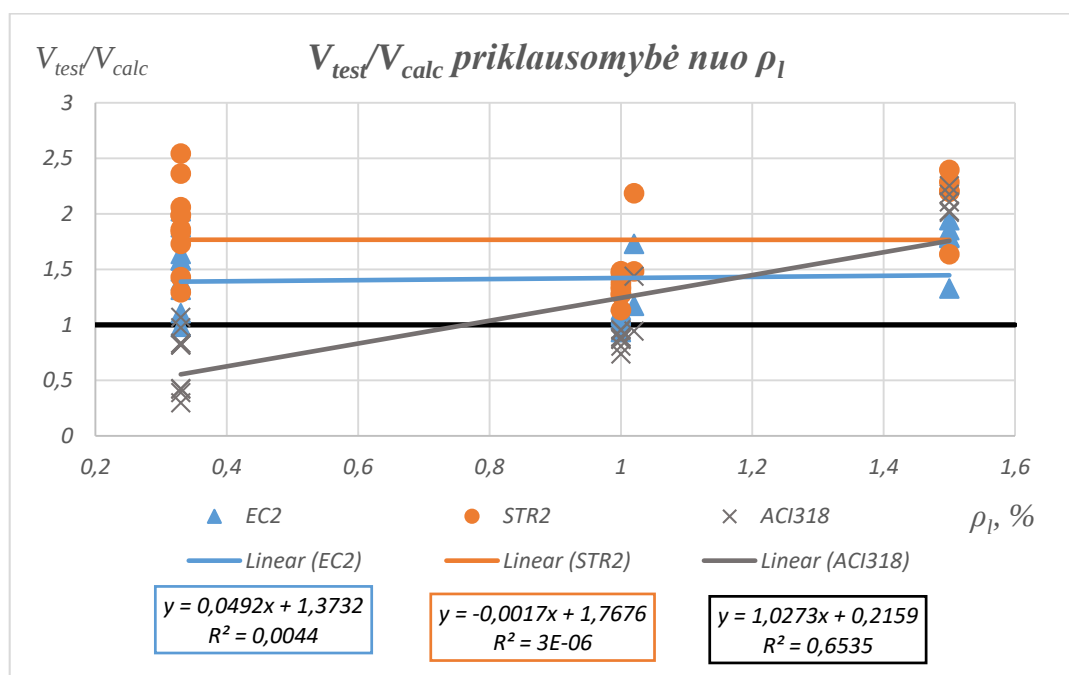
laisvojo nario reikšmė yra EC2 ir STR2 normose pateiktiems modeliams – atitinkamai 2,95 ir 3,9. Tai reiškia, kad vidutiniškai plokštės tikroji praspaudimo laikomoji galia 195 % (EC2) ir 290 % (STR2) bus didesnė už teoriškai apskaičiuotą pagal skaičiavimo modelį. Mažiausia paklaida gaunama skaičiuojant pagal ACI318 normose pateikto plokštės praspaudimo laikomosios galios skaičiavimo modelį – 19 %. Pagal tiesės koeficiento x neigiamą reikšmę, sprendžiama, kad didėjant plokštės naudingajam aukščiui d – modelio paklaida mažėja. Grafike pateiktas determinacijos koeficientas R^2 , kurio reikšmės 0,33 (EC2), 0,4 (STR2) ir 0 (ACI318). Taigi daroma išvada kad V_{test}/V_{calc} santykis yra tiesiškai nemažai priklausomas nuo plokštės naudingojo aukčio d reikšmės skaičiuojant pagal EC2 ir STR2 normose pateiktus praspaudimo skaičiavimo modelius.

3.3.3. Tikslumo priklausomybė nuo tempiamos plokštės zonos armavimo koeficiento ρ_l

Skirtingų normų plokštės praspaudimo laikomosios galios apskaičiavimo modelių regresinė analizė V_{test}/V_{calc} santykiui priklausomai nuo tempiamos plokštės zonos armavimo koeficiento grafiškai pateikiama 3.12 paveiksle. Grafike nurodomos skirtingose projektavimo normose pateiktų praspaudimo skaičiavimo modelių regresinės analizės lygtys ir determinacijos koeficientai.

3.12 paveiksle pateiktas V_{test}/V_{calc} reikšmių išsibarstymas priklausomai nuo tempiamos plokštės zonos armavimo koeficiento ρ_l reikšmės. Taip pat grafike pateiktos regresinės analizės lygtys, kuriose labai svarbus yra laisvasis narys, kuris nusako modelio paklaidą. Matoma, kad didžiausia laisvojo nario reikšmė yra STR2 normose pateiktam modeliui – 1,77. Tai reiškia, kad vidutiniškai plokštės tikroji praspaudimo laikomoji galia 77 % bus didesnė už teoriškai apskaičiuotą pagal skaičiavimo modelį. Mažiausia paklaida gaunama skaičiuojant pagal ACI318 normose pateikto plokštės praspaudimo laikomosios galios skaičiavimo modelį – 22 %. Pabrėžtina, kad praspaudimo laikomosios galios skaičiavimo modelyje, pateiktame ACI318 projektavimo normose, koeficientas ρ_l nevertinamas. Pagal tiesės koeficiento x neigiamą reikšmę, sprendžiama, kad didėjant plokštės tempiamos zonos armavimo koeficientui ρ_l – modelio paklaida mažėja STR2 normose pateiktam praspaudimo skaičiavimo modeliui, o pagal EC2 ir ACI318 normose pateiktus modelius, matoma, kad didėjant ρ_l reikšmei – modelio paklaida didėja. Grafike pateiktas determinacijos koeficientas R^2 , kuris visiems modeliams yra labai mažas, išskyrus skaičiuojant pagal ACI318 (0,65) normose pateiktą modelį todėl galima teigti, kad V_{test}/V_{calc} santykis nėra tiesiškai priklausomas

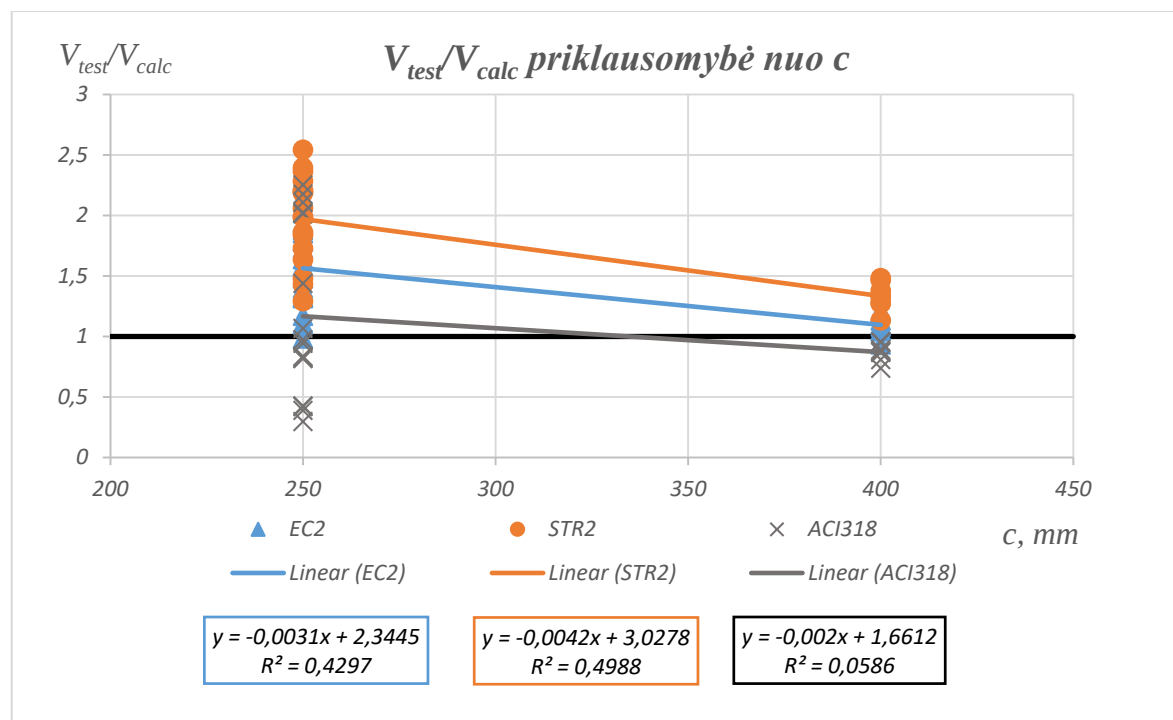
nuo plokštės tempiamos zonos armavimo koeficiento reikšmės skičiuojant pagal – EC2 ir STR2 pateiktus praspaudimo skaičiavimo modelius. Teigiama, kad skaičiuojant pagal ACI318 modelį, laikomoji galia nepriklauso nuo armavimo koeficiento, nes skaičiavimuose jis nėra vertinamas, bet atlikus eksperimentus, matoma, kad armavimo koeficientas turi nemažą įtaką praspaudimo laikomajai galiai.



3.12 pav. Eksperimentų metu gautų ir apskaičiuotų praspaudimo laikomosios galios santykio reikšmių priklausomybė nuo plokštės išilginio armavimo koeficiento

3.3.4. Tikslumo priklausomybė nuo kolonos kraštinės ilgio c

Skirtingų normų plokštės praspaudimo laikomosios galios apskaičiavimo modelių regresinė analizė V_{test}/V_{calc} santykiui priklausomai nuo kolonos kraštinės ilgio grafiškai pateikiama 3.13 paveiksle. Grafike nurodomos skirtingose projektavimo normose pateiktų praspaudimo skaičiavimo modelių regresinės analizės lygtys ir determinacijos koeficientai.



3.13 pav. Eksperimentų metu gautų ir apskaičiuotų praspaudimo laikomosios galios santykio reikšmių priklausomybė nuo kolonos kraštinės ilgio

3.13 paveiksle pateiktas V_{test}/V_{calc} reikšmių išsibarstymas priklausomai nuo kolonos kraštinės ilgio c reikšmės. Taip pat grafike pateiktos regresinės analizės lygtys, kuriose labai svarbus yra laisvasis narys, kuris nusako modelio paklaidą. Matoma, kad didžiausia laisvojo nario reikšmė yra STR2 normose pateiktam modeliui – 3,03. Tai reiškia, kad vidutiniškai plokštės tikroji praspaudimo laikomoji galia 203 % bus didesnė už teoriškai apskaičiuotą pagal skaičiavimo modelį. Mažiausia paklaida gaunama skaičiuojant pagal EC2 normose pateikto plokštės praspaudimo laikomosios galios skaičiavimo modelį – 134%. Pagal tiesės koeficiento x neigiamą reikšmę, sprendžiama, kad didėjant kolonos kraštinės ilgiui c – modelio paklaida mažėja. Grafike pateiktas determinacijos koeficientas R^2 , kuris EC2 ir STR2 normose pateiktiems modeliams yra 0,43 ir 0,5, todėl galima teigti, kad V_{test}/V_{calc} santykis pakankamai priklausomas nuo kolonos kraštinės ilgio c reikšmės.

3.3.5. Sisteminės ir atsitiktinės modelių paklaidos

Atlikus praspaudimo skaičiavimo modelių teorinių ir eksperimentinių reikšmių palyginimus, nustatyta, kad modelių sisteminės ir atsitiktinės paklaidos visais atvejais yra skirtingos (reikšmės pateiktos 3.5 lentelėje). Kaip matyti iš lentelės, pats tiksliausias skaičiavimo modelis tiek vertinant lenkimo momento įtaką skaičiavimuose, tiek – ne, yra EC2

normose pateiktas modelis. EC2 modelio sisteminė paklaida, nevertinant lenkimo momento įtakos yra $\mu_{\Delta R, EC2} = 1,31$, o vertinant – $\mu_{\Delta R, EC2} = 1,41$. ženkliai skiriasi ir atsitiktinės paklaidos, nevertinant lenkimo momento M įtakos – 0,9. Mažiau tikslesni metodai yra STR 2 ir ACI318. Pažymėtina, kad lyginant teorines ir eksperimentines reikšmes, nevertinant lenkimo momento ACI318 modelio tikslumas yra panašus į STR 2 ($\mu_{\Delta R, ACI318} = 1,43$, $\sigma_{\Delta R, ACI318} = 0,26$ bei $\mu_{\Delta R, STR 2} = 1,62$, $\sigma_{\Delta R, STR 2} = 0,24$).

Palyginus STR 2 ir ACI318 skaičiavimo duomenis vertinant M , pažymėtina, kad ACI318 modelio sisteminė paklaida gaunama netgi mažesnė už STR 2 ($\mu_{\Delta R, ACI318} = 1,07$ ir $\mu_{\Delta R, STR 2} = 1,77$), tačiau ACI318 normų skaičiavimo metodo atsitiktinė paklaida yra ženkliai didesnė ($\sigma_{\Delta R, ACI318} = 0,58$), tiek už STR 2 ($\sigma_{\Delta R, STR 2} = 0,43$), tiek už EC2 ($\sigma_{\Delta R, EC2} = 0,34$). Todėl reikia atkreipti dėmesį į didelį lenkimo momento ir skersinės jėgos antykį M/V , skaičiuojant praspaudimo laikomąją galią pagal ACI318.

3.5 lentelė. Atsitiktinės ir sisteminės paklaidos

Nevertinama M/V įtaka, imtis $n = 65$			
	EC2	STR 2	ACI318
Sisteminė paklaida $\mu_{\Delta R}$	1,36	1,61	1,43
Atsitiktinė paklaida $\sigma_{\Delta R}$	0,19	0,24	0,26
Vertinama M/V įtaka, imtis $n = 25$			
	EC2	STR 2	ACI318
Sisteminė paklaida $\mu_{\Delta R}$	1,41	1,77	1,07
Atsitiktinė paklaida $\sigma_{\Delta R}$	0,34	0,43	0,58

3.4. Trečiojo skyriaus išvados

Atlikus eksperimentinių ir teorinių praspaudimo stiprio laikomosios galios reikšmių palyginimą, kuriose nevertinama lenkimo momento įtaka, nustatyta, kad modelių, kurie nevertina lenkimo momento įtakos, sisteminė paklaida yra 1,43, o atsitiktinė paklaida 0,26. Atlikus regresinę analizę, nustatyta, kad betono stipris neturi įtakos sisteminės paklaidos dydžiui. Modelio sisteminė paklaida mažėja, didėjant plokštės naudingajam aukščiui d .

Atlikus eksperimentinių ir teorinių praspaudimo stiprio laikomosios galios reikšmių palyginimą, kuriose vertinama lenkimo momento įtaka, nustatyta, kad modelių, kurie vertina lenkimo momento įtaką, sisteminė paklaida yra EC2 (1,41) ir STR 2 (1,77), atsitiktinė – EC2 (0,34) ir STR (0,43). Atlikus regresinę analizę, nustatyta, kad didėjant betono stipriui f_c ir plokštės naudingajam aukščiui d , modelių sisteminė paklaida mažėja.

Eksperimentinių tyrimų analizė rodo, kad modeliai nevertinantys M/V santykio įtakos yra tikslesni ($\mu_{\Delta R, ACI318} = 1,43$, $\sigma_{\Delta R, ACI318} = 0,26$) už modelius, kurie vertina M/V santykio įtaką: $\mu_{\Delta R, EC2} = 1,41$, $\sigma_{\Delta R, EC2} = 0,43$ ir $\mu_{\Delta R, STR2} = 1,77$, $\sigma_{\Delta R, STR2} = 0,43$).

BENDROSIOS IŠVADOS IR REKOMENDACIJOS

1. Atlikus literatūros šaltinių apžvalgą, nustatyta, kad lenkimo momento įtaka praspaudimo laikomajai galiai vertinama skirtingai: vienoje normose ji vertinama, kitose – ne.

2. Atlikus lyginamąją analizę nustatyta, kad projektavimo normose iš esmės vertinami tie patys veiksniai (f_c , d , c , ρ_l), tačiau kritinis praspaudimo perimetras apibrėžiamas skirtingai. Be to, projektavimo normose, kuriose vertinamas M/V santykis, kampinei kolonai jis vertinamas kitaip nei kraštinei ar vidinei kolonai. Kampineje kolonoje M/V santykis skaičiavimuose nevertinamas visai, o kraštinei ir vidinei kolonomis skaičiavimuose jis yra neatskiriamas nuo naudingojo aukščio d .

3. Atlikus parametrinę analizę, nustatyta, kad svarbiausi veiksniai praspaudimo stipriui metode, nevertinančiame lenkimo momento, yra plokštės betono stipris f_c ir plokštės naudingasis aukštis d , kiti veiksniai (c ir ρ_l) yra mažiau svarbūs.

4. Atlikus koeficiento β parametrinę analizę, nustatyta, kad koeficiento reikšmei didžiausią įtaką turi lenkimo momento ir skersinės jėgos santykio M/V reikšmė. Net ir didėjant kolonos kraštinės ilgiui c ir plokštės naudingajam aukščiui d , koeficiento β reikšmė mažėja, tačiau, esant didelei M/V reikšmei, koeficiento β reikšmės gaunamos didesnės nei pateiktos normose: vidinei kolonai nuo 1,5-2,44, kraštinei kolonai – 1,89-2,28.

5. Atlikus praspaudimo skaičiavimo modelių laikomosios galios funkcijos argumentų ties vidine kolona statistinę analizę, nustatyta, kad reikšmingiausi nariai yra šie: a) modeliuose, kuriuose vertinama lenkimo momento įtaka, esant $M/V = 0,052 - f_c$ (apie 48 %), d (apie 45 %), kitų argumentų įtaka maža vos 1-2 %. Esant $M/V = 0,41 - d$ (apie 40 %), f_c (apie 30%), M/V (apie 27 %), kolonos kraštinės ilgio c įtaka praspaudimo laikomajai galiai yra apie 2 %. Modeliuose, kuriuose nevertinama lenkimo momento įtaka, svarbiausi funkcijos argumentai yra betono stipris f_c (apie 50 %) ir plokštės naudingasis aukštis d (apie 45 %).

6. Atlikus statistinę analizę nustatyta, kad projektavimo normose, vertinančiose M įtaką, koeficientas β yra priklausomas nuo naudingojo ploštės aukščio d bei lenkimo momento, ir skersinės jėgos santykio M/V . Pažymėtina, kad pagal reikšmingumą tiek M/V , tiek d argumento įtaka yra skirtinga: didėjant d , M/V įtaka mažėja, ir atvirkščiai.

7. Atlikus eksperimentinių ir teorinių praspaudimo stiprio laikomosios galios reikšmių palyginimą nustatyta, kad projektavimo normose, kuriose nevertinama lenkimo momento įtaka, sisteminė paklaida yra 1,43, o atsitiktinė paklaida 0,26. Atlikus regresinę analizę, nustatyta, kad betono stipris neturi įtakos sisteminės paklaidos dydžiui. Modelio sisteminė paklaida mažėja, didėjant plokštės naudingajam aukščiui d .

8. Atlikus eksperimentinių ir teorinių praspaudimo stiprio laikomosios galios reikšmių palyginimą, nustatyta, kad projektavimo normose, kuriose vertinama lenkimo momento įtaka, sisteminė paklaida yra: EC2 –1,41 ir STR 2 –1,77, atsitiktinė – EC2 -0,34 ir STR –0,43. Atlikus regresinę analizę, nustatyta, kad didėjant betono stipriui f_c ir plokštės naudingajam aukščiui d , modelių sisteminė paklaida mažėja.

9. Eksperimentinių tyrimų analizė rodo, kad modeliai nevertinantys lenkimo momento M įtakos yra tikslesni ($\mu_{\Delta R, ACI318} = 1,43$, $\sigma_{\Delta R, ACI318} = 0,26$) už modelius, kurie vertina lenkimo momento įtaką ($\mu_{\Delta R, EC2} = 1,41$, $\sigma_{\Delta R, EC2} = 0,43$ ir $\mu_{\Delta R, STR 2} = 1,77$, $\sigma_{\Delta R, STR 2} = 0,43$). Tikėtina, kad tai ir gali būti pagrindinė priežastis, kodėl ACI318 normose nevertinamas lenkimo momentas.

10. Projektuojant praspaudimo stiprį pagal EC2 ir STR 2, rekomenduojama atkreipti dėmesį į tai, kad skaičiuojant lenkimo momento įtaką pagal (1.4) formulę, koeficiento β reikšmė prie tam tikrų apkrovų derinių gaunama didesnė nei pateikta maksimali reikšmė projektavimo normose. Ši koeficiento β reikšmė plokštės praspaudimo laikomajai galiai turi didelę įtaką projektuojant praspaudimo mazgą.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

- ACI Committee 318: Building Code Requirements for Reinforced Concrete. 1995. American Concrete institute, Detroit. 77 p.
- Bačinskas, A.; Janilionis, V.; Jokimaitis, P. 2001. *Tikimybių teorija ir statistika. Praktikumai*. Kaunas: Technologija, 159 p.
- Barzdžiukienė L. D. ir kt. 2005. *Baigiamasis studijų darbas. Kalbininkų patarimai: teorija ir tvarkyba*. 2-asis pataisytas ir papildytas leidimas. Vilnius: Technika, 148 p.
- Brestrup, M. W.; Nielsen, M. P.; Jensen, B. C.; Bach, F. 1976. Axisymmetric punching of plain and reinforced concrete, *Report R75*. Structures Research Laboratory, Technical University of Denmark, Copenhagen. 123 p.
- Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08) and Commentary. Reported by ACI Committee 318
- Dominik Kueres, Carsten Siburg, Martin Herbrand, Martin Classen, Josef Hegger. Uniform Design Method for punching shear in flat slabs and column bases
- Einpaul, J.; Fernández, R.M.; Muttoni, A. 2015. Influence of moment redistribution and compressive membrane action on punching strength of flat slabs, *Engineering Structure* 86:43–57
- Eurokodas 2. Gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas. 1-1 dalis. Bendrosios ir pastatų taisyklės
- Fernández, R.M.; Mirzaei, Y.; Muttoni, A. 2013. Post-punching behavior of flat slabs, *ACI Structure* 110:801–12.
- Georgopoulos, T. 1998. Durchstanzlast und Durchstanzwinkel punktförmig gestützter Stahlbetonplatten ohne Schubbewehrung, *Bauingenieur* 64: 187–191.
- Hallgren, M. 1996. Punching shear capacity of reinforced high strength concrete slabs. Doctoral Thesis, KTH, Stockholm, TRITA-BNK. Bull. 23, Royal Institute of Technology. 206 p.
- Kaulakienė A. ir kt. 2007. *Kalbininkų patarimai studentams: teorija ir praktika*. Vilnius: Technika, 149 p.
- Kinuen, S.; Nylander, B. 1960. Punching of concrete slabs without shear reinforcement. Transactions No. 158, Royal Institute of Technology, Stockholm. 112 p.
- Menetrey, Ph. 2002. Synthesis of punching failure in reinforced concrete, *Cement & Concrete Composites*, 24: 497–507.

Moe, J. 1961. Shearing strength of Reinforced Concrete Slabs and Footings Under Concentrating Loads. Portland Cement Association, Bull. D. 47, Skokie, Illinois, April. 133 p.

Rasha T.S. Mabrouk, Amr Bakr, Hany Abdalla. Effect of flexural and shear reinforcement on the punching behavior of reinforced concrete flat slabs

STR 2.05.05:2005 statybos techninis reglamentas: Betoninių ir gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas. Lietuvos Respublikos Aplinkos Ministerija, 2005, 123 p.

Šalna R. Dispersinio armavimo įtaka gelžbetoninių besijų perdangos plokščių praspaudimui. Kaunas: Lithuanian Academic Libraries Network (LABT), 2008.

Theodorakopoulos, D. D.; Swamy, R. N. 1992. Contribution of steel fibers strength characteristics of light weight concrete slabs-column connections failing in punching shear, *American Concrete Institute* 4: 425–32.

Theodorakopoulos, D. D.; Swamy, R. N. 2002. Ultimate punching shear strength analysis of slab-column connection, *Cement & Concrete Composites* 24: 509–521.

PRIEDAI

PRIEDAS A

Statistinės analizės duomenys

Vidinės kolonos praspaudimo modelių argumentų dalinės išvestinės pagal EC2

$$V(f, r, d, a, s) := \frac{\left(0.18 \cdot (f \cdot r \cdot 100)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}}\right)\right) \cdot ((2 \cdot a + 2 \cdot a + 2 \cdot \pi \cdot 2 \cdot d) \cdot d)}{1 + 0.6 \cdot s \cdot \frac{(2 \cdot a + 2 \cdot a + 2 \cdot \pi \cdot 2 \cdot d)}{\frac{a^2}{2} + a \cdot a + 4 \cdot a \cdot d + 16 \cdot d^2 + 2 \cdot \pi \cdot d \cdot a}}$$

$$\frac{d}{df} V(f, r, d, a, s) \rightarrow \frac{6.0 \cdot d \cdot r \cdot \left(10 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{1}{d}} + 1\right) \cdot (4 \cdot a + 12.566370614359172954 \cdot d)}{\left(\frac{0.6 \cdot s \cdot (4 \cdot a + 12.566370614359172954 \cdot d)}{\frac{3 \cdot a^2}{2} + 16 \cdot d^2 + 10.283185307179586477 \cdot a \cdot d} + 1\right) \cdot (100 \cdot f \cdot r)^{\frac{2}{3}}}$$

$$\frac{d}{dr} V(f, r, d, a, s) \rightarrow \frac{6.0 \cdot d \cdot f \cdot \left(10 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{1}{d}} + 1\right) \cdot (4 \cdot a + 12.566370614359172954 \cdot d)}{\left(\frac{0.6 \cdot s \cdot (4 \cdot a + 12.566370614359172954 \cdot d)}{\frac{3 \cdot a^2}{2} + 16 \cdot d^2 + 10.283185307179586477 \cdot a \cdot d} + 1\right) \cdot (100 \cdot f \cdot r)^{\frac{2}{3}}}$$

$$\frac{d}{dd} V(f, r, d, a, s) \rightarrow \frac{0.18 \cdot \left(10 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{1}{d}} + 1\right) \cdot (4 \cdot a + 12.566370614359172954 \cdot d) \cdot \left(\frac{0.6 \cdot s \cdot (4 \cdot a + 12.566370614359172954 \cdot d)}{\frac{3 \cdot a^2}{2} + 16 \cdot d^2 + 10.283185307179586477 \cdot a \cdot d} + 1\right)}{\dots}$$

$$\frac{d}{da} V(f, r, d, a, s) \rightarrow \frac{0.72 \cdot d \cdot \left(10 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{1}{d} + 1}\right) \cdot (100 \cdot f \cdot r)^{\frac{1}{3}}}{\frac{0.6 \cdot s \cdot (4 \cdot a + 12.566370614359172954 \cdot d)}{\frac{3 \cdot a^2}{2} + 16 \cdot d^2 + 10.283185307179586477 \cdot a \cdot d} + 1} - \frac{0.18 \cdot d \cdot \left(10 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{1}{d} + 1}\right) \cdot (100 \cdot f \cdot r)^{\frac{1}{3}}}{\left(\frac{0.6 \cdot s \cdot (4 \cdot a + 12.566370614359172954 \cdot d)}{\frac{3 \cdot a^2}{2} + 16 \cdot d^2 + 10.283185307179586477 \cdot a \cdot d} + 1\right)^2 \cdot \left(\frac{3 \cdot a^2}{2} + 16 \cdot d^2 + 10.283185307179586477 \cdot a \cdot d\right)} \dots$$

$$\frac{d}{ds} V(f, r, d, a, s) \rightarrow - \frac{0.108 \cdot d \cdot \left(10 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{1}{d} + 1}\right) \cdot (4 \cdot a + 12.566370614359172954 \cdot d)}{\left(\frac{0.6 \cdot s \cdot (4 \cdot a + 12.566370614359172954 \cdot d)}{\frac{3 \cdot a^2}{2} + 16 \cdot d^2 + 10.283185307179586477 \cdot a \cdot d} + 1\right)^2 \cdot \left(\frac{3 \cdot a^2}{2} + 16 \cdot d^2 + 10.283185307179586477 \cdot a \cdot d\right)} \dots$$

Kraštinės kolonos praspaudimo modelių argumentų dalinės išvestinės pagal EC2

$$V(f, r, d, a, s) := \frac{\left(0.18 \cdot (f \cdot r \cdot 100)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}}\right)\right) \cdot ((3 \cdot a + \pi \cdot 2 \cdot d) \cdot d)}{1 + 0.6 \cdot s \cdot \frac{(3 \cdot a + \pi \cdot 2 \cdot d)}{\frac{a^2}{4} + a \cdot a + 4 \cdot a \cdot d + 8 \cdot d^2 + \pi \cdot d \cdot a}}$$

$$\frac{d}{df} V(f, r, d, a, s) \rightarrow \frac{6.0 \cdot d \cdot r \cdot \left(10 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{1}{d} + 1}\right) \cdot (3 \cdot a + 6.2831853071795864769 \cdot d)}{\left(\frac{0.6 \cdot s \cdot (3 \cdot a + 6.2831853071795864769 \cdot d)}{\frac{5 \cdot a^2}{4} + 8 \cdot d^2 + 7.1415926535897932385 \cdot a \cdot d} + 1\right) \cdot (100 \cdot f \cdot r)^{\frac{2}{3}}}$$

$$\frac{d}{dr} V(f, r, d, a, s) \rightarrow \frac{6.0 \cdot d \cdot f \cdot \left(10 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{1}{d} + 1}\right) \cdot (3 \cdot a + 6.2831853071795864769 \cdot d)}{\left(\frac{0.6 \cdot s \cdot (3 \cdot a + 6.2831853071795864769 \cdot d)}{\frac{5 \cdot a^2}{4} + 8 \cdot d^2 + 7.1415926535897932385 \cdot a \cdot d} + 1\right) \cdot (100 \cdot f \cdot r)^{\frac{2}{3}}}$$

$$\frac{d}{dd} V(f, r, d, a, s) \rightarrow \frac{0.18 \cdot \left(10 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{1}{d}} + 1\right) \cdot (3 \cdot a + 6.2831853071795864769 \cdot d) \cdot (100 \cdot f \cdot r)}{\frac{0.6 \cdot s \cdot (3 \cdot a + 6.2831853071795864769 \cdot d)}{\frac{5 \cdot a^2}{4} + 8 \cdot d^2 + 7.1415926535897932385 \cdot a \cdot d} + 1} \dots$$

$$\frac{d}{da} V(f, r, d, a, s) \rightarrow \frac{0.54 \cdot d \cdot \left(10 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{1}{d}} + 1\right) \cdot (100 \cdot f \cdot r)^{\frac{1}{3}}}{\frac{0.6 \cdot s \cdot (3 \cdot a + 6.2831853071795864769 \cdot d)}{\frac{5 \cdot a^2}{4} + 8 \cdot d^2 + 7.1415926535897932385 \cdot a \cdot d} + 1} - \frac{0.18 \cdot d \cdot \left(10 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{1}{d}} + 1\right) \cdot (100 \cdot f \cdot r)^{\frac{1}{3}}}{\frac{0.6 \cdot s \cdot (3 \cdot a + 6.2831853071795864769 \cdot d)}{\frac{5 \cdot a^2}{4} + 8 \cdot d^2 + 7.1415926535897932385 \cdot a \cdot d} + 1} \dots$$

$$\frac{d}{ds} V(f, r, d, a, s) \rightarrow - \frac{0.108 \cdot d \cdot \left(10 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{1}{d}} + 1\right) \cdot (3 \cdot a + 6.2831853071795864769 \cdot d)}{\left(\frac{0.6 \cdot s \cdot (3 \cdot a + 6.2831853071795864769 \cdot d)}{\frac{5 \cdot a^2}{4} + 8 \cdot d^2 + 7.1415926535897932385 \cdot a \cdot d} + 1\right)^2 \cdot \left(\frac{5 \cdot a^2}{4} + 8 \cdot d^2 + 7.1415926535897932385 \cdot a \cdot d\right)} \dots$$

Kampinės kolonos praspaudimo modelių argumentų dalinės išvestinės pagal EC2

$$V(f, r, d, a) := \frac{\left(0.18 \cdot (f \cdot r \cdot 100)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}}\right)\right) \cdot ((2 \cdot a + \pi \cdot d) \cdot d)}{\frac{(2 \cdot a + \pi \cdot d)}{(a + \pi \cdot d)}}$$

$$\frac{d}{df} V(f, r, d, a) \rightarrow \frac{6.0 \cdot d \cdot r \cdot \left(10 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{1}{d}} + 1\right) \cdot (a + 3.1415926535897932385 \cdot d)}{(100 \cdot f \cdot r)^{\frac{2}{3}}}$$

$$\frac{d}{dr} V(f, r, d, a) \rightarrow \frac{6.0 \cdot d \cdot f \cdot \left(10 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{1}{d}} + 1\right) \cdot (a + 3.1415926535897932385 \cdot d)}{(100 \cdot f \cdot r)^{\frac{2}{3}}}$$

$$\frac{d}{dd} V(f, r, d, a) \rightarrow 0.56548667764616278293 \cdot d \cdot \left(10 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{1}{d}} + 1\right) \cdot (100 \cdot f \cdot r)^{\frac{1}{3}} + 0.1...$$

$$V(f, r, d, a) := \frac{\left(0.18 \cdot (f \cdot r \cdot 100)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}}\right)\right) \cdot ((2 \cdot a + \pi \cdot d) \cdot d)}{\frac{(2 \cdot a + \pi \cdot d)}{(1.5 \cdot d + \pi \cdot d)}}$$

$$\frac{d}{df} V(f, r, d, a) \rightarrow \frac{27.8495559215387594307 \cdot d^2 \cdot r \cdot \left(10 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{1}{d}} + 1\right)}{(100 \cdot f \cdot r)^{\frac{2}{3}}}$$

$$\frac{d}{dr} V(f, r, d, a) \rightarrow \frac{27.8495559215387594307 \cdot d^2 \cdot f \cdot \left(10 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{1}{d}} + 1\right)}{(100 \cdot f \cdot r)^{\frac{2}{3}}}$$

$$\frac{d}{dd} V(f, r, d, a) \rightarrow 1.67097335529232556584 \cdot d \cdot \left(10 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{1}{d}} + 1\right) \cdot (100 \cdot f \cdot r)^{\frac{1}{3}} - ...$$

$$\frac{d}{da} V(f, r, d, a) \rightarrow 0$$

Vidinės kolonos praspaudimo modelių argumentų dalinės išvestinės pagal
STR2.05.05:2005

$$V(f, r, d, a, s) := \frac{\left(0.18 \cdot (f \cdot r \cdot 100)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}}\right)\right) \cdot ((2 \cdot a + 2 \cdot a + 2 \cdot \pi \cdot 1.5 \cdot d) \cdot d)}{1 + 0.6 \cdot s \cdot \frac{(2 \cdot a + 2 \cdot a + 2 \cdot \pi \cdot 1.5 \cdot d)}{\frac{a^2}{2} + a \cdot a + 3 \cdot a \cdot d + 9 \cdot d^2 + 1.5 \cdot \pi \cdot d \cdot a}}$$

$$\frac{d}{df} V(f, r, d, a, s) \rightarrow \frac{6.0 \cdot d \cdot r \cdot (4 \cdot a + 9.4247779607693797154 \cdot d) \cdot \left(10 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{1}{d}} + 1\right)}{\left(\frac{0.6 \cdot s \cdot (4 \cdot a + 9.4247779607693797154 \cdot d)}{\frac{3 \cdot a^2}{2} + 9 \cdot d^2 + 7.7123889803846898577 \cdot a \cdot d} + 1\right) \cdot (100 \cdot f \cdot r)^{\frac{2}{3}}}$$

$$\frac{d}{dr} V(f, r, d, a, s) \rightarrow \frac{6.0 \cdot d \cdot f \cdot (4 \cdot a + 9.4247779607693797154 \cdot d) \cdot \left(10 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{1}{d}} + 1\right)}{\left(\frac{0.6 \cdot s \cdot (4 \cdot a + 9.4247779607693797154 \cdot d)}{\frac{3 \cdot a^2}{2} + 9 \cdot d^2 + 7.7123889803846898577 \cdot a \cdot d} + 1\right) \cdot (100 \cdot f \cdot r)^{\frac{2}{3}}}$$

$$\frac{d}{dd} V(f, r, d, a, s) \rightarrow \frac{1.6964600329384883488 \cdot d \cdot \left(10 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{1}{d}} + 1\right) \cdot (100 \cdot f \cdot r)^{\frac{1}{3}}}{\frac{0.6 \cdot s \cdot (4 \cdot a + 9.4247779607693797154 \cdot d)}{\frac{3 \cdot a^2}{2} + 9 \cdot d^2 + 7.7123889803846898577 \cdot a \cdot d} + 1} \dots$$

$$\frac{d}{da} V(f, r, d, a, s) \rightarrow \frac{0.72 \cdot d \cdot \left(10 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{1}{d}} + 1\right) \cdot (100 \cdot f \cdot r)^{\frac{1}{3}}}{\frac{0.6 \cdot s \cdot (4 \cdot a + 9.4247779607693797154 \cdot d)}{\frac{3 \cdot a^2}{2} + 9 \cdot d^2 + 7.7123889803846898577 \cdot a \cdot d} + 1} \dots$$

$$\frac{d}{ds} V(f, r, d, a, s) \rightarrow - \frac{0.108 \cdot d \cdot (4 \cdot a + 9.4247779607693797154 \cdot d)^2 \cdot \left(10 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{1}{d}} + 1\right)}{\left(\frac{0.6 \cdot s \cdot (4 \cdot a + 9.4247779607693797154 \cdot d)}{\frac{3 \cdot a^2}{2} + 9 \cdot d^2 + 7.7123889803846898577 \cdot a \cdot d} + 1\right)^2 \cdot \left(\frac{3 \cdot a^2}{2} + 9 \cdot d^2 + 7.7123889803846898577 \cdot a \cdot d\right)}$$

Kraštinės kolonos praspaudimo modelių argumentų dalinės išvestinės pagal STR2.05.05:2005

$$V(f, r, d, a, s) := \frac{\left(0.18 \cdot (f \cdot r \cdot 100)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}}\right)\right) \cdot ((3 \cdot a + \pi \cdot 1.5 \cdot d) \cdot d)}{1 + 0.6 \cdot s \cdot \frac{(3 \cdot a + \pi \cdot 1.5 \cdot d)}{\frac{a^2}{2} + a \cdot a + 3 \cdot a \cdot d + 4.5 \cdot d^2 + 0.75 \cdot \pi \cdot d \cdot a}}$$

$$\frac{d}{df} V(f, r, d, a, s) \rightarrow \frac{6.0 \cdot d \cdot r \cdot (3 \cdot a + 4.7123889803846898577 \cdot d) \cdot \left(10 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{1}{d}} + 1\right)}{\left(\frac{0.6 \cdot s \cdot (3 \cdot a + 4.7123889803846898577 \cdot d)}{\frac{3 \cdot a^2}{2} + 4.5 \cdot d^2 + 5.3561944901923449288 \cdot a \cdot d} + 1\right) \cdot (100 \cdot f \cdot r)^{\frac{2}{3}}}$$

$$\frac{d}{dr} V(f, r, d, a, s) \rightarrow \frac{6.0 \cdot d \cdot f \cdot (3 \cdot a + 4.7123889803846898577 \cdot d) \cdot \left(10 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{1}{d}} + 1\right)}{\left(\frac{0.6 \cdot s \cdot (3 \cdot a + 4.7123889803846898577 \cdot d)}{\frac{3 \cdot a^2}{2} + 4.5 \cdot d^2 + 5.3561944901923449288 \cdot a \cdot d} + 1\right) \cdot (100 \cdot f \cdot r)^{\frac{2}{3}}}$$

$$\frac{d}{dr} V(f, r, d, a) \rightarrow \frac{32.137166941154069573 \cdot d^2 \cdot f \cdot \left(10 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{1}{d}} + 1\right)}{(100 \cdot f \cdot r)^{\frac{2}{3}}}$$

$$\frac{d}{dd} V(f, r, d, a) \rightarrow 1.92823001646924417438 \cdot d \cdot \left(10 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{1}{d}} + 1\right) \cdot (100 \cdot f \cdot r)^{\frac{1}{3}} - \frac{4}{3} \dots$$

$$\frac{d}{da} V(f, r, d, a) \rightarrow 0$$

Vidinės kolonos praspaudimo modelių argumentų dalinės išvestinės pagal ACI318

$$V(f, f_i, d, a) := \sqrt{f} \cdot f_i \cdot (4 \cdot a + 2 \cdot \pi \cdot 0.5 \cdot d) \cdot d$$

$$\frac{d}{df} V(f, f_i, d, a) \rightarrow \frac{d \cdot f_i \cdot (4 \cdot a + 3.1415926535897932385 \cdot d)}{2 \cdot \sqrt{f}}$$

$$\frac{d}{dd} V(f, f_i, d, a) \rightarrow \sqrt{f} \cdot f_i \cdot (4 \cdot a + 3.1415926535897932385 \cdot d) + 3.1415926535897932385 \cdot f_i$$

$$\frac{d}{da} V(f, f_i, d, a) \rightarrow 4 \cdot d \cdot \sqrt{f} \cdot f_i$$

Kraštinės kolonos praspaudimo modelių argumentų dalinės išvestinės pagal ACI318

$$V(f, f_i, d, a) := \sqrt{f} \cdot f_i \cdot (3 \cdot a + \pi \cdot 0.5 \cdot d) \cdot d$$

$$\frac{d}{df} V(f, f_i, d, a) \rightarrow \frac{d \cdot f_i \cdot (3 \cdot a + 1.5707963267948966192 \cdot d)}{2 \cdot \sqrt{f}}$$

$$\frac{d}{dd} V(f, fi, d, a) \rightarrow \sqrt{f} \cdot fi \cdot (3 \cdot a + 1.5707963267948966192 \cdot d) + 1.5707963267...$$

$$\frac{d}{da} V(f, fi, d, a) \rightarrow 3 \cdot d \cdot \sqrt{f} \cdot fi$$

Kampinės kolonos praspaudimo modelių argumentų dalinės išvestinės pagal ACI318

$$V(f, fi, d, a) := \sqrt{f} \cdot fi \cdot (2 \cdot a + 0.5 \cdot \pi \cdot 0.5 \cdot d) \cdot d$$

$$\frac{d}{df} V(f, fi, d, a) \rightarrow \frac{d \cdot fi \cdot (2 \cdot a + 0.78539816339744830962 \cdot d)}{2 \cdot \sqrt{f}}$$

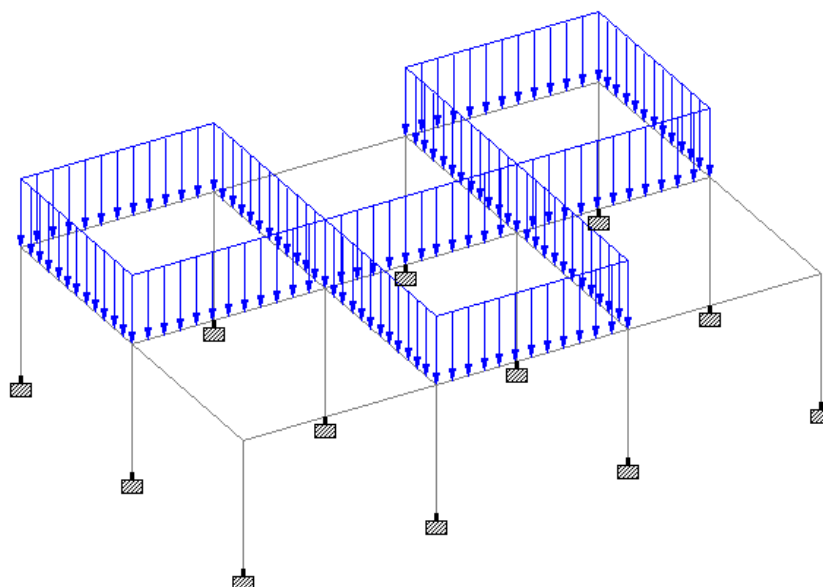
$$\frac{d}{dd} V(f, fi, d, a) \rightarrow \sqrt{f} \cdot fi \cdot (2 \cdot a + 0.78539816339744830962 \cdot d) + 0.78539816339...$$

$$\frac{d}{da} V(f, fi, d, a) \rightarrow 2 \cdot d \cdot \sqrt{f} \cdot fi$$

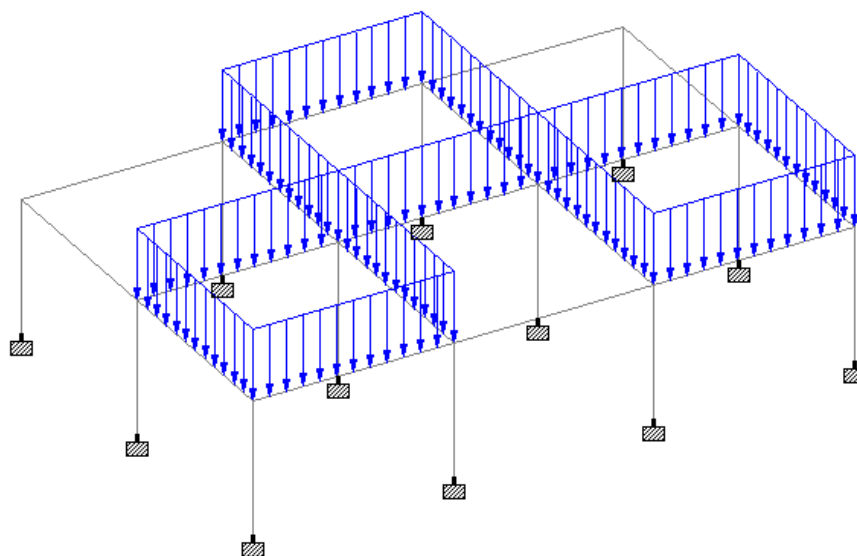
PRIEDAS B

Skaitinio modelio konstrukcijos apkrovimo variantai

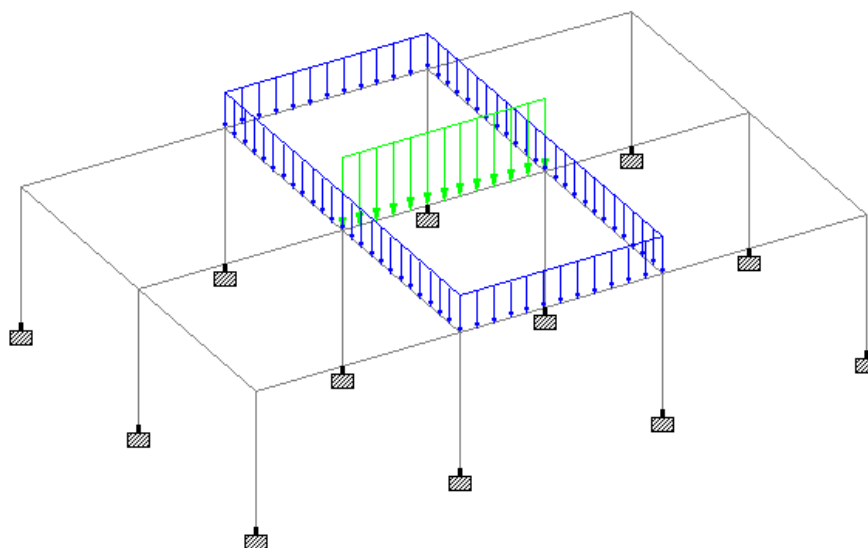
1)



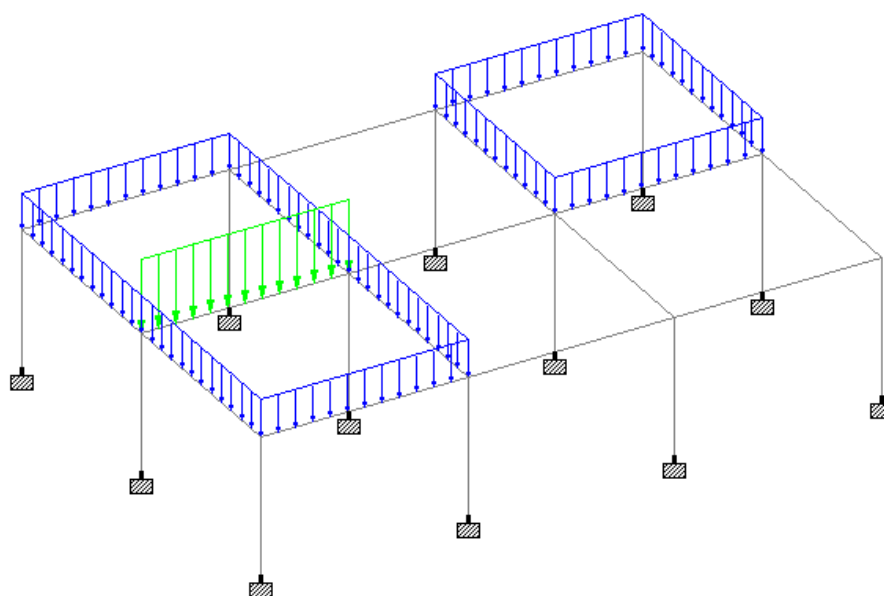
2)



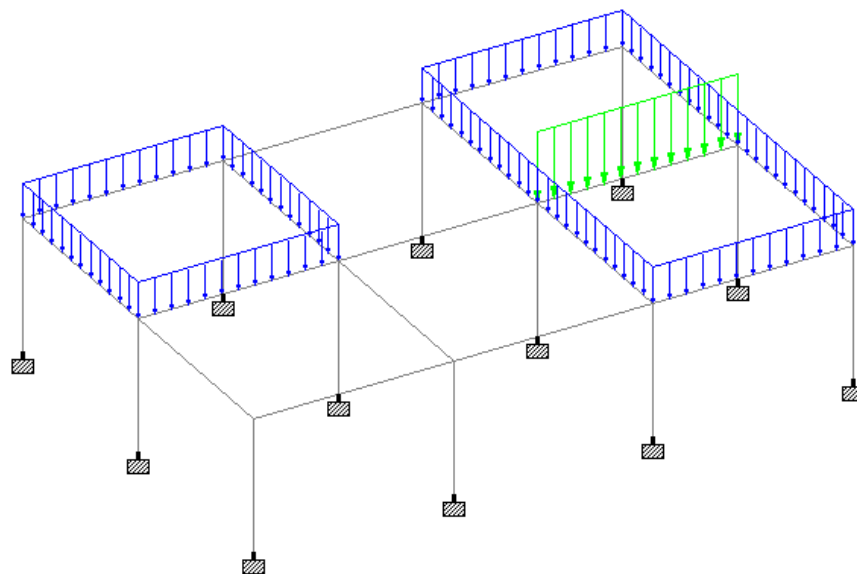
3)



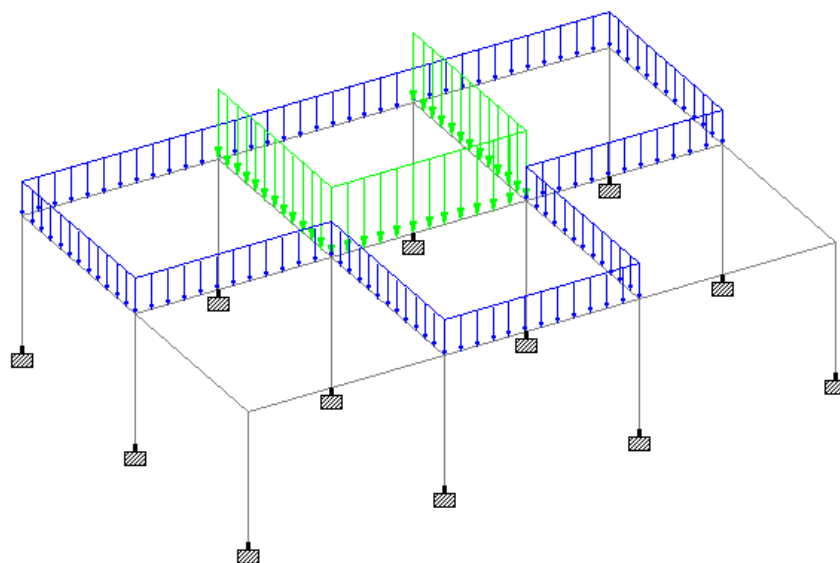
4)



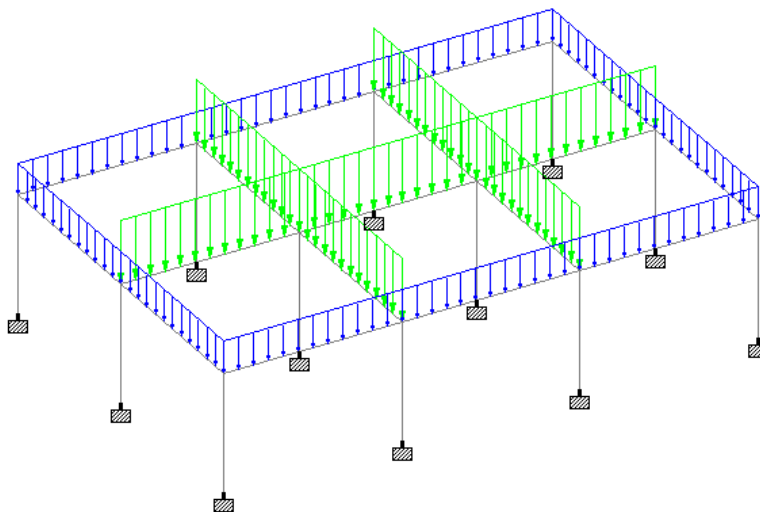
5)



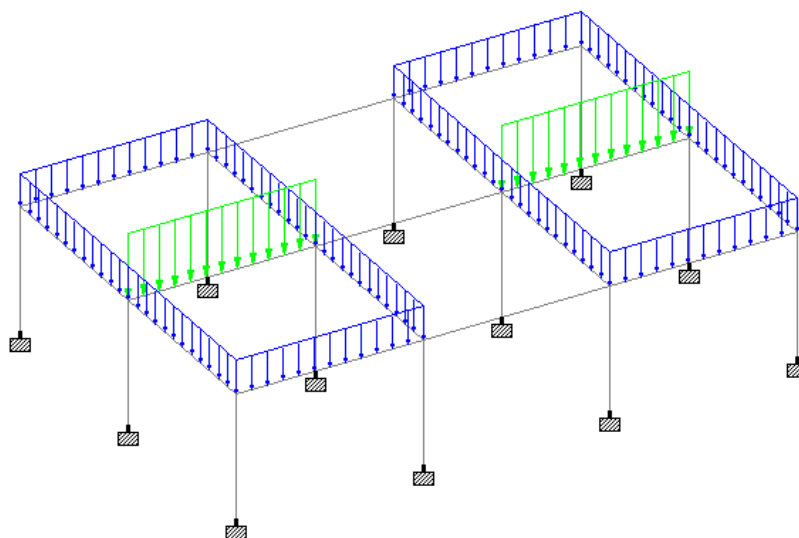
6)



7)



8)



Čia:

- 1) Šachmatinis apkrovimo variantas 1; 2) Šachmatinis apkrovimo variantas 2;
- 3) Centrinio tarpatramio apkrovimas; 4) Vieno krašto pilnas, kito – pusė apkrovimo variantas 1; 5) Vieno krašto pilnas, kito – pusė apkrovimo variantas 2; 6) Centrinio tarpatramio ir ilgosios kraštinės apkrovimo variantas; 7) Visos konstrukcijos apkrovimo variantas;
- 8) Kraštinių tarpatramių apkrovimo variantas.

PRIEDAS C

**Parametro β skaičiavimas priklausomai nuo d , c , M/V pagal skirtingas metodikas
pagal autoriaus atliktą skaitinį eksperimentą**

β skaičiavimas pagal EC2

Vidinė kolona

1. Lentelė. Koeficiento β reikšmė kintant c

M/V	d	$c1$	β
0,052	0,17	0,3	1,11
0,052	0,17	0,4	1,10
0,052	0,17	0,6	1,08

2. Lentelė. Koeficiento β reikšmė kintant d

M/V	d	$c1$	β
0,052	0,17	0,4	1,10
0,052	0,22	0,4	1,08
0,052	0,26	0,4	1,08

3. Lentelė. Koeficiento β reikšmė kintant M/V , kai $d = 0,17 m$

M/V	d	$c1$	β
0,052	0,17	0,4	1,10
0,14	0,17	0,4	1,27
0,41	0,17	0,4	1,76

4. Lentelė. Koeficiento β reikšmė kintant M/V , kai $d = 0,22 m$

M/V	d	$c1$	β
0,052	0,22	0,4	1,08
0,14	0,22	0,4	1,23
0,41	0,22	0,4	1,66

5. Lentelė. Koeficiento β reikšmė kintant M/V , kai $d = 0,26 m$

M/V	d	$c1$	β
0,052	0,26	0,4	1,08
0,14	0,26	0,4	1,21
0,41	0,26	0,4	1,60

Kraštinė kolona

6. Lentelė. Koeficiento β reikšmė kintant c

M/V	d	$c1$	β
0,43	0,17	0,3	1,82
0,43	0,17	0,4	1,70
0,43	0,17	0,6	1,55

7. Lentelė. Koeficiento β reikšmė kintant d

M/V	d	$c1$	β
0,43	0,17	0,4	1,70
0,43	0,22	0,4	1,62
0,43	0,26	0,4	1,57

8. Lentelė. Koeficiento β reikšmė kintant M/V , kai $d = 0,17 m$

M/V	d	$c1$	β
0,43	0,17	0,4	1,70
0,49	0,17	0,4	1,80
0,78	0,17	0,4	2,28

9. Lentelė. Koeficiento β reikšmė kintant M/V , kai $d = 0,22 m$

M/V	d	$c1$	β
0,43	0,22	0,4	1,62
0,49	0,22	0,4	1,71
0,78	0,22	0,4	2,13

10. Lentelė. Koeficiento β reikšmė kintant M/V , kai $d = 0,26 m$

M/V	d	$c1$	β
0,43	0,26	0,4	1,57
0,49	0,26	0,4	1,65
0,78	0,26	0,4	2,03

β skaičiavimas pagal STR

Vidinė kolona

11. Lentelė. Koeficiento β reikšmė kintant c

M/V	d	$c1$	β
0,052	0,17	0,3	1,11
0,052	0,17	0,4	1,10
0,052	0,17	0,6	1,08

12. Lentelė. Koeficiento β reikšmė kintant d

M/V	d	$c1$	β
0,052	0,17	0,4	1,10
0,052	0,22	0,4	1,08
0,052	0,26	0,4	1,08

13. Lentelė. Koeficiento β reikšmė kintant M/V , kai $d = 0,17$ m

M/V	d, m	c, m	β
0,051	0,17	0,4	1,095631
0,18	0,17	0,4	1,337522
0,77	0,17	0,4	2,443846

14. Lentelė. Koeficiento β reikšmė kintant M/V , kai $d = 0,22$ m

M/V	d	$c1$	β
0,052	0,22	0,4	1,08
0,14	0,22	0,4	1,23
0,41	0,22	0,4	1,66

15. Lentelė. Koeficiento β reikšmė kintant M/V , kai $d = 0,26$ m

M/V	d	$c1$	β
0,052	0,26	0,4	1,08
0,14	0,26	0,4	1,21
0,41	0,26	0,4	1,60

Kraštinė kolona

16. Lentelė. Koeficiento β reikšmė kintant c

M/V	d	$c1$	β
0,43	0,17	0,3	1,82
0,43	0,17	0,4	1,70
0,43	0,17	0,6	1,55

17. Lentelė. Koeficiento β reikšmė kintant d

M/V	d	$c1$	β
0,43	0,17	0,4	1,70
0,43	0,22	0,4	1,62
0,43	0,26	0,4	1,57

18. Lentelė. Koeficiento β reikšmė kintant M/V , kai $d = 0,17\text{ m}$

M/V	d	$c1$	β
0,43	0,17	0,4	1,70
0,49	0,17	0,4	1,80
0,78	0,17	0,4	2,28

19. Lentelė. Koeficiento β reikšmė kintant M/V , kai $d = 0,22\text{ m}$

M/V	d	$c1$	β
0,43	0,22	0,4	1,62
0,49	0,22	0,4	1,71
0,78	0,22	0,4	2,13

20. Lentelė. Koeficiento β reikšmė kintant M/V , kai $d = 0,26\text{ m}$

M/V	d	$c1$	β
0,43	0,26	0,4	1,57
0,49	0,26	0,4	1,65
0,78	0,26	0,4	2,03

PRIEDAS D

**Parametro β skaičiavimas priklausomai nuo d , c , M/V pagal skirtingas metodikas
pagal kitų autorių eksperimentines reikšmes**

β skaičiavimas pagal EC2

21. Lentelė. Koeficiento β reikšmė kintant M/V , kai d ir c

d	c	M	V	β
130	250	49	392	1,282793
130	250	73,5	588	1,282793
130	250	61,2	490	1,282562
130	250	73,2	586	1,2826
130	250	66,1	529	1,282686
130	250	63,8	255	1,566029
130	250	88,3	353	1,565906
164	400	110,3	441,3	1,408158
164	400	122,6	490,3	1,408334
149	400	85,8	343,2	1,431091
164	400	122,6	490,3	1,408334
159	400	134,9	539,4	1,415739
156,5	400	147,1	588,4	1,419354
154	400	110,3	441,3	1,423097
156,5	400	134,9	539,4	1,41951
120	250	44,1	176,4	1,594546
120	250	53,9	215,6	1,594546
120	250	63,7	254,8	1,594546
120	250	51,5	205,8	1,595124
120	250	57,6	230,3	1,594804
120	250	66,2	264,6	1,594995
120	250	53,9	107,8	2,189092
120	250	55,1	73,5	2,782829
120	250	77,2	102,9	2,784215
120	250	77,2	102,9	2,784215

β skaičiavimas pagal STR2

22. Lentelė. Koeficiento β reikšmė kintant M/V , kai d ir c

d	c	M	V	β
130	250	49	392	1,336093
130	250	73,5	588	1,336093
130	250	61,2	490	1,335819
130	250	73,2	586	1,335864
130	250	66,1	529	1,335966
130	250	63,8	255	1,672713
130	250	88,3	353	1,672567
164	400	110,3	441,3	1,477431
164	400	122,6	490,3	1,477636
149	400	85,8	343,2	1,500972
164	400	122,6	490,3	1,477636
159	400	134,9	539,4	1,485277
156,5	400	147,1	588,4	1,488968
154	400	110,3	441,3	1,492792
156,5	400	134,9	539,4	1,48915
120	250	44,1	176,4	1,70287
120	250	53,9	215,6	1,70287
120	250	63,7	254,8	1,70287
120	250	51,5	205,8	1,703553
120	250	57,6	230,3	1,703176
120	250	66,2	264,6	1,703402
120	250	53,9	107,8	2,405741
120	250	55,1	73,5	3,107655
120	250	77,2	102,9	3,109294
120	250	77,2	102,9	3,109294