



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

STATYBOS FAKULTETAS

TILTŲ IR SPECIALIŲJŲ STATINIŲ KATEDRA

Milda Pundinaitė

**LENKIAMŲJŲ GELŽBETONINIŲ ELEMENTŲ PLEIŠĖJIMO  
EKSPERIMENTINIAI IR TEORINIAI TYRIMAI**

**EXPERIMENTAL AND THEORETICAL ANALYSIS OF CRACKING OF  
FLEXURAL REINFORCED CONCRETE MEMBERS**

Baigiamasis magistro darbas

Statinių konstrukcijų studijų programa, valstybinis kodas 62402T107

Tiltų ir viadukų specializacija

Statybos inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2010

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS  
STATYBOS FAKULTETAS  
TILTŲ IR SPECIALIŲJŲ STATINIŲ KATEDRA

TVIRTINU

*Katedros vedėjas*

\_\_\_\_\_  
(Parašas)

\_\_\_\_\_  
(Vardas, pavardė)

\_\_\_\_\_  
(Data)

Milda Pundinaitė

**LENKIAMŲJŲ GELŽBETONINIŲ ELEMENTŲ PLEIŠĖJIMO  
EKSPERIMENTINIAI IR TEORINIAI TYRIMAI**

**EXPERIMENTAL AND THEORETICAL ANALYSIS OF CRACKING OF  
FLEXURAL REINFORCED CONCRETE MEMBERS**

Baigiamasis magistro darbas

Statinių konstrukcijų studijų programa, valstybinis kodas 62402T107

Tiltų ir viadukų specializacija

Statybos inžinerijos studijų kryptis

**Vadovas** \_\_\_\_\_  
(Moksl. laipsnis, vardas, pavardė) (Parašas) (Data)

**Konsultantas** \_\_\_\_\_  
(Moksl. laipsnis, vardas, pavardė) (Parašas) (Data)

**Konsultantas** \_\_\_\_\_  
(Moksl. laipsnis, vardas, pavardė) (Parašas) (Data)

Vilnius, 2010

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

**Statybos** fakultetas

**Tiltų ir specialiųjų statinių** katedra

ISBN      ISSN

Egz. sk. ....

Data ....-....-....

**Pastatų konstrukcijos** studijų programos baigiamasis magistro darbas

Pavadinimas **Lenkiamų gelžbetoninių elementų pleišėjimo eksperimentiniai ir teoriniai tyrimai**

**Kalba**

☐

lietuvių

☐

užsienio

### **Anotacija**

Baigiamajame magistro darbe atlikta lenkiamų gelžbetoninių sijų pleišėjimo analizė. Analizei atlikti buvo naudojamos 18 trumpalaikė apkrova apkrautų gelžbetoninių sijų, 2008 m. išbandytų VGTU laboratorijoje. Eksperimento metu gauti rezultatai palyginti su analitiniais skaičiavimais. Apžvelgti įvairūs, pasaulyje taikomi, gelžbetoninių projektavimo normų bei alternatyvūs vidutinių atstumų tarp plyšių ir plyšio pločio skaičiavimo metodai. Apžvelgti literatūros šaltiniai, kuriuose nagrinėjamas lenkiamų gelžbetoninių elementų pleišėjimas ir su juo susiję veiksniai. Darbe pateikti apdoroti eksperimentiniai pleišėjimo duomenys: sijų grynojo lenkimo zonos pleišėjimo pobūdis, vidutiniai atstumai tarp plyšių, vidutiniai plyšio pločiai. Analizuojami gelžbetoninių sijų parametrai, jų įtaka plyšio pločio dydžiui. Pateikta vidutinio plyšio pločio priklausomybė nuo apkrovos, bei vidutinių atstumų tarp plyšių pasiskirstymas elemente taikant *klasterio* metodą. Atlikta teorinių ir eksperimentinių rezultatų lyginamoji bei statistinė analizė.

Darbą sudaro šios dalys: literatūros apžvalga, eksperimentinių duomenų ir teorinių rezultatų analizė, rezultatai ir išvados, literatūros sąrašas.

Darbo apimtis – 99 p. teksto be priedų, 87 iliustr., 11 lent., 38 bibliografiniai šaltiniai.

Atskirai pridedami darbo priedai.

**Prasminiai žodžiai:** gelžbetoniniai elementai, lenkiamų elementų pleišėjimas, vidutinis plyšio plotis, vidutinis atstumas tarp plyšių, grynojo lenkimo zona.

Vilnius Gediminas Technical University  
Faculty of **Civil Engineering**  
Department of **Bridges and Special Structures**

ISBN      ISSN  
Copies No. ....

**Building Structures** study programme master thesis.

Title: **Experimental and theoretical analysis of cracking of flexural reinforced concrete members**

Author **Milda Pundinaite** Academic supervisor **doc. dr.Darius Bačinskas**

Thesis language

Lithuanian

Foreign (English)

### Annotation

The thesis made of reinforced concrete beams bending cracking analysis. Analysis was used in 18, short-term load loaded, reinforced concrete beams, 2008 VGTU tested in the laboratory. During the experiment, the results compared with analytical calculations. An overview of the diversity of the globe, reinforced concrete design standards and alternatives crack width and average crack spacing calculation methods. To review the literature in which the issue of bending of reinforced concrete cracking and related factors. In the paper the experimental cracking data processing: pure bending of beams cracking nature area, the average crack widths, the average crack spacing between the cracks. Reinforced beam parameters are analyzed and their influence on crack width. Submitted to the average gap width dependence of the load, and the average crack spacing in the element distribution through the cluster approach. The theoretical and experimental results and comparative statistical analysis.

Thesis consist of: 99 p. text without appendixes, 87 pictures, 11 tables, 38 bibliographical entries.

**Keywords:**average crack spacing, reinforced concrete, crack width.

## Turinys

|        |                                                                                                       |    |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.     | LENKIAMŲ GELŽBETONINIŲ ELEMENTŲ PLEIŠĖJIMO METODŲ APŽVALGA...                                         | 15 |
| 1.1.   | Pleišėjimo priežastys ir plyšių kilmė .....                                                           | 15 |
| 1.2.   | Tempiamo betono įtaka plyšių atsiradimui .....                                                        | 20 |
| 1.3.   | Tempiamosios zonos sustandėjimas .....                                                                | 22 |
| 1.4.   | Atstumas tarp plyšių .....                                                                            | 23 |
| 1.5.   | Plyšio plotis .....                                                                                   | 25 |
| 1.6.   | Veiksniai, lemiantys plyšio pločio dydį .....                                                         | 28 |
| 1.7.   | Vidutinių atstumų tarp plyšių skaičiavimo modeliai .....                                              | 31 |
| 1.8.   | Plyšio pločio skaičiavimo metodai: .....                                                              | 34 |
| 1.9.   | Baigiamosios skyriaus išvados ir pastabos.....                                                        | 41 |
| 2.     | EKSPERIMENTINIAI GELŽBETONINIŲ SIJŲ DEFORMACIJŲ TYRIMAI.....                                          | 43 |
| 2.1.   | Eksperimentinių tyrimų tikslai .....                                                                  | 43 |
| 2.2.   | Eksperimentinių tyrimų programa ir duomenys apie bandinius.....                                       | 43 |
| 2.3.   | Bandymų metodika ir prietaisų išdėstymas.....                                                         | 48 |
| 2.4.   | Betono ir armatūros savybių tyrimas .....                                                             | 50 |
| 2.4.1. | Betonas .....                                                                                         | 50 |
| 2.4.2. | Armatūra .....                                                                                        | 51 |
| 2.4.3. | Eksperimentinių tyrimų rezultatai.....                                                                | 52 |
| 2.5.   | Baigiamosios skyriaus išvados ir pastabos.....                                                        | 57 |
| 3.     | GELŽBETONINIŲ SIJŲ VIDUTINIŲ ATSTUMŲ TARP PLYŠIŲ SKAIČIAVIMAS<br>TAIKANT <i>KLASTERIO</i> METODĄ..... | 59 |
| 3.1.   | Bendros žinios .....                                                                                  | 59 |
| 3.2.   | Eksperimentinių vidutinių atstumų tarp plyšių duomenų apdorojimas.....                                | 59 |
| 3.3.   | <i>Klasterinės</i> analizės metodas .....                                                             | 61 |
| 3.4.   | <i>Klasterinės</i> analizės metodo pavyzdys skaičiuojant vidutinius atstumus tarp plyšių .....        | 62 |
| 3.5.   | Baigiamosios skyriaus išvados ir pastabos.....                                                        | 67 |
| 4.     | EKSPERIMENTINIŲ IR TEORINIŲ REZULTATŲ PALYGINIMAS.....                                                | 69 |
| 4.1.   | Bendros žinios .....                                                                                  | 69 |
| 4.2.   | Eksperimentinių ir teorinių vidutinių atstumų tarp plyšių rezultatų palyginimas.....                  | 69 |

|                           |                                                            |    |
|---------------------------|------------------------------------------------------------|----|
| 4.3.                      | Vidutinių atstumų tarp plyšių statistinė analizė.....      | 73 |
| 4.4.                      | Plyšių pločių rezultatų palyginimas .....                  | 74 |
| 4.5.                      | Baigiamosios skyriaus išvados, pastabos ir rezultati. .... | 91 |
| 5.                        | Bendros darbo išvados, pastabos ir rezultatai: .....       | 93 |
| LITERATŪROS SĄRAŠAS ..... |                                                            | 96 |
| PRIEDAI .....             |                                                            | 99 |

## PAVEIKSLĖLIŲ SĄRAŠAS

|                                                                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>1 pav.</b> Vidiniai mikroplyšiai.....                                                                                                                      | 16 |
| <b>2 pav.</b> Įstrižas ir normalinis plyšiai .....                                                                                                            | 17 |
| <b>3 pav.</b> Elemento pleišėjimo stadijos .....                                                                                                              | 17 |
| <b>4 pav.</b> Betono įtempių pasiskirstymas išilgai tempiamos armatūros.....                                                                                  | 19 |
| <b>5 pav.</b> Efektyviojo betono samprata $A_{c,ef}$ .....                                                                                                    | 21 |
| <b>6 pav.</b> Deformacijų ir tangentinių įtempių pasiskirstymas ties armatūra .....                                                                           | 22 |
| <b>7 pav.</b> Tempiamo betono vidutinių įtempių – deformacijų diagrama ( <i>G.Kaklauskas 2004</i> ).....                                                      | 23 |
| <b>8 pav.</b> Vidutinių ir charakteristinių plyšio pločio reikšmių kreivės .....                                                                              | 26 |
| <b>9 pav.</b> Maksimalių ir vidutinių plyšio pločio reikšmių santykių kreivė ( <i>MC90</i> ).....                                                             | 27 |
| <b>10 pav.</b> Stačiakampio gelžbetonio schema pagal <i>Venkateswarlu 'as ir Gundas (1972)</i> .....                                                          | 28 |
| <b>11 pav.</b> Efektyvusis tempiamo betono plotas.....                                                                                                        | 35 |
| <b>12 pav.</b> Sijos skerspjūvis, kuriame pavaizduotas, trumpiausias atstumas nuo sijos krašto iki armatūros ( $a_{cr}$ ) .....                               | 37 |
| <b>13 pav.</b> Parametro $a_{cr}$ padėtis sijos skerspjūvyje .....                                                                                            | 38 |
| <b>14 pav.</b> Stačiakampio skerspjūvio deformacijų ir įtempių schema. ....                                                                                   | 38 |
| <b>15 pav.</b> Sijų bandymo schema bei armavimo schema .....                                                                                                  | 43 |
| <b>16 pav.</b> Skerspjūvių armavimo schemas, armavimo procentai bei apskaičiuoti susitraukimo sukelti įtempiai viršutiniame/apatiniame sijos sluoksnyje ..... | 44 |
| <b>17 pav.</b> Armatūros strypynų darbo brėžiniai.....                                                                                                        | 45 |
| <b>18 pav.</b> Tinklo T3-2 darbo brėžinys .....                                                                                                               | 45 |
| <b>19 pav.</b> Eksperimentinių sijų betonavimas .....                                                                                                         | 47 |
| <b>20 pav.</b> Aplinkos drėgnumo bei temperatūros kitimas eksperimentinių tyrimų metu .....                                                                   | 48 |
| <b>21 pav.</b> Eksperimentinių cilindų, prizmių bei kubelių betonavimas.....                                                                                  | 48 |
| <b>22 pav.</b> Matavimo prietaisų išdėstymas.....                                                                                                             | 49 |
| <b>23 pav.</b> Betono susitraukimo sukeltų deformacijų matavimas (kairėje); visų serijų betono laisvosios betono susitraukimo deformacijos (dešinėje).....    | 50 |
| <b>24 pav.</b> Betono valkšnumo matavimas (kairėje); betono valkšnumo koeficiento kitimas (dešinėje) .....                                                    | 51 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>25 pav.</b> Armatūros strypų bandymas .....                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 51 |
| <b>26 pav.</b> Armatūros bandiniai bei įtempių ir deformacijų diagrama ( $\varnothing 10$ mm) .....                                                                                                                                                                                                                                        | 52 |
| <b>27 pav.</b> I serijos eksperimentinių sijų pleišėjimo pobūdis .....                                                                                                                                                                                                                                                                     | 53 |
| <b>28 pav.</b> I serijos sijų eksperimentinės plyšio pločio reikšmės .....                                                                                                                                                                                                                                                                 | 54 |
| <b>29 pav.</b> II serijos eksperimentinių sijų pleišėjimo pobūdis .....                                                                                                                                                                                                                                                                    | 54 |
| <b>30 pav.</b> II serijos sijų eksperimentinės plyšio pločio reikšmės .....                                                                                                                                                                                                                                                                | 55 |
| <b>31 pav.</b> III serijos eksperimentinių sijų pleišėjimo pobūdis .....                                                                                                                                                                                                                                                                   | 56 |
| <b>32 pav.</b> III serijos sijų eksperimentinės plyšio pločio reikšmės .....                                                                                                                                                                                                                                                               | 57 |
| <b>33 pav.</b> Sijų <i>S1-3R</i> <i>S3-2-2</i> grynojo lenkimo zona .....                                                                                                                                                                                                                                                                  | 59 |
| <b>34 pav.</b> Sijų <i>S1-3R</i> ir <i>S3-2-2</i> pleišėjimo schema atitinkamai prie 34 kN ir 46 kN apkrovų .....                                                                                                                                                                                                                          | 60 |
| <b>35 pav.</b> Supleišėjusių sijų <i>S1-3R</i> ir <i>S3-2-2</i> schema atitinkamai prie 74,5 kN ir 221 kN apkrovų .....                                                                                                                                                                                                                    | 60 |
| <b>36 pav.</b> <i>Klasterių</i> dendrograma: x ašyje esantys skaičiai rodo klasterių skaičių, o y ašies skaičiai rodo kokiam aukštyje klasteriai susidarę, t.y. nurodomos klasterio koordinatės .....                                                                                                                                      | 61 |
| <b>37 pav.</b> Sijos <i>S1-3R</i> klasterinės analizės pavyzdys: .....                                                                                                                                                                                                                                                                     | 64 |
| a) sijos <i>S1-3R</i> grynojo lenkimo zonos pleišėjimo pobūdis; b) sijos <i>S1-3R</i> grynojo lenkimo zonos pleišėjimo pobūdis prie 34 kN ir 60 kN apkrovų; c) vietoj realaus plyšio sudaryta plyšio projekcija į x ašį; d) sijos <i>S1-3R</i> dendrograma prie 60 kN apkrovos; e) sijos <i>S1-3R</i> histograma prie 60 kN apkrovos ..... | 64 |
| <b>38 pav.</b> Sijos <i>S1-1R</i> eksperimentiniai vidutiniai atstumai tarp plyšių .....                                                                                                                                                                                                                                                   | 64 |
| <b>39 pav.</b> Sijos <i>S1-2</i> eksperimentiniai vidutiniai atstumai tarp plyšių .....                                                                                                                                                                                                                                                    | 65 |
| <b>40 pav.</b> Sijos <i>S2-2</i> eksperimentiniai vidutiniai atstumai tarp plyšių .....                                                                                                                                                                                                                                                    | 65 |
| <b>41 pav.</b> Sijos <i>S2-3R</i> eksperimentiniai vidutiniai atstumai tarp plyšių .....                                                                                                                                                                                                                                                   | 65 |
| <b>42 pav.</b> Sijos <i>S3-1-2</i> eksperimentiniai vidutiniai atstumai tarp plyšių .....                                                                                                                                                                                                                                                  | 66 |
| <b>43 pav.</b> Sijos <i>S3-2-2</i> eksperimentiniai vidutiniai atstumai tarp plyšių .....                                                                                                                                                                                                                                                  | 66 |
| <b>44 pav.</b> I serijos sijų vidutinių atstumų tarp plyšių eksperimentinių ir teorinių rezultatų palyginimas .....                                                                                                                                                                                                                        | 69 |
| <b>45 pav.</b> II serijos sijų vidutinių atstumų tarp plyšių eksperimentinių ir teorinių rezultatų palyginimas .....                                                                                                                                                                                                                       | 69 |
| (pagal normas) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 69 |
| <b>46 pav.</b> III serijos sijų vidutinių atstumų tarp plyšių eksperimentinių ir teorinių rezultatų palyginimas .....                                                                                                                                                                                                                      | 70 |

|                                                                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| (pagal normas) .....                                                                                                 | 70 |
| <b>47 pav.</b> I serijos sijų vidutinių atstumų tarp plyšių eksperimentinių ir teorinių rezultatų palyginimas.....   | 70 |
| <b>48 pav.</b> II serijos sijų vidutinių atstumų tarp plyšių eksperimentinių ir teorinių rezultatų palyginimas.....  | 70 |
| <b>49 pav.</b> III serijos sijų vidutinių atstumų tarp plyšių eksperimentinių ir teorinių rezultatų palyginimas..... | 71 |
| <b>50 pav.</b> Projektavimo normų sisteminės paklaidos priklausomybė nuo armavimo koeficiento ...                    | 73 |
| <b>51 pav.</b> Alternatyvių metodų sisteminės paklaidos priklausomybė nuo armavimo koeficiento...                    | 73 |
| <b>52 pav.</b> Sijos S1-1 rezultatų palyginimas.....                                                                 | 74 |
| <b>53 pav.</b> Sijos S1-1R rezultatų palyginimas .....                                                               | 75 |
| <b>54 pav.</b> Sijos S1-2 rezultatų palyginimas.....                                                                 | 75 |
| <b>55 pav.</b> Sijos S1-3 rezultatų palyginimas.....                                                                 | 75 |
| <b>56 pav.</b> Sijos S1-3R rezultatų palyginimas .....                                                               | 76 |
| <b>57 pav.</b> Sijos S1-4 rezultatų palyginimas.....                                                                 | 76 |
| <b>58 pav.</b> Sijos S2-1 rezultatų palyginimas.....                                                                 | 77 |
| <b>59 pav.</b> Sijos S2-2 rezultatų palyginimas.....                                                                 | 78 |
| <b>60 pav.</b> Sijos S2-3 rezultatų palyginimas.....                                                                 | 78 |
| <b>61 pav.</b> Sijos S2-3R rezultatų palyginimas .....                                                               | 78 |
| <b>62 pav.</b> Sijos S3-1-1 rezultatų palyginimas.....                                                               | 80 |
| <b>63 pav.</b> Sijos S3-1-2 rezultatų palyginimas.....                                                               | 80 |
| <b>64 pav.</b> Sijos S3-2-1 rezultatų palyginimas.....                                                               | 80 |
| <b>65 pav.</b> Sijos S3-2-2 rezultatų palyginimas.....                                                               | 81 |
| <b>66 pav.</b> Sijos S3-2-3 rezultatų palyginimas.....                                                               | 81 |
| <b>67 pav.</b> Sijos S3-2-6 rezultatų palyginimas.....                                                               | 81 |
| <b>68 pav.</b> Sijos S3-2-9 rezultatų palyginimas.....                                                               | 82 |
| <b>69 pav.</b> Sijos S3-2-10 rezultatų palyginimas.....                                                              | 82 |
| <b>70 pav.</b> Sijos S1-1 eksperimentinių ir alternatyvių skaičiavimų rezultatų palyginimas.....                     | 83 |
| <b>71 pav.</b> Sijos S1-1R eksperimentinių ir alternatyvių skaičiavimų rezultatų palyginimas .....                   | 84 |

|                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>72 pav.</b> Sijos S1-2 eksperimentinių ir alternatyvių skaičiavimų rezultatų palyginimas.....    | 84 |
| <b>73 pav.</b> Sijos S1-3 eksperimentinių ir alternatyvių skaičiavimų rezultatų palyginimas.....    | 84 |
| <b>74 pav.</b> Sijos S1-3R eksperimentinių ir alternatyvių skaičiavimų rezultatų palyginimas .....  | 85 |
| <b>75 pav.</b> Sijos S1-4 eksperimentinių ir alternatyvių skaičiavimų rezultatų palyginimas.....    | 85 |
| <b>76 pav.</b> Sijos S2-1 eksperimentinių ir alternatyvių skaičiavimų rezultatų palyginimas.....    | 86 |
| <b>77 pav.</b> Sijos S2-2 eksperimentinių ir alternatyvių skaičiavimų rezultatų palyginimas.....    | 86 |
| <b>78 pav.</b> Sijos S2-3 eksperimentinių ir alternatyvių skaičiavimų rezultatų palyginimas.....    | 87 |
| <b>79 pav.</b> Sijos S2-3R eksperimentinių ir alternatyvių skaičiavimų rezultatų palyginimas .....  | 87 |
| <b>80 pav.</b> Sijos S3-1-1 eksperimentinių ir alternatyvių skaičiavimų rezultatų palyginimas.....  | 88 |
| <b>81 pav.</b> Sijos S3-1-2 eksperimentinių ir alternatyvių skaičiavimų rezultatų palyginimas.....  | 88 |
| <b>82 pav.</b> Sijos S3-2-1 eksperimentinių ir alternatyvių skaičiavimų rezultatų palyginimas.....  | 89 |
| <b>83 pav.</b> Sijos S3-3-2 eksperimentinių ir alternatyvių skaičiavimų rezultatų palyginimas.....  | 89 |
| <b>84 pav.</b> Sijos S3-2-3 eksperimentinių ir alternatyvių skaičiavimų rezultatų palyginimas.....  | 89 |
| <b>85 pav.</b> Sijos S3-2-6 eksperimentinių ir alternatyvių skaičiavimų rezultatų palyginimas.....  | 90 |
| <b>86 pav.</b> Sijos S3-2-9 eksperimentinių ir alternatyvių skaičiavimų rezultatų palyginimas.....  | 90 |
| <b>87 pav.</b> Sijos S3-2-10 eksperimentinių ir alternatyvių skaičiavimų rezultatų palyginimas..... | 90 |

## LENTELIŲ SĄRAŠAS

|                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>1.1 lentelė.</b> Minimalūs apsauginio betono sluoksniai siūlomi įvairių normų. ....                                  | 29 |
| <b>2.1 lentelė.</b> Eksperimentinių sijų pagrindinės geometrinės bei medžiagų charakteristikos .....                    | 46 |
| <b>2.2 lentelė.</b> Pateikti sijų pleišėjimo $M_{cr}$ ir suirimo $M_u$ momentai. ....                                   | 52 |
| <b>3.1 lentelė.</b> Vidutinių atstumų tarp plyšių grafikų analizės rezultatai .....                                     | 67 |
| <b>4.1 lentelė.</b> Teorinių ir eksperimentinių vidutinių atstumų tarp plyšių duomenys.....                             | 72 |
| <b>4.2 lentelė.</b> I serijos sijų eksperimentinių ir teorinių rezultatų santykis prie $M_{ser}$ apkrovos .....         | 77 |
| <b>4.3 lentelė.</b> II serijos sijų eksperimentinių ir teorinių rezultatų santykis prie $M_{ser}$ apkrovos .....        | 79 |
| <b>4.4 lentelė.</b> III serijos sijų eksperimentinių ir teorinių rezultatų santykis prie $M_{ser}$ apkrovos.....        | 82 |
| <b>4.5 lentelė.</b> I serijos sijų eksperimentinių ir alternatyvių skaičiavimų santykis prie $M_{ser}$ apkrovos .....   | 85 |
| <b>4.6 lentelė.</b> II serijos sijų eksperimentinių ir alternatyvių skaičiavimų santykis prie $M_{ser}$ apkrovos .....  | 87 |
| <b>4.7 lentelė.</b> III serijos sijų eksperimentinių ir alternatyvių skaičiavimų santykis prie $M_{ser}$ apkrovos ..... | 91 |

## BENDROJI DARBO CHARAKTERISTIKA

### Darbo aktualumas.

Visų statybinių konstrukcijų patikimumas, ilgaamžiškumas ir sauga priklauso nuo ribinių būvių [saugos (I) ir tinkamumo (II)] nustatymui taikomų skaičiavimo metodų, matematinio aparato ir fizikinių modelių adekvatumo. Skirtingų medžiagų (gelžbetonio, plieno, medienos ir pan.) konstrukcijoms I-ojo ribinio būvio (stiprumo, laikomosios galios) skaičiavimai paprastai nesukelia didesnių sunkumų, kadangi juose dažniausiai taikomi fundamentiniai medžiagų mechanikos principai ir prielaidos. II-ojo ribinio būvio (deformacijų, įlinkių, plyšio pločio) skaičiavimuose taikomų algoritmų sudėtingumas priklauso nuo konstrukciją sudarančių medžiagų deformacinių savybių. Šiuo požiūriu, betoninės ir gelžbetoninės konstrukcijos užima išskirtinę vietą tarp kitų dažniausiai taikomų (plieninių, medinių ar aliuminio) konstrukcijų. Reikia pažymėti, kad daugeliui inžinierių projektuotojų betoninių ir gelžbetoninių konstrukcijų tikrinimas II-ojo ribinio būvio reikalavimams yra tarsi „juoda dėžė“, kurią atidarius kyla daugiau klausimų negu randama atsakymų.

Betoninių ir gelžbetoninių konstrukcijų standumo ir pleišėtumo skaičiavimas yra komplikotas dėl sudėtingos betono kaip kompozitinės medžiagos struktūros bei jo sąveikos su tempimo įtempiais perimančiais armatūros strypais. Betono sudedamųjų komponentų (smulkaus ir standaus užpildų, cemento, priedų) savybių įtaka elementų deformacijoms ir pleišėjimui gali būti įvertinta, taikant sudėtingus mezo- arba mikro-matematinius modelius. Pastarųjų taikymas dėl sudėtingo matematinio aparato ir didelių kompiuterinių resursų poreikio kol kas apsiriboja tik nesudėtingų etaloninių elementų skaičiavimuose (pvz., betono kubelio gniuždomo bandymas). Statybos inžinierių taikomais makro-modeliais gaunami tinkamumo ribinių būvių analizės rezultatai priklauso nuo pasirinktos armatūros ir betono sąveikos tempiamojoje zonoje modeliavimo koncepcijos.

Didžiausią įtaką deformacijų skaičiavimo rezultatams turi betono pleišėjimo bei armatūros ir betono sąveikos modeliavimas. Betonas turi mažą tempimo stiprį, todėl jis pleišėja. Visų pirma, atsiranda didieji plyšiai (angl. *major cracks*), pasireiškiantys didžiojoje elemento tempiamosios zonos dalyje. Atsiradus šiems plyšiams, gelžbetoninių elementų deformacijos gali padidėti keletą kartų. Plyšiuose ir gretimuose pjūviuose įvyksta armatūros praslydimas betone, o rumbelių vietose betone atsiranda lokalūs plyšiai (angl. *secondary cracks*). Praslydus armatūrai, kontakto zonoje atsiranda tangentiniai įtempiai, kurie yra perduodami betonui. Tokiu būdu, ruožuose tarp plyšių betonas perima tempimo įtempius, o tai lemia gelžbetoninio elemento standumo padidėjimą. Šis reiškinys vadinamas tempiamojo betono elgsena tarp plyšių (angl. *tension stiffening effect*). Neteisingai įvertinus šį reiškinį, gali būti daromos didesnės nei 100% įlinkių apskaičiavimo paklaidos. Modeliavimą apsunkina ir tai, kad didieji plyšiai yra diskretūs,

t. y. nutolę tam tikru atstumu, kintančiu priklausomai nuo įvairių veiksnių (elemento skerspjūvio forma, armatūros kiekis (armavimo koeficientas), strypų skersmuo ir skaičius, jų paviršius ir tamprumo modulis, apsauginis sluoksnis, ir kt.).

Darbe atlikta lenkiamųjų gelžbetoninių elementų plyšio pločių ir atstumo tarp plyšių skaičiavimo metodų analizė. Eksperimentiškai nustatytos ir taikant matematinį klasterio grupavimo metodą apdorotos plyšių pločio ir atstumo tarp plyšių reikšmės palygintos su 10 skirtingų skaičiavimo metodikų. Atlikta palyginamoji gautų rezultatų analizė.

### **Tyrimų objektas ir metodai:**

Darbe nagrinėjamas trumpalaikė apkrova veikiamų lenkiamų gelžbetoninių elementų pleišėjimas. Išnagrinėti teoriniai pleišėjimo skaičiavimo metodai, apdoroti eksperimentiniai duomenys. Taikant *klasterio* taškų grupavimo metodą gautas šių grynojo lenkimo zonos pleišėjimo pobūdis, taip pat gauta plyšio pločio priklausomybė nuo apkrovos. Išnagrinėtos šių pleišėjimo stadijos.

**Pagrindinis darbo tikslas:** Atlikti lenkiamų gelžbetoninių elementų pleišėjimo: plyšio pločio ir atstumo tarp plyšių,- skaičiavimo modelių analizę.

### **Darbo uždaviniai:**

1. Atlikti atstumų tarp plyšių ir plyšio pločio skaičiavimų metodų apžvalgą.
2. Dalyvauti lenkiamų gelžbetoninių elementų eksperimentiniuose tyrimuose ir atlikti eksperimentinių rezultatų analizę.
3. Taikant *klasterio* metodą, iš eksperimentinių duomenų gauti vidutinių atstumų tarp plyšių dydžius, bei plyšių pasiskirstymo grafikus elemente.
4. Eksperimentinių šių duomenims apskaičiuoti vidutinius atstumus tarp plyšių ir plyšio pločius, taikant skirtingus skaičiavimo metodus.
5. Atlikti teorinių ir eksperimentinių rezultatų palyginamąją analizę.

**Darbo aprobacija.** Dalis magistrinio darbo rezultatų buvo paskelbti 13-oje Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijoje “Mokslas-Lietuvos ateitis“, vykusioje Vilniuje 2010 m kovo 24d.

**Darbo struktūra ir apimtis.** Darbe yra 95 kompiuteriu sumaketuoti ir 1,5 intervalo eilėtarpiu išspausdinti puslapiai, 87 iliustracijos, 11 lentelių, 38 bibliografijos šaltinių sąrašas.

**PADĖKA.** Darbo autorius išreiškia didelę padėką VGTU Tiltų ir specialiujų statinių katedros tyrėjui Viktor Gribniak, už suteiktą galimybę pasinaudoti jo atliktų eksperimentinių bandymų duomenimis bei už konsultacijas, eksperimentinių duomenų apdorojimo klausimais.

## 1. LENKIAMŲ GELŽBETONINIŲ ELEMENTŲ PLEIŠĖJIMO METODŲ APŽVALGA

### 1.1. Pleišėjimo priežastys ir plyšių kilmė

Plyšių atsiradimas gelžbetoniniuose elementuose yra neišvengiamas reiškinys dėl charakteristinių betono savybių, t.y. mažo betono tempimo stiprio bei mažų betono plastinių ir elastinių deformacijų. Veikiant eksplotacinei apkrovai, kad ir mažai armuotuose elementuose, atsiradę plyšiai neturi būti dideli (leistinas plyšių dydis yra apibrėžtas, priklausomai nuo gelžbetoninių konstrukcijų projektavimo, normų išskyrus plyšius, kurie atsiranda dėl betono susitraukimo ar temperatūros pokyčių). Bet pasitaiko atvejų, kai eksplotacinė apkrova sukelia didelius armatūros įtempius elementuose, turinčiuose didelį armavimo procentą, tada plyšiai tampa pastebimi konstrukcijos paviršiuje. Jei šių atsiradusių plyšių plotis didelis, tai gadina ne tik estetinį konstrukcijos vaizdą, bet turi neigiamos įtakos statiniui, t.y. dėl klimatinio aplinkos poveikio plyšio vietoje gali pradėti koroduoti armatūros strypai. Kad būtų galima išvengti gelžbetoninių konstrukcijų pleišėjimo, jos turi būti projektuojamos taip, kad, veikiant eksplotacinėms apkrovoms, atsiradę plyšiai neviršytų leistinųjų reikšmių, reglamentuotų projektavimo normose. Be estetinės konstrukcijos išvaizdos ir galimos korozijos grėsmės, gelžbetoninių elementų pleišėjimas labai sumažina betono lenkiamąjį standį. Taigi, vertinant gelžbetoninių elementų deformacijas, būtina įvertinti ir elementų pleišėjimo įtaką gelžbetoniniams elementams skaičiuoti [30].

Plyšio pločio dydis turi būti kontroliuojamas, jo leistina vertė yra pakankamai maža. Paprastai, maksimalus plyšio plotis apibrėžiamas intervale nuo 0,1 iki 0,4 mm, priklausomai nuo aplinkybių. Pagrindinės priežastys, dėl kurių yra kontroliuojami plyšio pločiai, yra susijusios su:

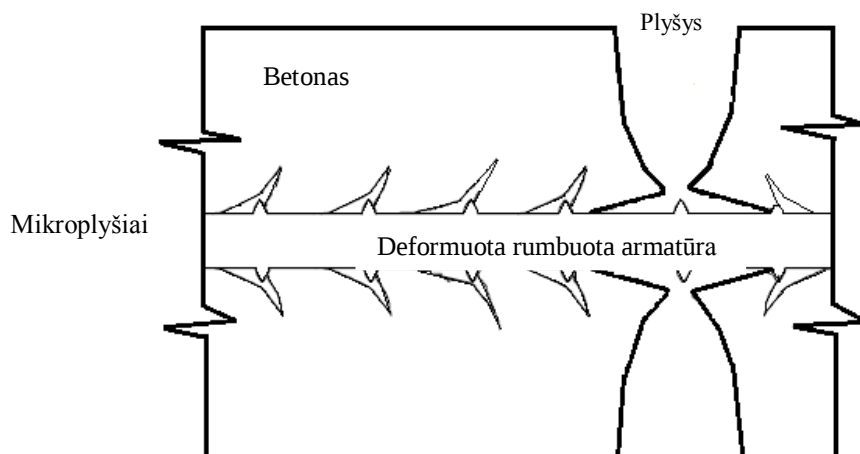
- a) padidėjusia armatūros korozijos tikimybe;
- b) armatūros praslydimu;
- c) estetiniu konstrukcijos vaizdu.

Plyšiai, susiformavę gelžbetoniniuose elementuose, gali būti skirstomi į dvi pagrindines kategorijas: tie, kurie priklauso nuo išorinių apkrovų, ir tie, kurie atsiranda nepriklausomai nuo apkrovų (*Leonhardt 1977, Base 1978*).

Yra keletas betono pleišėjimo priežasčių: plyšiai gali formotis betonui nesustingus ir jam sukietėjus. Kol betonas stingsta, plastiški plyšiai gali atsirasti per kelias pirmąsias valandas po betono liejimo. Išskiriami du plastiškojo plyšio tipai: plastiškas susitraukimo plyšys, kuris dažniausiai atsiranda plokštėse, ir plastiškasis nuosėdžio plyšys, atsirandantis betono gilesniuose sluoksniuose betonui besitraukiant. O jau sukietėjusiame betone plyšiai atsiranda nuo apkrovų (

lenkimo, tempimo, šlyties, sukimo, sukibimo ir t.t.) ar dėl deformacijų (susitraukimo, temperatūros pokyčių ir t.t.).

Vidiniai mikroplyšiai atsiranda nuo išorinių apkrovų dėl didelių betono įtempių, greta deformuotos armatūros strypų, ties armatūros rumbais ir betono paviršiuje jų nebūna (žr. 1 pav.) Mikroplyšiai laikomi armatūros praslydimo mechanizmo dalimi.

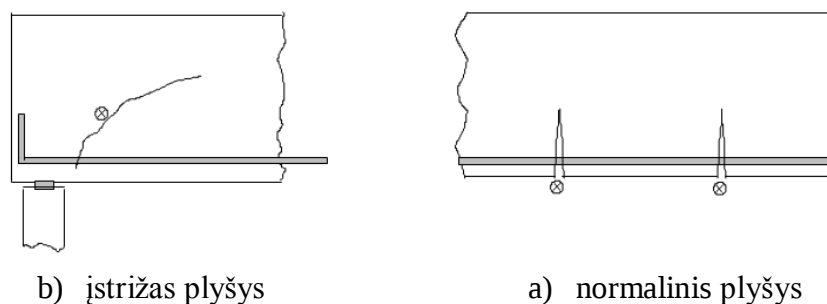


**1 pav.** Vidiniai mikroplyšiai

Elementuose, kuriuose plyšių atsiradimas nepriklauso nuo apkrovos, ribojamos susitraukimo ir temperatūrinės deformacijos, nes tokiuose elementuose, kaip grindys, plyšiai formuojasi chaotiškai ir nėra tikslios pleišėjimo skaičiavimo metodikos (Warner 1998). Jei šių plyšių plotis nėra tinkamai kontroliuojamas, jie gali suardyti vientisą konstrukciją ir gali sumažinti lenkiamąją konstrukcijos stiprį, o tai sukelia didelius įlinkius.

Normaliniai ir įstrižiniai plyšiai yra pagrindiniai plyšių tipai, atsirandantys nuo išorinių apkrovų (žr. 2 pav.). Normalinis plyšys formuojasi tempiamoje elemento zonoje, maksimalus plyšio plotis yra elemento tempiamos zonos paviršiuje, o plyšio plotis lygus nuliui ties neutraliąja elemento ašimi. Įstrižiniai plyšiai dažniausiai formuojasi liaunoje sijoje dėl didelių šlyties jėgų (Warner ir kt. 1999, Loo 1990). Teoriškai plyšių galima išvengti tik trimis kryptimis įtempiant armatūros strypus, tada elementas aplink armatūrą yra gniuždomas ir plyšių neturėtų būti. Šiame darbe nagrinėjami lenkiamų elementų normaliniai plyšiai, įstrižiniai plyšiai nenagrinėjami.

Normalinių plyšių formavimasis dažniausiai skirstomas į dvi stadijas: plyšio formavimosi stadiją ir nusistovėjusio pleišėjimo stadiją. Pirmojoje plyšių formavimosi stadijoje pirmieji plyšiai gali atsirasti bet kurioje elemento vietoje, priklausomai nuo silpniausios tempiamo betono vietos. Po pirmojo plyšio atsiradimo plyšio vietoje tempimo jėgas perima tik armatūra. Betono įtempiai plyšyje nukrenta iki nulio, įtempių pasiskirstymas tarp betono ir armatūros išnyksta. Di-

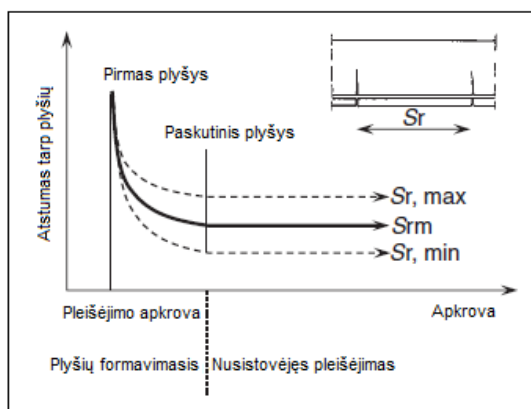


Pastaba: ⊗ žymima plyšio atsiradimo vieta

**2 pav.** Įstrižas ir normalinis plyšiai

dėjant atstumui nuo plyšio, tempimo įtempiai betone didėja kaip jėga, kuri yra perduodama per tangentinius įtempius. Atstumas nuo vieno plyšio iki kito vadinamas jėgos perdavimo ilgiu (angl. transferring length). Šiame ilgyje vėl atsiranda bendras armatūros ir betono darbas. Kuo geresnis betono ir armatūros sukibimas, tuo mažesnio atstumo reikia atkurti įtempių pasiskirstymui. Plyšių formavimosi stadijoje, įtempių zonos nepriklauso viena nuo kitos. Augant apkrovai formuojasi nauji plyšiai, vidutinis atstumas tarp plyšių mažėja (3 pav.) [30].

Nusistovėjęs pleišėjimas vadinamas tokia elemento pleišėjimo stadija, kai atstumai tarp plyšių nusistovi ir nebeatsiranda naujų plyšių. Šioje stadijoje plyšiai vienas su kitu susijęs per jėgos perdavimo ilgį. Šioje zonoje vidutinis atstumas tarp plyšių tampa pastovus ilgis, o nuo didėjančios apkrovos priklauso tik plyšio pločio dydis [7].



**3 pav.** Elemento pleišėjimo stadijos

Daugiau kaip 40 metų, dauguma gelžbetoninių projektavimo normų pateikia formules galimoms plyšio pločio reikšmėms gauti, kuriose įvertinama nepalankiausia apkrova, veikianti konstrukciją per visą jos eksploatacinį laikotarpį. Daugelio tų formulių pagrindinė skaičiavimo formą pateikta 1.1 formulėje arba ši formulė yra redaguota, formulė yra nustatyta iš teorinių pasvarstymų apie armatūros sukibimo elgseną.

$$w = k(\phi / \varphi) \varepsilon ; \quad (1.1)$$

čia  $w$  – elemento plyšio plotis (gali būti įvairiai išreikštas);  $k$  – koeficientas nusakantis armatūros tipą (armatūros sukibimą su betonu);  $\phi$  – armatūros strypų diametras;  $\varphi$  – armavimo koeficientas (apskaičiuojamas įvairiausiais būdais);  $\varepsilon$  – elemento deformacija (apskaičiuojama įvairiais būdais).

Betono įtempių pasiskirstymas po pirmojo plyšio atsiradimo ar prieš pradedant formuotis antram plyšiui pavaizduotas 4 pav. Dydis  $S_0$  yra jėgos perdavimo ilgis, kuris priklauso nuo armatūros sukibimo su betonu išilgai armatūros strypų. Kai ilgis  $S_0$  tolsta nuo plyšio, jėgos, veikusios betone, turi būti lygios betono skerspjūvio plotui, padaugintam iš tempimo įtempių betone  $f_{ct}$ . Ši jėga turi būti perduodama armatūrai, kuri visiškai perima tempimo jėgą plyšio vietoje, o per visą  $S_0$  ilgį, tempimo įtempiai pasiskirsto betone ir armatūroje tolygiai.

$$A_c f_{ct} = \pi \phi \int_0^{S_0} \tau_x dx ; \quad (1.2)$$

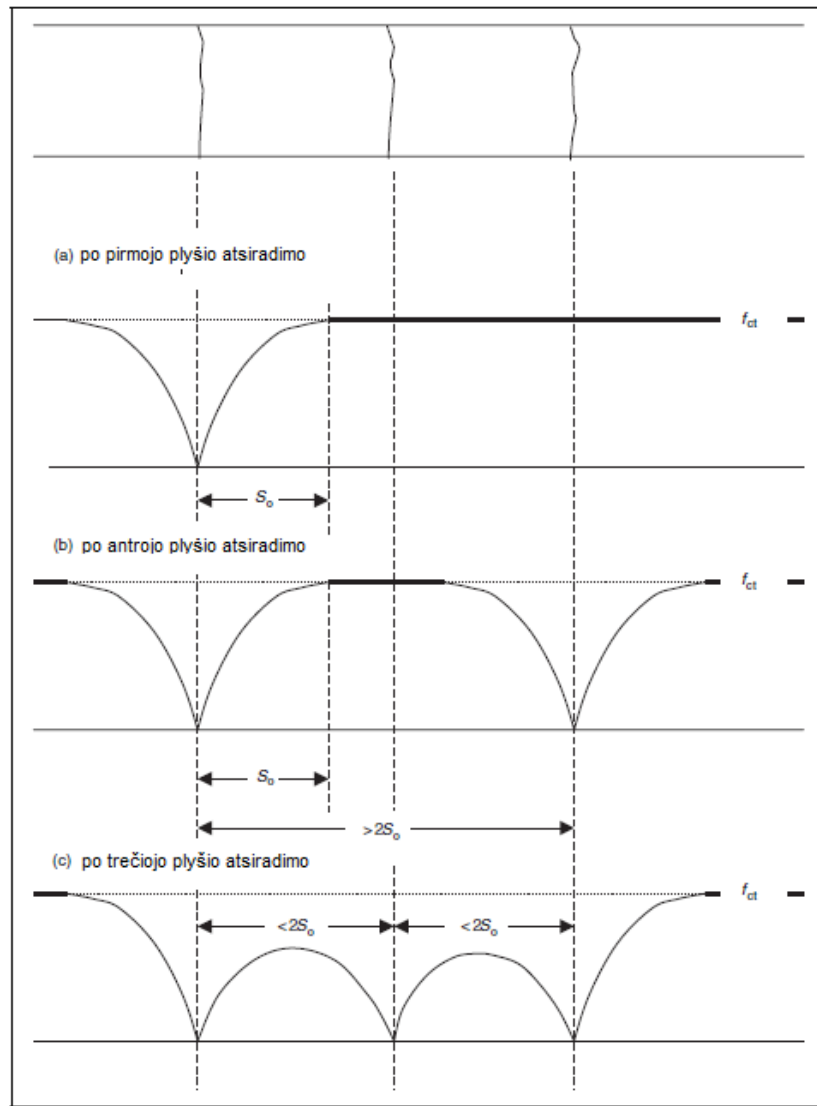
Tolesnei šio ryšio apžvalgai būtina priimti tam tikras prielaidas. Nepalankiausias atvejis yra tas, dėl kurio atsiranda didelis deformacijų netolygumas tarp armatūros ir betono, esančio prie atsiradusio plyšio, tada, kai betonas atsiskiria nuo armatūros ir armatūra praslysta. Armatūros praslydimas mažėja didėjant atstumui nuo plyšio ir bus lygus nuliui  $S_0$  pabaigoje, nutolus nuo plyšio. Iš to daroma išvada, kad tam tikrame jėgos perdavimo atstumo  $S_0$  taške tangentiniai įtempiai pasiekia didžiausią kerpamąjį stiprį. Taigi įvertinus šią prielaidą, formulė (1.2) gali būti užrašoma ši taip:

$$A_c f_{ct} = \pi \phi \beta \tau_{\max} S_0 ; \quad (1.3)$$

arba

$$S_0 = \frac{A_c f_{ct}}{\beta \pi \phi \tau_{\max}} ; \quad (1.4)$$

čia  $\beta$  – integracijos koeficientas;  $\varphi$  – armavimo procentas  $= \frac{A_s}{A_c}$ ;  $\tau_x$  – tangentiniai įtempiai  $x$  atstumu nuo plyšio;  $\tau_{\max}$  – didžiausiais leistinas kerpamasis stipris;  $f_{ct}$  – tempiamasis betono stipris;  $A_s$  – armatūros plotas;  $A_c$  – betono plotas.



**4 pav.** Betono įtempių pasiskirstymas išilgai tempiamos armatūros

Bet koks nežymus apkrovos padidėjimas formuoja antrą plyšį. Šis plyšys nesiformuos  $S_0$  atstume nuo pirmojo plyšio tol, kol įtempiai betone nuo jau esančio plyšio nenukris žemiau tempiamojo betono stiprio. Naujas plyšys gali formotis bet kurioje elemento vietoje, tačiau atstumas tarp plyšių negali būti mažesnis nei  $S_0$ . Plyšiai vienas paskui kitą gali formotis tol, kol lieka vietos jiems formotis elemente, kai įtempiai nebegali mažėti – pleišėjimas nusistovi, toks supleišėjusio elemento modelis vadinamas nusistovėjusiu pleišėjimo modeliu. Kai atstumas yra šiek tiek didesnis nei  $2S_0$  ir jei betonas dar pasiekia  $f_{ct}$  ribą, plyšiai gali toliau formotis (žr. 4 b pav.). Jei plyšys atsiranda šiek tiek mažesniame atstume nei  $2S_0$  tarp plyšių - įtempiai betone mažesni nei  $f_{ct}$  visuose elemento taškuose tarp plyšių (žr. 4 c pav.). Taigi, maksimalus plyšio išdėstymas  $2S_0$ . Nusistovėjusio pleišėjimo modelis užrašomas taip:

$$S_0 \leq S \leq 2S_0; \quad (1.5)$$

čia  $S$  - atstumas nuo bet kurio plyšio.

Plyšio plotis gaunamas paprastai: iš armatūros pailgėjimo atėmus betono pailgėjimą tarp plyšių. Formulė maksimaliam plyšio pločiui gali būti užrašoma taip:

$$w_{\max} = 2S_0(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) = 2k' \left( \frac{f_{ct}}{\tau_{\max}} \right) \left( \frac{\phi}{\rho} \right) (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}); \quad (1.6)$$

Formulė išvesta remiantis eksperimentiniais tyrimais, kurie parodė, kad armatūros ir betono sukibimo stipris yra tiesiogiai proporcingas tempiamo betono stipriui. Tai leidžia (1.6) lygtį supaprastinti iki:

$$w_{\max} = k \left( \frac{\phi}{\rho} \right) (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}); \quad (1.7)$$

Lygtyje (1.1) deformacijų skirtumas  $(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm})$  buvo išreikštas kaip supaprastinta deformacija  $\varepsilon$ .  $\varepsilon_{cm}$  vertės yra mažos, palyginant su  $\varepsilon_{sm}$ , ir kartais ignoruojamos. Norint taikyti šią formulę (1.7), armavimo procentas  $\rho$  yra pakeičiamas efektyviuoju armavimo procentu  $\rho_{eff}$ .  $\rho_{eff}$  vertinimas leidžia įvertinti atstumą tarp armatūros strypų ir tempiamoje elemento zonoje veikiančias vidines jėgas [5].

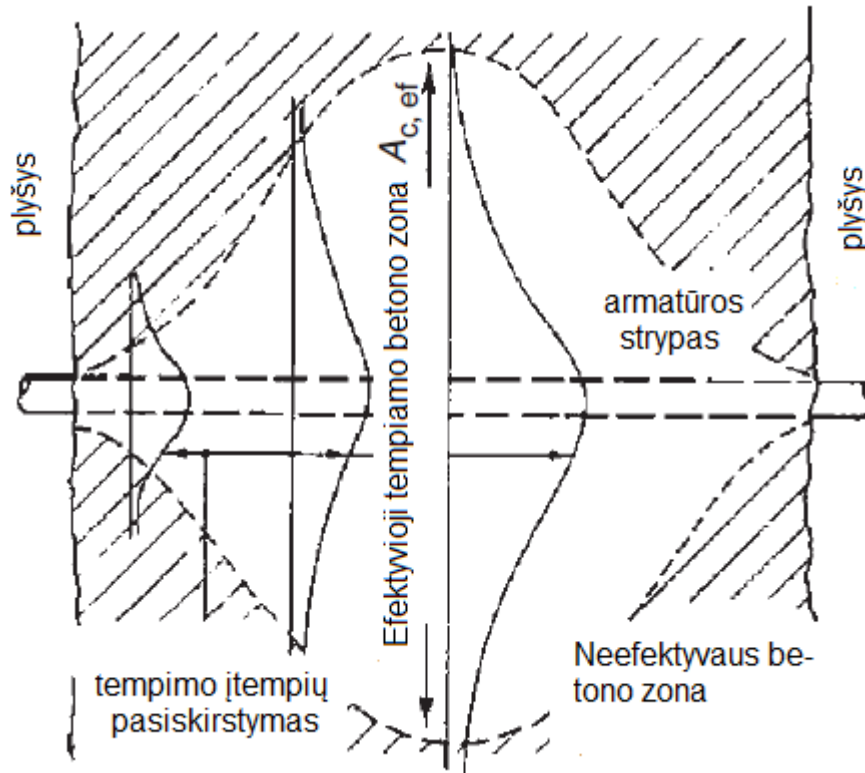
## 1.2. Tempiamo betono įtaka plyšių atsiradimui

Gelžbetoninių sijų ar plokščių armatūros strypai betonuojami kuo arčiau elemento tempiamojo paviršiaus, kad būtų galima efektyviai panaudoti elemente veikiančias vidines jėgas, t.y. kuo armatūros strypų tempimo jėgos petys didesnis, tuo efektyviau panaudojamas vidinių jėgų darbas elemente. Tempiamas betonas įvairiose elemento vietose veikia nevienodai. Todėl efektyvusis tempiamo betono plotas  $A_{c,ef}$  gali būti skaičiuojamas atsižvelgiant į zoną aplink tempiamos armatūros strypus, kuri nesutampa su zona, einančia po neutraliąją ašimi (apibūdinama kaip tempiamas betonas). Dažniausiai  $A_{c,ef}$  turi tuos pačius tempimo centrus kaip ir tempama armatūra.  $A_{c,ef}$  yra netiesinės betono stiprio funkcijos, elemento geometrijos, armavimo koeficiento, armatūros sukibimo parametru, plieno su betono tampumų modulių santykių išraiška [8].

$A_{c,ef}$  gali būti išreikštas analitiškai - stačiakampio formos skerspjūviui skaičiuoti parodyta formulė:

$$A_{c,ef} = \left[ f_{\alpha,f}(bd)(d^2 + 4\alpha_e \rho d^2 - 12\alpha_e \rho dh + 12\alpha_e \rho h^2) \right] / \left[ 2f_{ctm}(h)(2\alpha_e \rho d - 2\alpha_e \rho h + d)(3 + \alpha_e \rho - \sqrt{(\alpha_e \rho^2) + 2\alpha_e \rho}) \right] - \alpha_e \rho bh; \quad (1.8)$$

Betono ir armatūros sukibimo ir praslydimo tempiamame betone pasiskirstymas lygus nuliui plyšio vietoje (tada armatūros praslydimas didžiausias) didžiausias pasiskirstymas yra tada, kai praslydimo nėra (žr. 5 pav.)



5 pav. Efektyviojo betono samprata  $A_{c,ef}$

Tempiamo betono efektyvųjį plotą  $A_{c,ef}$  paprastai skaičiuojame pagal supaprastintą skaičiavimo metodą kaip *Euronormose 2* ar *CEB-FIP Model Code 1990*, t.y. pagal stačiakampį skerspjūvį (1.6):

$$A_{c,ef} = 2,5(h - d)b; \quad (1.6)$$

*H. Bergneris (1997)* pasiūlė išplėstą  $A_{c,ef}$  skaičiavimo formulę atsižvelgiant į betono efektyviojo ploto dydžio poveikį, kaip (1.7) formulėje:

$$A_{c,ef} = m(h - d)b; \quad (1.7)$$

čia  $h$  – elemento aukštis;  $d$  – naudingasis elemento aukštis;  $m$  – koeficientas įvertinantis  $A_{c,ef}$  dydį, skaičiuojamas pagal (1.8 a-c) formules;

$$\text{Jei } 0 \leq h/(h - d) \leq 5; \quad \text{tai: } m = h/(h - d); \quad (1.8 \text{ a})$$

$$0 < h/(h - d) \leq 35; \quad m = 3,33 + 0,33[h/(h - d)]; \quad (1.8 \text{ b})$$

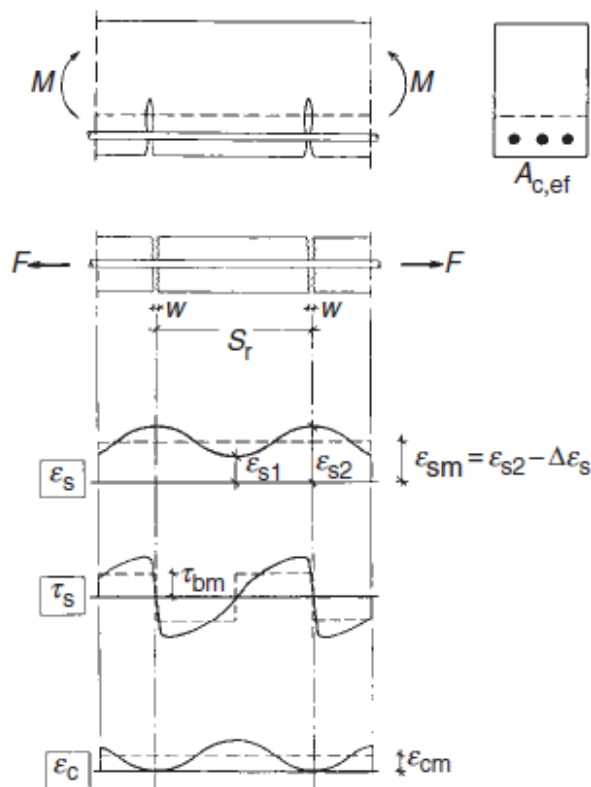
$$h/(h-d) > 35;$$

$$m = 15;$$

$$(1.8 c)$$

### 1.3. Tempiamosios zonos sustandėjimas

Daugybę įvairių armatūros praslydimo skaičiavimo ir vertinimo metodikų yra publikavę autoriai *Ganas (2000)*, *Banholzeris ir kt. (2005)*, ir *Dominguezas (2005)*, tačiau mažai iš šių autorių pateikia elemento armatūros praslydimą supleišėjusiame elemente (*G.Kaklauskas 2004*, *Au, Bai 2007* and *Nayal, Rasheed 2006*).[...]



6 pav. Deformacijų ir tangentinių įtempių pasiskirstymas ties armatūra

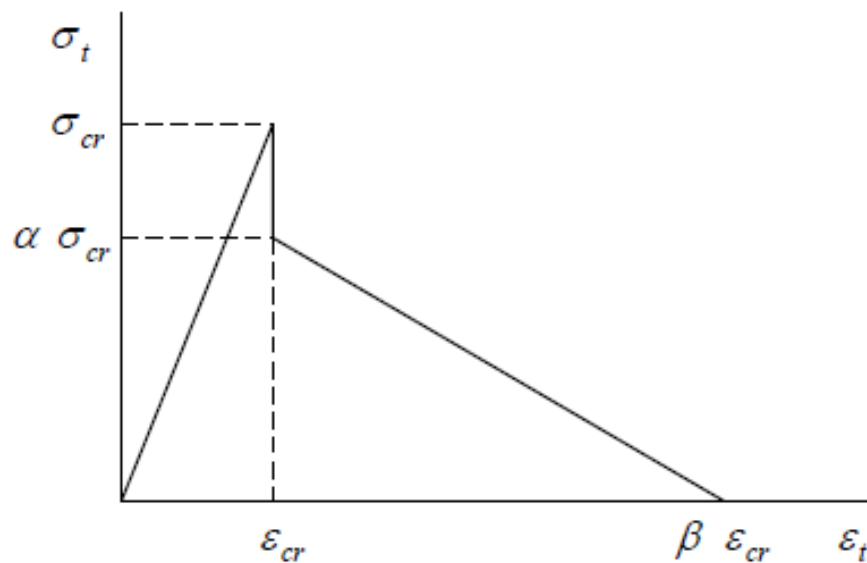
Kompozitinėse konstrukcijose neišvengiami reiškiniai: elemento pleišėjimas, tempiamos zonos sustandėjimas ir armatūros praslydimas. Pleišėjimas betone yra susijęs ir plinta vienu pagrindiniu principu - tempiamas betonas viršija tempimo įtempius. Bet ir atsiradus plyšiams betonas vis dar gali atlaikyti elementą veikiančias apkrovas. Žinoma, kad tempimo jėgas plyšyje atlaiko tik armatūra. Tarp atsivėrusių plyšių dalis tempimo jėgų yra perduodamų į betoną. Armatūros ir betono deformacijos pradeda kisti išilgai armatūros ašiai. Betonu dengtų armatūros strypų deformacijos yra mažesnės nei armatūros deformacijos plyšio vietoje, kur armatūra praslysta. Betono darbą tarp plyšių gali nulemti didėjantis tempiamos armatūros stiprumas. Šis efektas vadinamas tempimo zonos sustandėjimas (angl. tension stiffnig). Kitaip tariant, armatūros tamprumo modulis pastebimai išauga. Tarp dviejų plyšių vidutinės armatūros

deformacijos gali būti apibrėžiamos taip:

$$\varepsilon_{sm} = \varepsilon_{s2} - \Delta\varepsilon_s; \quad (1.9)$$

6 pav. pavaizduotas supleišėjęs gelžbetoninis stačiakampio skerspjūvio elementas. Kai tik kreivio įtaka nevertinama, dalis tempiamo betono zonos gali būti išskirta kaip efektyvi tempiamo betono zona. Armatūros deformacijos, kaip ir betono, pasiskirsto išilgai elemento (žr. 6 pav).

Tempiamo betono elgsena gelžbetoniniuose elementuose dažnai modeliuojama pagal įtempių ir deformacijų sąryšį (žr. 7 pav.).



7 pav. Tempiamo betono vidutinių įtempių – deformacijų diagrama (G.Kaklauskas 2004)

#### 1.4. Atstumas tarp plyšių

Kaip jau žinoma, iki pleišėjimo stadijos, plyšiai formuojasi nepriklausomai vienas nuo kito ir atsiranda silpniausioje lenkiamo elemento vietoje. Siekiant nustatyti galimų plyšių atsiradimo vietą, jų skaičių bei dydį, reikia panagrinėti atstumus tarp plyšių.

Minimalų atstumą tarp plyšių ( $s_{r0}$ ) galima išreikšti per elemento deformacijas (žr. 1.10 formulę), minimalus atstumas tarp plyšių nusako mažiausią atstumą nuo jau esančio plyšio iki kito plyšio, t.y. iki tos vietos, kur betono įtempiai viršija leistinus. Minimalus atstumas tarp plyšių yra pastovus dydis, priklausantis nuo betono stiprio ir armavimo būdo. Kai elementas armuotas vienu ar daugiau armatūros strypų, minimalus normalinių plyšių atstumas išreiškiamas 1.10 formule:

$$s_{r0} = \frac{f_{ctm}\phi_s}{4\tau_{bm}\rho_{ef}} = \left( \frac{f_{ctm}A_{c,ef}}{\tau_{bm}\sum u} \right); \quad (1.10)$$

čia  $f_{ctm}$  - vidutinis tempiamasis betono stipris;  $\phi_s$  - armatūros skersmuo;  $\tau_{bm}$  - tangentiniai įtempiai armatūroje;  $\rho_{ef}$  - efektyvusis armavimo koeficientas;  $A_{c,ef}$  - efektyvusis tempiamo betono plotas;  $\sum u$  - armatūros strypų perimetras.

Panagrinėjus 6 pav., jei  $s_r \geq 2s_{r0}$  - naujas plyšys gali atsiverti tarp jau egzistuojančių dviejų plyšių. Bet jei  $s_r < s_{r0}$ , naujas plyšys tarp jau esančių plyšių atsirasti negali. Tai reiškia, kad atstumai tarp plyšių turėtų atsirasti tarp  $s_{r,min} = s_{r0}$  ir  $s_{r,max} = 2s_{r0}$  reikšmių. Vidutinių atstumų tarp plyšių reikšmės įvairūs autoriai pateikia skirtingai:

- $s_{rm} = 1,3s_{r0}$  (Bigaj, 1999);
- $s_{rm} = 1,33s_{r0}$  (Park - Paulay, 1975; Rizkalla – Hwang, 1984);
- $s_{rm} = 1,4s_{r0}$  (Janovic - Kupfer, 1986);
- $s_{rm} = 1,5s_{r0}$  (Noakowski, 1985; Bruggeling, 1991; MC90, 1993).

Maksimalūs atstumai tarp plyšių gali būti išreikšti:

$s_{r,max} = 2s_{r0}$  (Park - Paulay, 1975; Rizkalla – Hwang, 1984, MC90, 1993; Alvarez, 1998; Bigaj, 1999).

Taigi, minimalaus ar vidutinio atstumo tarp plyšių santykio su maksimaliu atstumu tarp plyšių išraiška:

$$\frac{s_{r,min}}{s_{rm}} = 0,67 \text{ iki } 0,77; \quad (1.11)$$

$$\frac{s_{r,max}}{s_{rm}} = 1,33 \text{ iki } 1,54; \quad (1.12)$$

Nors Rüschas-Rehmas 1964 metais pasiūlė minimalaus atstumo tarp plyšių santykį su maksimaliu atstumu tarp plyšių, šią išraišką galima užrašyti šitaip:

$$\frac{s_{r,max}}{s_{rm}} = 1,3 \text{ iki } 2,3; \quad (1.13)$$

$$s_{rm} = \alpha \cdot s_{r0} = \alpha \cdot k \frac{\phi_s}{\rho_{ef}} = A \cdot \frac{\phi_s}{\rho_{ef}}. \quad (1.14)$$

čia  $\alpha$  - vidutinio ir minimalaus atstumo tarp plyšių santykis;  $k$  - vidutinio tempiamo betono stiprio ir tangentinį įtempį armatūroje santykis;  $A$  -  $\alpha k$ .

Iš (1.14) išraiškos matome, kad vidutinis atstumas tarp plyšių ( $s_{rm}$ ) priklauso tik nuo dviejų parametru: armatūros strypų skersmens ir efektyviojo armatūros armavimo koeficiento ( $\varphi_{ef}$ ). Ši išraiška tinka tik koncentriškai armuotam elementui.

Literatūroje aprašytų eksperimentų duomenys parodė, kad normalinių plyšių atstumams įtakos turi apsauginio betono sluoksnio storis ir atstumas tarp armatūros strypų. 1.1 lentelėje, esančioje A priede, pateiktos įvairių autorių siūlomos vidutiniam atstumui tarp plyšių skaičiuoti formulės. 1.1 lentelėje (priedas A) taip pat pateikta  $s_{rm}$  tiesinio skaičiavimo išraiška:

$$s_{rm} = A_1 + A_2c + A_3s + A_4\phi_s + A_5 \times \frac{\phi_s}{\rho_{ef}}; \quad (1.15)$$

Netiesinio skaičiavimo išraiška:

$$s_{rm} = f\left(c, s, \phi_s, \frac{\phi_s}{\varphi_{ef}}, \sigma_s, \dots\right); \quad (1.16)$$

Vidutinio atstumo tarp plyšių santykis su maksimaliu atstumu tarp plyšių, gali būti išreikštas:

$$\frac{s_{rm}}{s_{r,max}} = \left[1 - 0,5 \sqrt{1 - \left(\frac{M_r}{M}\right)^t}\right]. \quad (1.17)$$

čia  $t = 1 + 2,5/\varphi[\%]$ .

## 1.5. Plyšio plotis

Kai elemente nebeatsiranda naujų plyšių, plyšių atstumai nusistovi, vienintelis kintamasis tampa plyšio plotis, kuris keičiasi priklausomai nuo apkrovų. Plyšio dydis priklauso nuo armatūros išdėstymo ir jos vietos elemente. Paprastai kai norima apibrėžti plyšio pločio dydį, vertinamas plyšio plotis, esantis elemento paviršiuje ties tempiama armatūra. Laikomasi nuomonės, kad plyšio plotis elemento paviršiuje yra lygus plyšio pločiui ties armatūra, net jei šios dvi reikšmės ir nesutampa.

Pasaulyje pateikiama daug galimų plyšio pločio skaičiavimo modelių. Galiojantys skaičiavimo metodai gali būti skirstomi į:

- Analitinį plyšio pločio skaičiavimo metodą, kur sprendžiama diferencialinė (fizikinė) armatūros praslydimo lygtis.
- Pusiau analitinį skaičiavimo metodą. Modelis skaičiuojamas vertinant tangentinius įtempius arba elemento deformacijas. Plyšio plotis taip pat gali būti išreikštas:

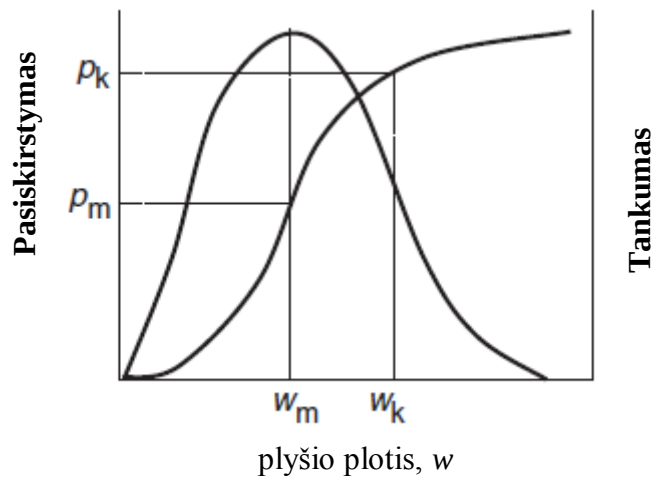
$$w_k = \beta w_m = \beta s_{rm} \varepsilon_{sm,r}; \quad (1.18)$$

arba

$$w_k = s_{r,\max} \varepsilon_{sm,r}; \quad (1.19)$$

- Remiantis atliktų bandymų duomenimis, detaliai ar apytiksliai išreikštu atstumu tarp plyšių ir vidutinėmis armatūros deformacijomis.
- Baigtinių elementų skaičiavimo metodą, tiesiogiai ir netiesiogiai vertinant plyšį.

1.2 lentelėje, esančioje A priede, pateiktos pagrindinės ir labiausiai taikomos plyšio pločio skaičiavimo formulės (charakteristinis plyšio plotis 95 % atitinka plyšio plotį gaunamą eksperimentiškai) [8]. Išsamesni tyrimai ir skaičiavimai parodė, kad plyšio pločio dydžio rezultatai skiriasi net kelis kartus taikant skirtingas skaičiavimo lygtis. Eksperimentiniu būdu gauti rezultatai gali būti užrašomi matematiniu algoritmu. Šiuo atveju, maksimalus plyšio plotis tampa reikšmingesnis, nes numanomo plyšio pločio reikšmė gali viršyti plyšio pločio charakteristinę reikšmę.



**8 pav.** Vidutinių ir charakteristinių plyšio pločio reikšmių kreivės

Jei galima priimti, kad plyšio plotis skaičiuojamas per matematines priklausomybes, tai koeficientas ( $\beta$ ) priklausantis nuo charakteristinio ir vidutinio plyšio pločio gali būti išreikštas:

$$\beta = \frac{w_k}{w_m}; \quad (1.20)$$

Teoriškai  $\beta$  galima išreikšti ir šitaip:

$$\frac{w_m}{w_{\max}} = \frac{s_{rm}}{s_{r,\max}} \left\{ \frac{M_r}{M} - 0,33 \left[ 3 \left( \frac{s_{rm}}{s_{r,\max}} \right) - \left( \frac{s_{rm}}{s_{r,\max}} \right)^2 \right] \right\} / \left( \frac{M_r}{M} - 0,67 \right); \quad (1.21)$$

*CEB-FIP Model Code 1990* rekomenduoja tiesioginį skaičiavimo būdą charakteristiniam plyšio pločiui skaičiuoti ir jis nevertina charakteristinio ir vidutinio plyšio pločio santykio ( $\beta$ ) (žr. 1.2 lentelę), bet kokių atveju,  $\beta$  galima nustatyti. *MC90* siūlo skaičiavimo modelį pateiktą 1.22 ir 1.23 formulėse charakteristiniam plyšio pločiui skaičiuoti:

$$w_k = s_{r,\max} \cdot \varepsilon_{sm,r}; \quad (1.22)$$

$$\text{čia } s_{r,\max} = \frac{\phi_s}{3,6\rho_{ef}};$$

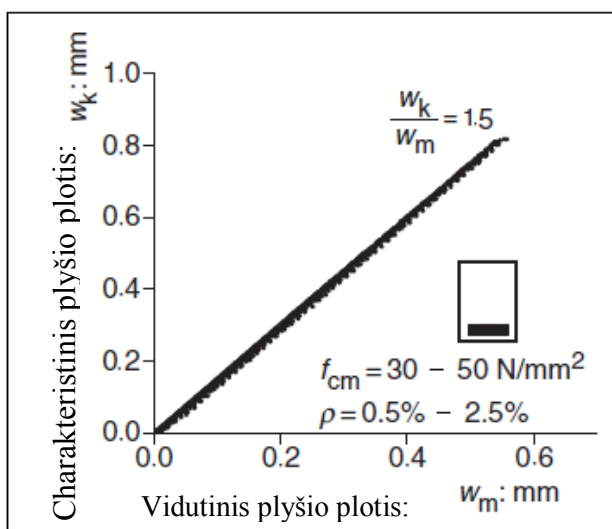
$$\varepsilon_{sm,r} = \frac{\sigma_{s2}}{E_s} - 0,6 \frac{f_{ctm(t)}}{\rho_{ef} E_s} (1 + \alpha_e \rho_{ef}).$$

$$w_m = s_{rm} \cdot \varepsilon_{sm,r}; \quad (1.23)$$

$$\text{čia } s_{rm} = \frac{2}{3} s_{r,\max} = \frac{2}{3} \frac{\phi_s}{3,6\rho_{ef}};$$

$$\varepsilon_{sm,r} = \frac{\sigma_{s2}}{E_s} - 0,6 \frac{f_{ctm(t)}}{\rho_{ef} E_s} (1 + \alpha_e \rho_{ef}).$$

1.22 ir 1.23 formulės įvertina betono savybes ir armavimo procentą (žr. 9 pav.).

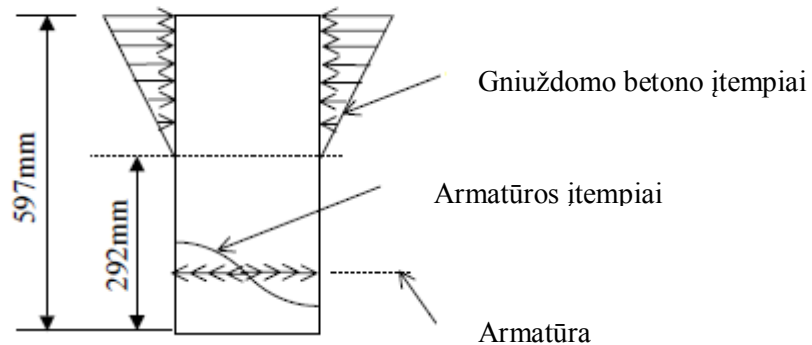


**9 pav.** Maksimalių ir vidutinių plyšio pločio reikšmių santykių kreivė (*MC90*)

9 pav. pavaizduotas stačiakampio skerspjuvio gelžbetoninis elementas, kurio gniuždomasis betono stipris siekia nuo 30 MPa iki 50 MPa, o armavimo procentas nuo 0,2 iki 2,5 %. Taigi pagal *MC90* skaičiavimo metodą - vidutinis plyšio pločio santykis yra 1,5 nepriklausomai nuo betono stiprio ir armavimo procento.

### 1.6. Veiksniai, lemiantys plyšio pločio dydį

Tarp tyrėjų vyrauja susitarimas, kad plyšio pločio dydis priklauso nuo armatūros įtempių  $f_s$  plyšio atsivėrimo vietoje ir armatūros deformacijų  $\varepsilon_s$ . Tai rodo ir anksčiau pateiktos plyšio pločio skaičiavimo išraiškos. Yra nustatyta, kad betono stipris neturi pastebimos reikšmės plyšio pločiui, tačiau *Venkateswarlu'as* ir *Gesundas (1972)* siūlo tokią formulę pateiktą (1.25), kur betono stipris išreikštas per tamprumo modulį  $n$ .



**10 pav.** Stačiakampio gelžbetonio schema pagal *Venkateswarlu'as* ir *Gesundas (1972)*

Maksimalus atstumas tarp plyšių:

$$s_{\max} = \frac{14,5\phi}{1 + n\rho_m} \quad (1.24)$$

Maksimalus plyšio plotis:

$$w_{t,\max} = \frac{2,4 \times 10^{-5} \phi (1462 f_s) f_s}{(1 + n\rho_m)(662 - f_s)} \quad (1.25)$$

čia  $n = \frac{E_s}{E_c}$  – atitinkamai armatūros ir betono tamprumo modulių santykis;  $\phi$  – armatūros

skersmuo;  $\rho_m$  – efektyvus armavimo procentas;  $f_s$  – armatūros stipris.

Bet kuriuo atveju, nėra vienos pagrindinės išraiškos gelžbetonio pleišėjimui skaičiuoti, kurios turi laikytis tyrėjai ar kokius parametrus vertinti, kad teorinis plyšio plotis kuo mažiau skirtųsi nuo eksperimentinio.

*Gergely ir Lutzas (1968)* teigia, kad charakteristiniai gelžbetonio plyšių pločio skaičiavimuose naudojami parametrai, kurie tiesiogiai veikia elementą ir tie, kurie neturi tiesioginio poveikio elementui, kelis kartus skiriasi vieni nuo kitų ir sukelia dideles tyrėjų diskusijas. Kadangi vienos skaičiavimo formos nėra, naudojami skirtingi metodai (priklausomai

nuo skaičiavimo normų), tačiau pagrindiniai plyšio pločio vertinimo kriterijai išlieka, t.y. armatūros skersmuo, armavimo procentas, apsauginis betono sluoksnis.

### ***Apsauginio betono įtaka***

Iš anksčiau pateiktų formulių galima spręsti, kad didesnis betono apsauginis sluoksnis gelžbetonyje, tuo platesni plyšiai veriasi. Nepaisant šio fakto, apsauginis betono sluoksnis nemažinamas, nes šis dydis laikomas praktiškiausia priemone apsaugoti armatūrą nuo korozijos. Norėdami ištirti betono sluoksnio įtaką pleišėjimui *Makhloufas ir Malhasas (1996)* atliko 16 skirtingais apsauginio betono sluoksnio storiais betonuotų gelžbetoninių sijų bandymus. Šių bandymų rezultatai parodė, kad apsauginis betono sluoksnis 16 % lemia plyšio pločio dydį. Užbetonuotų sijų apsauginis betono sluoksnis siekė nuo 30 mm iki 60 mm. Vis dėlto, *ACI 318 (1995)* ir *BS8110 (1985)* normose teigiama, jog apsauginis betono sluoksnis net 80 % lemia plyšio pločio dydį (šios normos perimtos *Gegley ir Lutzo (1968)* ir *Beeby (1979)* skaičiavimo modeliais). *Froschas (1999)* atliko bandymus, vertinančius *Gegley ir Lutzo (1968)* skaičiavimo metodą, eksperimento metu apsauginis betono sluoksnis buvo padidintas iki 65 mm ir *Froschas (1999)* priėjo išvadą, kad kai betono apsauginis sluoksnis viršija 65 mm, *Gegley ir Lutzo (1968)* pasirinktos formulės (jomis paremtos ir *ACI 318 (1995)*) yra abejotinos.

**1.1 lentelė.** Minimalūs apsauginio betono sluoksniai siūlomi įvairių normų.

| <b>Normos</b>        | <b>Mažiausias leistinas apsauginis betono sluoksnis, mm</b> |
|----------------------|-------------------------------------------------------------|
| ACI 318              | 50                                                          |
| Austrų               | 20                                                          |
| Belgų                | 40                                                          |
| Kanados              | 60                                                          |
| CEB – FIP Model Code | 30                                                          |
| Danų                 | 35                                                          |
| Prancūzų             | 40                                                          |
| Vokiečių             | 35                                                          |
| Nyderlandų           | 40                                                          |
| Norvegų              | 50                                                          |
| Švedų                | 45                                                          |
| Šveicarų             | 35                                                          |
| UK                   | 60                                                          |
| USSR                 | 30                                                          |

### *Armavimo procento ir armatūros skersmens įtaka*

Armavimo koeficiento ir armatūros diametro parametrų niekas atskirai nevertina. Būtų sunku atlikti bandymus, kur atskirai vertinamas armatūros procentas ar armatūros strypų dydis. *Kaaras (1968)* teigia, kad tokių eksperimentinių tyrimų gauti duomenys, kai šie du dydžiai vertinami atskirai, per daug skiriasi, lyginant su įvairiai tyrėjų bandymais. Tokių eksperimentų rezultatai gali būti klaidingi, o išvados dėl santykinės svarbos kai kurių kintamųjų netikslios.

Ankščiau minėto *Makhloufo* ir *Malhaso (1996)* eksperimento tyrimo išvados rodo, kad armavimo koeficiento ir armatūros strypų skersmens dydis neturi būti vertinami kartu. Jie priėjo prie išvados, kad naudojami įvairūs armavimo koeficientai ( $0,0031$ ,  $0,0056$ ,  $0,0087$  ir  $0,0138$ ), neturėjo didelės įtakos plyšio pločio dydžiui, bet atitinkamai skyrėsi ir armatūros strypų skersmenys ( $12$ ,  $16$ ,  $20$  ir  $25$  mm), kurie buvo susieti su pirmiau išvardintais armatūros armavimo koeficientais. Tokių eksperimentų rezultatai ginčytini, galima teigti, kad mažesnį plyšio plotį lemia aukštesnis armavimo procentas, kuris priklauso nuo armatūros strypo dydžio, dėl kurių parametrų kaita tampa nepastebima. Galima dviprasmiškai vertinti rezultatus, nes nėra tiesioginio poveikio šioms parametrų vertinti.

### *Sijos aukščio įtaka*

Sijos aukštis daugumos tyrėjų plyšio pločio ir atstumo tarp plyšių pagrindiniuose skaičiavimuose nebuvo vertinamas, vienintelis *Clarkas (1956)* sijos aukštį ir efektyvųjį sijos aukštį įtraukė į prognozuojamo plyšio pločio skaičiavimo formulę (1.26):

$$w_{t,ave} = 1,29 \times 10^{-6} \left( \frac{h-d}{d} \right) \phi \left[ 2,56 f_s - \left( \frac{1}{\rho} + 8 \right) \right]; \quad (1.26)$$

čia  $d$  – efektyvusis sijos aukštis;  $h$  – sijos aukštis;  $\phi$  – armatūros skersmuo;  $\rho$  – armavimo procentas;  $f_s$  – armatūros stipris.

Visuose kituose skaičiavimo išraiškose vertinama zona plyšių atsivėrimo vietoje, t.y. tempiamo betono zonos aukštis iki neutraliosios ašies, nevertinant gniuždomo betono zonos. Gniuždymo jėgos, veikiančios virš neutraliosios ašies, turi tam tikros įtakos betono tempimo įtempiams, kurie veikia armatūros lygyje, taip darydami poveikį ir atstumui tarp plyšių bei plyšio pločiui, tačiau jie skaičiavimuose neįvertinami.

### ***Apkrovos tipo poveikis***

Visos plyšių prognozavimo formulės buvo išvestos iš analitinių ir eksperimentinių tyrimų vertinant ir analizuojant grynojo lenkimo zoną. Gautos formulės naudojamos įvairiems apkrovimo tipams skaičiuoti, darant prielaidą, kad jos vienodai veikia grynojo lenkimo zoną, nors šis teiginys nebuvo įrodytas. Plačiau žr. [30].

### **1.7. Vidutinių atstumų tarp plyšių skaičiavimo modeliai**

Šiame poskyryje, kaip ir praėjusiame, pateiktos įvairių autorių ir gelžbetoninių konstrukcijų projektavimo normų atstumo tarp plyšių skaičiavimo metodai pagal kurių rezultatus 4 skyriuje pateikti vidutinių atstumų tarp plyšių teoriniai skaičiavimo rezultatai, ir šių duomenų rezultatai palyginimas su eksperimentiniais duomenimis.

#### ***Euronormų (1992) metodas***

Euronormų siūloma vidutinio atstumo tarp plyšių skaičiavimo formulė [15]:

$$s_{rm} = 50 + 0,25k_1k_2 \frac{\phi_s}{\rho_{ef}}; \quad (1.61)$$

čia  $\phi_s$  - armatūros skersmuo;  $k_1$  - koeficientas įvertinantis armatūros tipą, ( $k_1 = 0,8$  – rumbuota);  $k_2$  - koeficientas įvertinantis sijos apkrovimo tipą, ( $k_2 = 0,5$  – lenkiamą);  $\rho_{ef}$  - efektyvusis armavimo procentas.

#### ***Bromso metodas***

Šis autorius siūlo tokią vidutinio atstumo tarp plyšių skaičiavimo formulę [11]:

$$s_{rm} = 2 \left( c + \frac{\phi_s}{2} \right); \quad (1.62)$$

čia  $\phi_s$  - armatūros skersmuo;  $c$  – apsauginis betono sluoksnis.

#### ***SP (2003) metodas***

Rusų projektavimo normų siūloma vidutinio atstumo tarp plyšių skaičiavimo formulė [36]:

$$l_s = 0,5 \frac{A_{bt}}{A_s} d_s; \quad (1.64)$$

čia  $A_{bt}$  - tempiamo betono plotas;  $A_s$  - armatūros plotas;  $d_s$  - armatūros diametras.

### ***JSCE metodas***

Japonų projektavimo normų siūloma vidutinio atstumo tarp plyšių skaičiavimo formulė [24]:

$$s_{rm} = k[4c + 0,7(s - \phi_s)]; \quad (1.65)$$

čia  $\phi_s$  - armatūros skersmuo;  $c$  – apsauginis betono sluoksnis;  $k$  - koeficientas įvertinantis armatūros tipą, ( $k_1 = 0,8$  – rumbuota);  $s$  – atstumas tarp armatūros strypų.

### ***CEB-FIP Model code (1990) modelis***

Amerikiečių projektavimo normų siūloma vidutinio atstumo tarp plyšių skaičiavimo formulė:

$$s_{rm} = \frac{2}{3} \times \frac{\phi_s}{3 \cdot 6 \rho_{ef}}; \quad (1.66)$$

čia  $\phi_s$  - armatūros skersmuo;  $\rho_{ef}$  - efektyvusis armavimo procentas.

### ***Holmbergo modelis***

Šis autorius siūlo tokią vidutinio atstumo tarp plyšių skaičiavimo formulę[7]:

$$s_{rm} = 1,65 + 0,56 \sqrt{c \frac{A_{c,ef}}{\sum \phi_s}}; \quad (1.67)$$

čia  $\phi_s$  - armatūros skersmuo;  $A_{c,ef}$  - efektyvusis armavimo procentas;  $c$  – apsauginis betono sluoksnis;

### ***AIJ modelis***

Japonų architektūros instituto siūloma vidutinio atstumo tarp plyšių skaičiavimo formulė [4]:

$$s_{rm} = 2 \left( c + \frac{s}{10} \right) + 0,1 \frac{\phi_s}{\rho_{ef}}; \quad (1.68)$$

čia  $\phi_s$  - armatūros skersmuo;  $\rho_{ef}$  - efektyvusis armavimo procentas;  $c$  – apsauginis betono sluoksnis;  $s$  – atstumas tarp armatūros strypų.

#### ***Farra ir Jaccoudo metodas***

Šių autorių siūloma vidutinio atstumo tarp plyšių skaičiavimo formulė [16]:

$$s_{rm} = 1,5c + 0,12 \frac{\phi_s}{\rho_{ef}}; \quad (1.69)$$

čia  $\phi_s$  - armatūros skersmuo;  $\rho_{ef}$  - efektyvusis armavimo procentas;  $c$  – apsauginis betono sluoksnis;

#### ***Fehlingo ir Königo modelis***

Šių autorių siūloma vidutinio atstumo tarp plyšių skaičiavimo formulė [17]:

$$s_{rm} = \frac{1}{1,7} \left( 30 + \frac{\phi_s}{4\rho_{ef}} \right); \quad (1.70)$$

čia  $\phi_s$  - armatūros skersmuo;  $\rho_{ef}$  - efektyvusis armavimo procentas.

### 1.8. Plyšio pločio skaičiavimo metodai:

Šiame skirsnyje pateiktos įvairių autorių ir gelžbetoninių konstrukcijų projektavimo normų plyšių pločio skaičiavimo metodai pagal kurių rezultatus, 4 skyriuje pateikti plyšio pločio teoriniai skaičiavimo rezultatai, o 4 skyriuje šių duomenų rezultatai lyginami su eksperimentiniais duomenimis.

#### *Euronormų (1992) metodas*

EC2 plyšio pločiui skaičiuoti įvertina maksimalų atstumą tarp plyšių ir tempiamos armatūros deformacijas bei betono darbą tarp plyšių [15].

Pagal euronormas, plyšių plotis skaičiuojamas pagal formulę:

$$w_m = s_{rm}(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}); \quad (1.27)$$

čia  $s_{rm}$  – vidutinis atstumas tarp plyšių;  $\varepsilon_{sm}$  – vidutinė tempiamos armatūros deformacija;  $\varepsilon_{cm}$  – vidutinė betono deformacija tarp plyšių.

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - k_t \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} (1 + \alpha_e \rho_{p,eff})}{E_s} \geq 0,6 \frac{\sigma_s}{E_s}; \quad (1.28)$$

čia  $\sigma_s$  – tempiamos armatūros įtempiai supleišėjusiam pjūvyje;  $k_t$  – koeficientas, įvertinantis apkrovimo ilgalaikiškumą, ( $k_t = 0,6$  – trumpalaikis apkrovimas);  $\alpha_e$  – armatūros ir betono tamprumo modulių santykis;  $\rho_{p,eff}$  – efektyvusis armavimo procentas.

$$\rho_{p,eff} = \frac{A_s}{A_{c,eff}}; \quad (1.29)$$

čia:  $A_s$  – armatūros skerspjūvio plotas;  $A_{c,eff}$  – efektyvus tempiamo betono plotas;

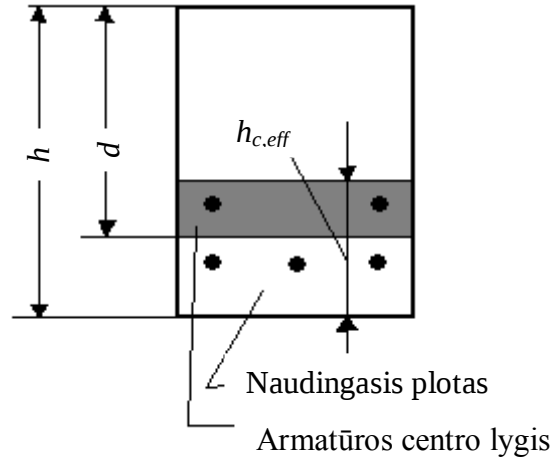
$$A_{c,eff} = b \cdot h_{c,eff}; \quad (1.30)$$

čia:  $h_{c,eff}$  – efektyvaus tempiamo betono ploto aukštis, (žr. Pav.). Efektyviojo tempiamo betono ploto aukštis apskaičiuojamas pagal (1.31); (1.32); (1.33) formules ir (1.30) formulėje naudojama mažiausioji  $h_{c,eff}$  reikšmė;

$$h_{c,eff} = 2,5(h - d); \quad (1.31)$$

$$h_{c,eff} = (h - d) / 3; \quad (1.32)$$

$$h_{c,eff} = h / 2. \quad (1.33)$$



**11 pav.** Efektyvusis tempiamo betono plotas

Kai atstumas tarp armatūros strypų didesnis kaip  $5(c + \phi/2)$ , tai  $s_{r,max}$  skaičiuojamas:

$$s_{r,max} = 1,3(h - x); \quad (1.34)$$

čia  $h$  – sijos aukštis;  $x$  – gniuždomos zonos aukštis.

Kai atstumas tarp armatūros strypų mažesnis arba lygus  $5(c + \phi/2)$ , tai  $s_{r,max}$  skaičiuojamas taip:

$$s_{r,max} = 3,4c + 0,435k_1k_2\phi / \rho_{p,eff}. \quad (1.35)$$

čia  $c$  – betono apsauginis sluoksnis;  $\phi$  – armatūros skersmuo;  $k_1$  – koeficientas, įvertinantis armatūros tipą, ( $k_1 = 0,8$  – rumbuota);  $k_2$  – koeficientas, įvertinantis sijos apkrovimo tipą, ( $k_2 = 0,5$  – lenkiamų).

### **STR 2.05.05:2005 metodas**

Šis metodas normalinius plyšius analizuoja armatūros lygyje, pagal plyšio prasivėrimą elemento paviršiuje [34].

Normalinių plyšių plotis  $w_k$ , apskaičiuojamas pagal formulę:

$$w_k = \delta \varphi_1 \eta \frac{\sigma_s}{E_s} 20(3,5 - 100\rho_1)^{\sqrt[3]{\phi}}; \quad (1.36)$$

čia  $\delta$  – koeficientas įvertinantis elemento apkrovimą, ( $\delta = 1,0$ , kai skaičiuojami lenkiami elementai);  $\varphi_1$  – koeficientas, priklausantis nuo betono drėgnio (STR 2.05.05:2005 žr. 23 lent.);  $\eta$  – koeficientas, priklausantis nuo armatūros tipo, ( $\eta = 1,0$  – rumbuota armatūra);  $\sigma_s$  – tempiamosios armatūros kraštinės eilės strypų įtempiai nuo veikiančios išorinės apkrovos;

$\rho_1$  – elemento skerspjūvio armavimo koeficientas imamas lygus tempiamosios armatūros skerspjūvio ploto ir elemento betoninio skerspjūvio (naudingojo aukščio ribose ir atmetus gniuždomųjų tėjinio skerspjūvio lentynų plotą) santykiui, bet imamas ne didesnis kaip 0,02, skaičiuojamas pagal formulę 1.37;  $\phi$  – armatūros skersmuo.  $\sigma_s$  – tempiamosios armatūros kraštinės eilės strypų įtempiai nuo veikiančios išorinės apkrovos.

Tėjinio, dvitėjinio ir stačiakampio skerspjūvio elementams:

$$\rho_1 = \frac{A_{s1}}{b_w d + (b_{f2} - b_w)(h_{f2} - a_s)} \leq 0,02; \quad (1.37)$$

Tempiamos armatūros įtempiai:

$$\sigma_s = \frac{N_{Ed}(e_s \mp z) - P_d(z - e_{sp})}{A_s z}; \quad (1.38)$$

Dydžio  $e_s$  reikšmė imama su „minuso“ ženklu, jei tempimo jėga  $N_{Ed}$  yra tarp tempiamosios ir gniuždomosios (mažiau tempiamos) armatūros sunkio centrų. Dydis  $e_{sp}$  yra atstumas nuo apspaudimo jėgos pridėties taško iki tempiamosios armatūros sunkio centro.

Jeigu tempiamosios armatūros kraštinės eilės strypų masės centras lenkiamuosiuose ekscentriškai gniuždomuosiuose, ekscentriškai tempiamuosiuose (kai  $e_{o,tot} \geq 0,8d$ , čia  $d$  – skerspjūvio naudingasis aukštis) elementuose yra nutolęs nuo labiausiai tempiamo skerspjūvio sluoksnio atstumu  $a_{1,1} > 0,2h$ , reikšmė  $w_k$  turi būti padidinta, dauginant iš koeficiento

$$\delta_a = \frac{20 \frac{a_{1,1}}{h} - 1}{3} \leq 3; \quad (1.39)$$

Atstumas nuo tempiamos armatūros sunkio centro iki gniuždomos zonos virš plyšio atstojamosios pridėties taško ir apskaičiuojama  $z$  pagal formulę:

$$z = d \left[ 1 - \frac{\frac{h_f}{d} \varphi_f + \xi^2}{2(\varphi_f + \xi)} \right]; \quad (1.40)$$

čia  $\xi$  – santykinis gniuždomosios zonos aukštis, apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\xi = \frac{1}{\beta + \frac{1+5(\delta+\lambda)}{10\rho\alpha_e}} \pm \frac{1,5 + \varphi_f}{11,5 \frac{e_{s,tot}}{d} \mp 5}; \quad (1.41)$$

Gauta reikšmė neturi viršyti vieneto.

Koeficientai  $\delta$ ,  $\lambda$  ir  $\varphi$  apskaičiuojami taip:

$$\delta = \frac{M}{bd^2 f_{ck}}; \quad (1.42)$$

$$\lambda = \varphi_f \left( 1 - \frac{h_f}{2d} \right); \quad (1.43)$$

$$\varphi_f = \frac{(b_{eff} - b_w)h_f + \frac{\alpha_e}{2\nu} A_{s2}}{b_w d}. \quad (1.44)$$

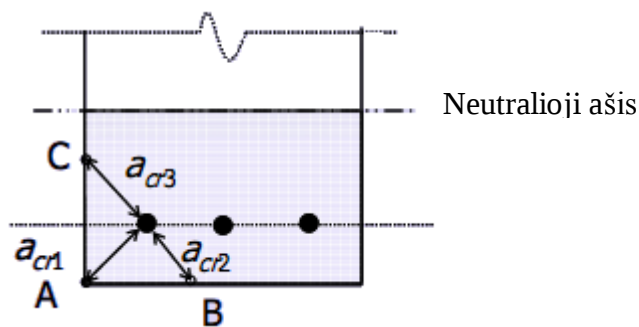
### BS 8110 metodas

Plyšio plotis priklauso nuo apsauginio betono sluoksnio ir nuo vidutinių įtempiamos armatūros deformacijų. Plyšio plotis – priklauso nuo armatūros išdėstymo, taip pat nuo skerspjuvio aukščio ir neutraliosios ašies padėties skerspjuvyje. Skaičiuojamas nuo maksimalaus veikimo momento. Plyšio pločio išraiška pagal britiškas skaičiavimo normas [8]:

$$w_k = \frac{3a_{cr} - \varepsilon_m}{1 + 2 \left[ \frac{a_{cr} - c_{min}}{h - x} \right]}; \quad (1.45)$$

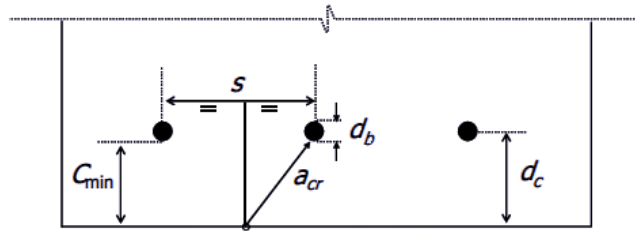
čia  $a_{cr}$  - artimiausias atstumas nuo skerspjuvio krašto iki armatūros;  $\varepsilon_m$  - vidutinė tempiamos armatūros deformacija;  $c_{min}$  - minimalus apsauginis tempiamos armatūros storis;  $h$  – skerspjuvio aukštis;  $x$  – atstumas iki neutraliosios ašies.

Dydžio  $a_{cr}$  nustatymas (žr. 12 pav.):



**12 pav.** Sijos skerspjuvis, kuriame pavaizduotas, trumpiausias atstumas nuo sijos krašto iki armatūros ( $a_{cr}$ )

Dažniausiai  $a_{cr}$  dydis nustatomas  $B$  taško atžvilgiu, kuris yra vienodom dalim atitolęs tarp dviejų armatūros strypų (žr. 13 pav.).



**13 pav.** Parametro  $a_{cr}$  padėtis sijos skerspjūvyje

$$a_{cr} = \sqrt{\left(\frac{s}{2}\right)^2 + d_c^2} - \frac{d_b}{2}; \quad (1.46)$$

čia  $d_b$  – armatūros skersmuo;  $d_c$  – apsauginis betono sluoksnis iki armatūros strypo centro;  $s$  – atstumas tarp armatūros centrų.

Vidutinių deformacijos  $\varepsilon_m$  skaičiavimas:

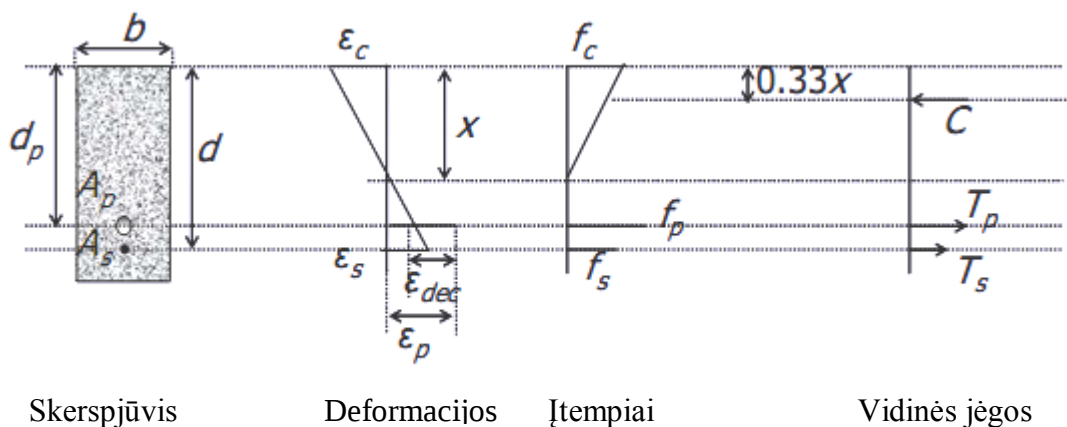
$$\varepsilon_m = \varepsilon_1 - \frac{b_1(h-x)(a'-x)}{3E_s A_s (d-x)}; \quad (1.47)$$

čia  $\varepsilon_1$  – armatūros deformacija, nepaisant jos įtempių;  $E_s$  – armatūros tamprumo modulis;  $A_s$  – armatūros plotas;  $d$  – armatūros skersmuo;  $a$  – atstumas nuo gniuždomos zonos iki plyšio atsiradimo vietos.

$$\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon_s(a-x)}{(d-x)}; \quad (1.48)$$

čia  $\varepsilon_s$  – armatūros santykinė deformacija.

Gniuždomos zonos aukščio nustatymas  $x$  (žr. 14 pav.):



**14 pav.** Stačiakampio skerspjūvio deformacijų ir įtempių schema.

### CEB – FIP Model Code (1990) metodas

Taikant šį metodą plyšio plotis skaičiuojamas pagal formulę:

$$w_k = l_{rm}(\varepsilon_{s2} - \beta \varepsilon_{sr2} - \varepsilon_{cs}); \quad (1.49)$$

čia  $\varepsilon_{cs}$  - betono susitraukimo deformacijos;  $\varepsilon_{sr2}$  - armatūros deformacijos:

$$\varepsilon_{sr2} = \frac{f_{ctm}(t)}{\rho_r E_s} (1 + \alpha \rho_r); \quad (1.50)$$

$f_{ctm}(t)$  - betono tempiamasis stipris, priklausantis nuo plyšio atsivėrimo momento;  $\alpha$  - tamprumo modulių santykis:

$$\alpha = \frac{E_s}{E_c(t)}; \quad (1.51)$$

$\rho_r$  - armavimo koeficientas:

$$\rho_r = \frac{A_s}{A_{cef}}; \quad (1.52)$$

$A_{cef}$  - efektyvioji tempimo zona;  $\varepsilon_{s2}$  - armatūros pleišėjimo deformacijos;  $l_{rm}$  - vidutinis atstumas tarp plyšių, kuris apskaičiuojamas pagal f- lę:

$$l_{rm} = \frac{2}{3} \times \frac{d_b}{3,6 \rho_r}; \quad (1.53)$$

čia  $d_b$  – armatūros skersmuo;

$\beta$  - koeficientas įvertinantis vidutines deformacijas.

$$l_{s,max} = \frac{\sigma_{s2} d_b}{2 \tau_{bk} (1 + \alpha \rho_r)}; \quad (1.54)$$

$\tau_{bk}$  - tangentiniai įtempiai;  $\sigma_{s2}$  - armatūros pleišėjimo įtempiai.

### **ACI 318 metodas**

Plyšio plotis skaičiuojamas pagal formulę [2]:

$$w_k = K \cdot \sigma_{s2} (h - d) \sqrt{1 + \left( \frac{s}{4(h - d)} \right)^2}; \quad (1.55)$$

čia  $K$  - koeficientas lygus 11,0 (žr.[...]);  $\sigma_{s2}$  - armatūros įtempiai;  $h$  - elemento aukštis;  $d$  - efektyvusis elemento aukštis;  $s$  - atstumas tarp armatūros strypų.

### **Ferry – Borgeso metodas**

Šių autorių siūloma plyšio pločio formulė [18]:

$$w_m = \frac{1}{E_s} \left( 1,5c + 0,04 \frac{\phi_s}{\rho} \right) \left( \sigma_{s2} - \frac{7,5}{\rho} \right); \quad (1.56)$$

čia  $\sigma_{s2}$  - tempiamos armatūros įtempiai supleišėjusiame pjūvyje;  $\rho$  - armavimo procentas;  $\phi_s$  - armatūros skersmuo;  $c$  – apsauginis betono sluoksnis;  $E_s$  - armatūros tamprumo modulis.

### ***Gergely – Lutzo metodas***

Plyšio plotis skaičiuojamas pagal formulę [19]:

$$w_k = K \cdot \sqrt[3]{(h-d)A_{c,ef}} \frac{d-x}{h-x} \sigma_{s2}; \quad (1.57)$$

čia  $\sigma_{s2}$  - tempiamos armatūros įtempiai supleišėjusiame pjūvyje;  $K$  - armatūros įtempiai tamprioje – supleišėjusioje stadijoje;  $h$  - atstumų santykis, atstumo nuo neutraliosios ašies iki tempiamosios zonos ir atstumo nuo neutraliosios ašies ir armatūros skerspjūvio centro;  $x$  - atstumų santykis, atstumo nuo neutraliosios ašies iki tempiamosios zonos ir atstumo nuo neutraliosios ašies ir armatūros skerspjūvio centro;

### ***JSCE metodas***

Japonų projektavimo normų siūloma plyšio pločio skaičiavimo formulę [24]:

$$w_m = l_{sm} (\sigma_s / E_s + \varepsilon'_{csd}); \quad (1.58)$$

čia  $\sigma_s$  - tempiamos armatūros įtempiai;  $E_s$  - armatūros tamprumo modulis;  $l_{sm}$  - vidutinis atstumas tarp plyšių;  $\varepsilon'_{csd}$  - valkšnumo ir susitraukimo deformacijos.

### ***SP (2003) metodas***

Naujosios rusų projektavimo normos pasiūlė naują plyšio pločio skaičiavimo formulę [36], kurioje įvertinamas atstumas tarp plyšių  $l_s$ :

$$a_{crc} = \rho_1 \rho_2 \rho_3 \psi_s \frac{\sigma_s}{E_s} \cdot l_s; \quad (1.59)$$

čia  $\rho_1$  - koeficientas įvertinantis apkrovimo trukmę: 1,0 – trumpalaikiai apkrovai; 4,0 – ilgalaikiai;  $\rho_2$  - įvertinantis armatūros tipą: 0,5 - rumbuota; 0,8 – nerumbuota;  $\rho_3$  - įvertinantis apkrovimo tipą: 1,0 - lenkiamuose, ekscentriškai gniuždomuose, 1,2 - ekscentriškai

tempiamuose;  $\psi_s$  - koeficientas, kuris įvertina tempiamo betono darbą tarp plyšių;  $\sigma_s$  - tempiamos armatūros įtempiai;  $E_s$  - armatūros tamprumo modulis;  $l_s$  - atstumas tarp plyšių.

### ***Janoico and Kupfer metodos***

Šių dviejų autorių siūloma formulė [22]:

$$w_k = \phi \times \left( (\varepsilon_s - 0,0002) \frac{h - x_2}{d - x_2} \left[ 159 \left( \frac{h - d}{h - x_2} \right)^{4,5} + 2,83 \left( \frac{1}{n} \frac{A_{c,ef}}{A_s} \right)^{1/3} \right] \right); \quad (1.60)$$

čia  $\phi$  - armatūros skersmuo;  $\varepsilon_s$  - armatūros deformacijos;  $h$  - elemento aukštis;  $x_2$  - vidinių jėgų petys;  $d$  - efektyvusis elemento aukštis;  $A_{c,ef}$  - efektyvus betono plotas;  $A_s$  - tempiamos armatūros plotas;  $n$  - tempiamos armatūros plotas.

### **1.9. Baigiamosios skyriaus išvados ir pastabos**

1. Visų statybinių konstrukcijų patikimumas, ilgaamžiškumas ir sauga priklauso nuo ribinių būvių [saugos (I) ir tinkamumo (II)] nustatymui taikomų skaičiavimo metodų, matematinio aparato ir fizikinių modelių adekvatumo. Skirtingų medžiagų (gelžbetonio, plieno, medienos ir pan.) konstrukcijoms I-ojo ribinio būvio (stiprumo, laikomosios galios) skaičiavimai paprastai nesukelia didesnių sunkumų, kadangi juose dažniausiai taikomi fundamentiniai medžiagų mechanikos principai ir prielaidos. II-ojo ribinio būvio (deformacijų, įlinkių, plyšio pločio) skaičiavimuose taikomų algoritmų sudėtingumas priklauso nuo konstrukciją sudarančių medžiagų deformacinių savybių.
2. Betono sudedamųjų komponentų (smulkaus ir standaus užpildų, cemento, priedų) savybių įtaka elementų deformacijoms ir pleišėjimui gali būti įvertinta, taikant sudėtingus mezo- arba mikro-matematinius modelius. Pastarųjų taikymas dėl sudėtingo matematinio aparato ir didelių kompiuterinių resursų poreikio kol kas apsiriboja tik nesudėtingų etaloninių elementų skaičiavimuose (pvz., betono kubelio gniuždomo bandymas). Statybos inžinierių taikomais makro-modeliais gaunami tinkamumo ribinių būvių analizės rezultatai priklauso nuo pasirinktos armatūros ir betono sąveikos tempiamojoje zonoje modeliavimo koncepcijos.
3. Didžiausią įtaką deformacijų skaičiavimo rezultatams turi betono pleišėjimo bei armatūros ir betono sąveikos modeliavimas. Neteisingai įvertinus šį reiškinį, gali būti

daromos didesnės nei 100% įlinkių apskaičiavimo paklaidos. Modeliavimą apsunkina ir tai, kad plyšiai yra diskretūs, t. y. nutolę tam tikru atstumu, kintančiu priklausomai nuo įvairių veiksnių (elemento skerspjūvio forma, armatūros kiekis (armavimo koeficientas), strypų skersmuo ir skaičius, jų paviršius ir tamprumo modulis, apsauginis sluoksnis, ir kt.).

Apibendrinus šias išvadas suformuluojamas toks **darbo tikslas**: atlikti lenkiamų gelžbetoninių elementų pleišėjimo: plyšio pločio ir atstumo tarp plyšių,- skaičiavimo modelių analizę.

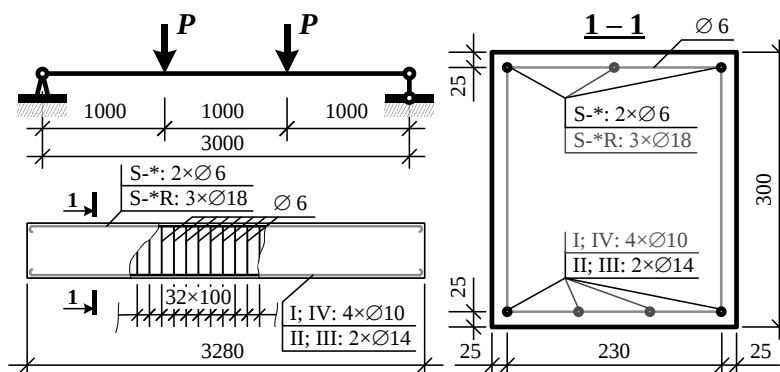
## 2. EKSPERIMENTINIAI GELŽBETONINIŲ SIJŲ DEFORMACIJŲ TYRIMAI

### 2.1. Eksperimentinių tyrimų tikslai

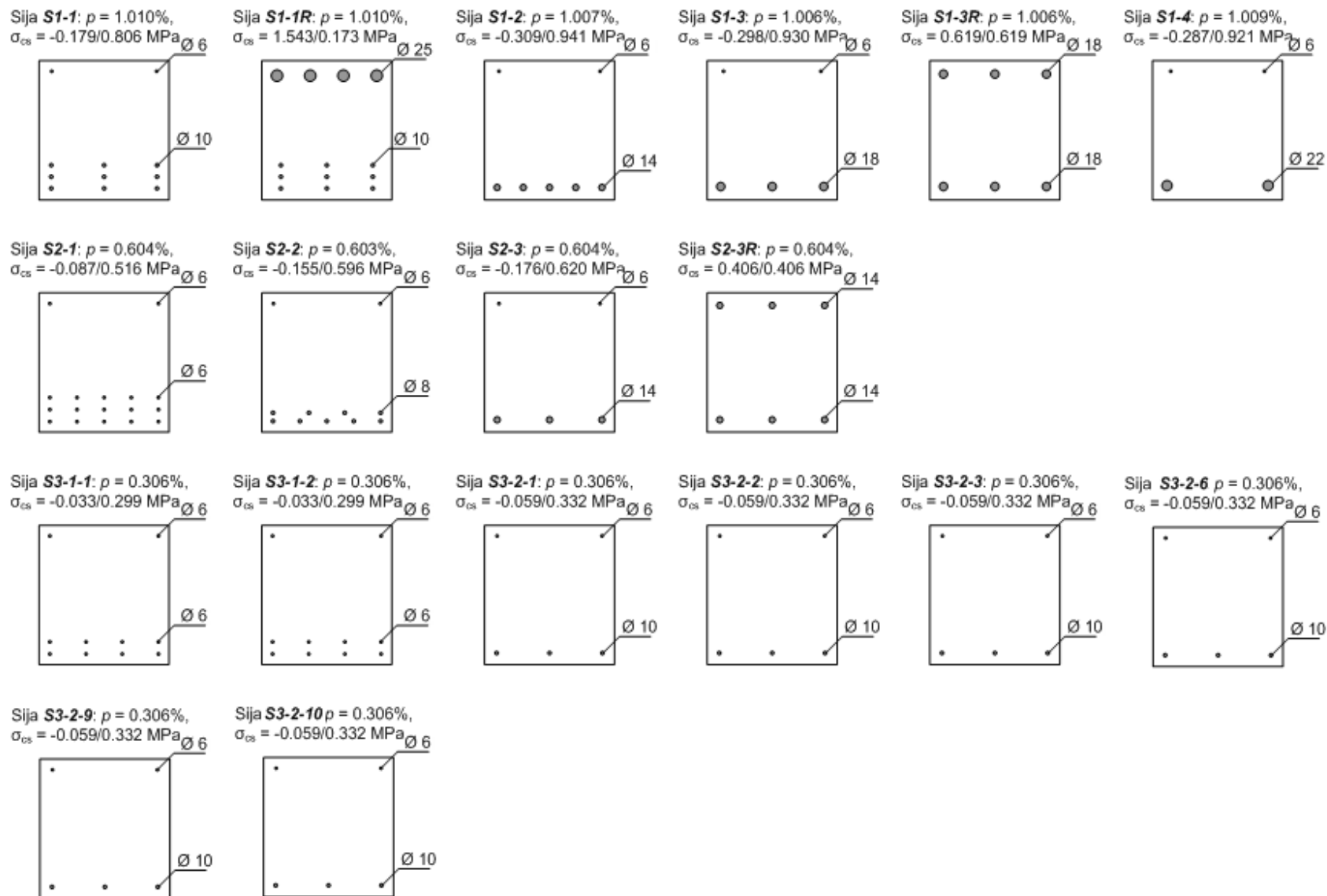
Šiame skyriuje pateikiami trumpalaikė apkrova išbandytų silpnai ir vidutiniškai armuotų ( $p \approx 0,3 \%$ ,  $0,6 \%$  ir  $1 \%$ ) gelžbetoninių sijų grynojo lenkimo zonos eksperimentinių tyrimų rezultatai. Pateikiamas trumpas bandymų programos, medžiagų (betono ir armatūros) charakteristikų, bandymų įrangos bei tyrimų rezultatų aprašymas. Pagrindinis šių **tyrimų tikslas** – eksperimentiškai nustatyti trumpalaikė apkrova veikiamų silpnai ir vidutiniškai armuotų gelžbetonio sijų vidutinius plyšio pločius ir vidutinius atstumus tarp plyšių. Bandymai atlikti VGTU Gelžbetoninių ir mūrinių konstrukcijų laboratorijoje.

### 2.2. Eksperimentinių tyrimų programa ir duomenys apie bandinius

Eksperimentinių tyrimų metu pagamintos ir trumpalaikė apkrova išbandytos 18 silpnai ir vidutiniškai armuotos ( $p \approx 0,3 \%$ ,  $0,6 \%$  ir  $1,0 \%$ ) laisvai atremtos stačiakampio skerspjūvio gelžbetoninės sijos. Sijos suskirstytos į 3 serijas. I seriją sudarė 6 sijos, II – 4, III – 8 sijų. Skirtingų serijų sijos viena nuo kitos skyrėsi armavimo procentu, betono stipriu, armatūros strypų skersmeniu, skaičiumi ir išdėstymu. Nominalūs visų sijų matmenys buvo vienodi: skerspjūvio aukštis  $h = 300$  mm, skerspjūvio plotis  $b = 280$  mm, ilgis  $l = 3280$  mm. Siekiant eliminuoti betono susitraukimo sukeltus apatinio krašto betono tempimo įtempius sijose, pažymėtose indeksu R, gniuždomoji zona armuota papildomais armatūros strypais. Visos sijos skersinės jėgos veikimo zonoje armuotos  $2\varnothing 6$  skersiniais strypais, kurių žingsnis  $s = 100$  mm. Šios armatūros plotas bei žingsnis parinktas norint užtikrinti sijos stiprumą įstrižame pjūvyje. Pagrindinės sijų geometrinės charakteristikos pateiktos 16-18 pav. ir 2.1 lentelėje, o sijų apkrovimo schema – 15 paveiksle [38].



15 pav. Sijų bandymo schema bei armavimo schema



**16 pav.** Skerspjūvių armavimo schemas, armavimo procentai bei apskaičiuoti susitraukimo sukelti įtempiai viršutiniame/apatiniame sijos sluoksnyje



2.1 lentelė. Eksperimentinių sijų pagrindinės geometrinės bei medžiagų charakteristikos

| Serija | Nr. | Sija    | $h$ | $d$ | $b$ | $a_{s2}$ | $A_{s1}$        | $A_{s2}$ | $p$  | $f$  | $\rho$            | $f_{cm,28}$ | $f_c$ | $f_s$ | $E_s$ | Terminai  |           | Amžius | $\epsilon_{cs}$ |
|--------|-----|---------|-----|-----|-----|----------|-----------------|----------|------|------|-------------------|-------------|-------|-------|-------|-----------|-----------|--------|-----------------|
|        |     |         | mm  |     |     |          | mm <sup>2</sup> |          | %    |      | kg/m <sup>3</sup> | MPa         |       |       | GPa   | Išbandyta | Pagaminta | dienos | µm/m            |
| I      | 1   | S1-1    | 299 | 248 | 282 | 25       | 696,0           | 57,3     | 1,00 | –    | 2396              | 45,5        | 49,7  | 578   | 209,9 | 08.12.10  | 08.09.26  | 75     | -228,7          |
|        | 2   | S1-1R   | 299 | 248 | 276 | 34       | 696,0           | 1916,3   | 1,02 | –    | 2396              | 45,5        | 49,7  | 578   | 209,9 | 08.12.11  | 08.09.26  | 76     | -247,0          |
|        | 3   | S1-2    | 300 | 273 | 284 | 29       | 776,8           | 57,3     | 1,00 | –    | 2396              | 45,5        | 49,4  | 632   | 210,5 | 08.12.02  | 08.09.26  | 67     | -225,3          |
|        | 4   | S1-3    | 299 | 268 | 283 | 23       | 754,7           | 57,3     | 0,99 | –    | 2368              | 42,5        | 48,2  | 582   | 207,3 | 08.11.25  | 08.09.19  | 67     | -272,0          |
|        | 5   | S1-3R   | 300 | 269 | 275 | 31       | 754,7           | 754,7    | 1,02 | –    | 2368              | 42,5        | 48,3  | 582   | 207,3 | 08.11.26  | 08.09.19  | 68     | -267,7          |
|        | 6   | S1-4    | 300 | 267 | 280 | 24       | 760,0           | 57,3     | 1,02 | –    | 2396              | 45,5        | 49,4  | 551   | 199,3 | 08.12.03  | 08.09.26  | 68     | -225,3          |
| II     | 7   | S2-1    | 301 | 254 | 279 | 30       | 429,9           | 57,3     | 0,61 | –    | 2396              | 45,5        | 49,4  | 585   | 223,5 | 08.12.08  | 08.09.26  | 73     | -240,7          |
|        | 8   | S2-2    | 301 | 266 | 278 | 30       | 458,1           | 57,3     | 0,62 | –    | 2396              | 45,5        | 49,4  | 589   | 209,8 | 08.12.08  | 08.09.26  | 73     | -240,7          |
|        | 9   | S2-3    | 300 | 272 | 282 | 29       | 466,1           | 57,3     | 0,61 | –    | 2368              | 42,5        | 48,1  | 632   | 210,5 | 08.11.24  | 08.09.19  | 66     | -267,7          |
|        | 10  | S2-3R   | 299 | 272 | 280 | 21       | 466,1           | 466,1    | 0,61 | –    | 2368              | 42,5        | 48,1  | 632   | 210,5 | 08.11.24  | 08.09.19  | 66     | -267,7          |
| III    | 11  | S3-1-1  | 305 | 271 | 280 | 39       | 229,3           | 57,3     | 0,30 | –    | 2386              | 42,5        | 47,8  | 585   | 223,5 | 08.11.12  | 08.09.19  | 54     | -231,3          |
|        | 12  | S3-1-2  | 301 | 262 | 277 | 41       | 229,3           | 57,3     | 0,32 | –    | 2410              | 49,5        | 50,9  | 585   | 223,5 | 08.11.18  | 08.10.03  | 46     | -224,0          |
|        | 13  | S3-2-1  | 304 | 279 | 278 | 40       | 232,0           | 57,3     | 0,30 | –    | 2386              | 42,5        | 47,8  | 578   | 209,9 | 08.11.11  | 08.09.19  | 53     | -223,0          |
|        | 14  | S3-2-2  | 298 | 274 | 283 | 32       | 232,0           | 57,3     | 0,30 | –    | 2410              | 49,5        | 52,8  | 578   | 209,9 | 08.12.17  | 08.10.03  | 75     | -285,1          |
|        | 15  | S3-2-3  | 298 | 271 | 284 | 32       | 232,0           | 57,3     | 0,30 | –    | 2410              | 49,5        | 50,9  | 578   | 209,9 | 08.11.19  | 08.10.03  | 47     | -210,9          |
|        | 16  | S3-2-6  | 298 | 272 | 282 | 30       | 232,0           | 57,3     | 0,30 | 2,00 | 2410              | 49,5        | 52,8  | 578   | 209,9 | 08.12.19  | 08.10.03  | 77     | -295,6          |
|        | 17  | S3-2-9  | 298 | 273 | 285 | 21       | 232,0           | 57,3     | 0,30 | –    | 2410              | 43,7        | 44,2  | 578   | 209,9 | 08.12.01  | 08.10.16  | 46     | -197,0          |
|        | 18  | S3-2-10 | 298 | 273 | 281 | 21       | 232,0           | 57,3     | 0,30 | –    | 2410              | 43,7        | 44,6  | 578   | 209,9 | 08.12.01  | 08.10.16  | 46     | -197,0          |

Lentelėje  $h$  ir  $b$  – atitinkamai, sijos skerspjūvio aukštis ir plotis;  $d$  – naudingasis skerspjūvio aukštis;  $a_{s2}$  – viršutinės armatūros apsauginis sluoksnis;  $A_{s1}$  ir  $A_{s2}$  – atitinkamai, apatinės ir viršutinės armatūrų skerspjūvių plotai;  $p$  – pagrindinės armatūros armavimo procentas;  $f$  – dispersinės armatūros armavimo procentas;  $\rho$  – betono tankis;  $f_{cm,28}$  – 28 dienų betono vidutinis cilindrinis gniuždomasis stipris;  $f_c$  – vidutinis betono cilindrinis gniuždomasis stipris bandymo dieną;  $f_s$  – armatūros takumo įtempimai;  $E_s$  – armatūros tamprumo modulis;  $\epsilon_{cs}$  – betono susitraukimo deformacija bandymo dieną.



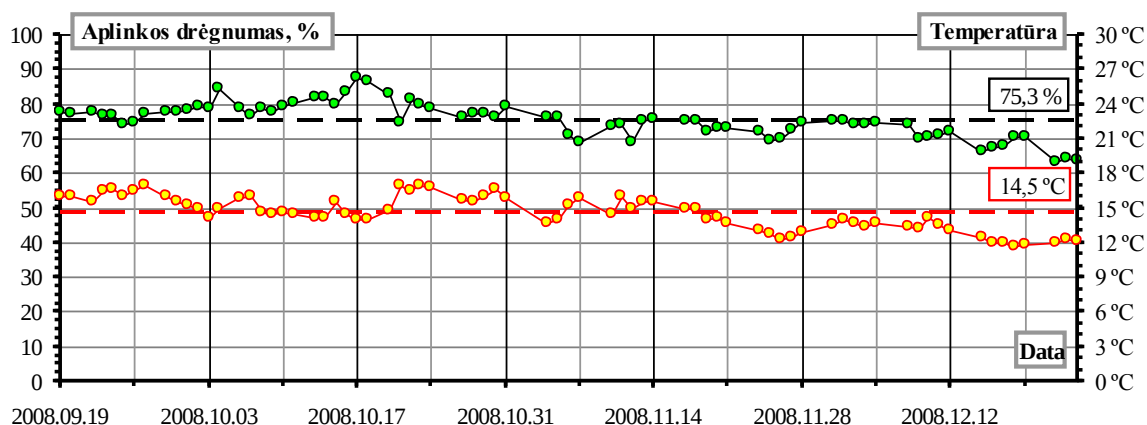
**19 pav.** Eksperimentinių sijų betonavimas

Laisvai atremtos sijos apkrautos dviem koncentruotomis tarpatramio trečdaliuose išdėstytomis jėgomis iki suirimo. Skaičiuotinas visų sijų tarpatramio ilgis  $l_0 = 3,0$  m. Sijų atrėmimo bei apkrovimo schema pateikta 15 paveiksle.

Sijos betonuotos po 6 metaliniuose klojiniuose ant vibrostalo (19 pav.). Pagamintos sijos kietėjo natūraliomis sąlygomis, esant vidutiniam 75,3 % drėgniui bei 14,5 °C temperatūrai. Aplinkos drėgnio bei temperatūros kitimas eksperimentinių tyrimų metu pateiktas 20 pav.

Be pagrindinių sijų, buvo išbandyti kubai, prizmės bei cilindrai (žr. 21 pav). Pagal kubų ir cilindų bandymų duomenis įvairiais laiko momentais nustatyti betono gniuždomasis stipris, o pagal prizmių duomenis – betono tamprumo modulis, betono laisvojo susitraukimo deformacijos, valkšnumo koeficientas bei tempiamasis stipris (lenkiant prizmes). Papildomai matuotos cilindrinų bandinių susitraukimo deformacijos. Visi bandiniai pagaminti tą pačią dieną bei iš to paties betono mišinio kaip ir sijos [38].

Armatūros charakteristikos nustatytos išbandžius po 3 kiekvieno skersmens strypus, kurių bandymo ilgis  $l_b = 500$  mm. Duomenys apie armatūros ir betono mechanines charakteristikas pateikti 2.1 lentelėje.



20 pav. Aplinkos drėgnumo bei temperatūros kitimas eksperimentinių tyrimų metu



21 pav. Eksperimentinių cilindų, prizmių bei kubelių betonavimas

### 2.3. Bandymų metodika ir prietaisų išdėstymas

Gelžbetoninės sijos išbandytos bandymų stende, naudojant *IIP-1000* presą. Apkrova buvo keliama pakopomis po 2 kN. Apkrovos dydis fiksuotas skaitmeniniu 500 kN dinamometru. Koncentruota apkrova sijai nuo preso perduota metaline 1250 mm ilgio traversa. Siekiant

sumažinti įtempių koncentraciją, apkrovos pridėjimo vietose priklijuotos 10 mm storio metalinės plokštelės. Bandymo metu ant sijos uždėtas įrangos svoris sudarė 184,4 kg.

Sijų deformacijoms matuoti panaudoti 20 mechaninių mikrometrų su apskritimine skale (indikatoriai), kurių tikslumas  $\pm 0,003$  mm. Matavimų bazė – 200 mm. Apkrautų sijų vidutinės deformacijos matuotos grynojo lenkimo zonoje keturiuose skirtinguose lygiuose bei penkiuose kiekvieno lygio ruožuose. Indikatorių rodmenys buvo nuskaitomi kiekvienoje apkrovos pakopoje.

Sijų įlinkiai matuoti 8 indukciniiais tiesinių poslinkių matuokliais *ALMEMO T50* (įlinkiomačiais), kurių tikslumas  $\pm 0,15$  %, išdėstytais tokia seka: po 1 prie kiekvienos atramos, po 2 koncentruotų išorės apkrovų pridėjimo taškuose (1,0 m nuo atramų) ir 2 tarpatramio viduryje (1,5 m nuo atramų). Induciniai indikatoriai kartu su dinamometru per signalo apdorojimo prietaisą *ALMEMO 25 90-9* buvo tiesiogiai sujungti su asmeniniu kompiuteriu, o jų rodmenys buvo nuskaitomi kas 1 s. Matavimų įrangos išdėstymas pateiktas 22 pav. Sijų bandymo mechanine apkrova metu buvo vizualiai stebimii bei žymimi atsiradę plyšiai ir jų vystymosi pobūdis. Kiekvienas plyšys numeruotas, o jų atsivėrimo plotis fiksuotas kas antrą apkrovimo pakopą 24 kartus didinančiu mikroskopu tempiamosios armatūros svorio centro lygyje [38].

Kiekvienai sijai pagal vizualius pirmųjų plyšių atsiradimo stebėjimus ir įlinkiomačių bei indikatorių rodmenis buvo fiksuotas pleišėjimo momentas  $M_{cr}$ , o bandymo pabaigoje – ribinis momentas  $M_u$ .

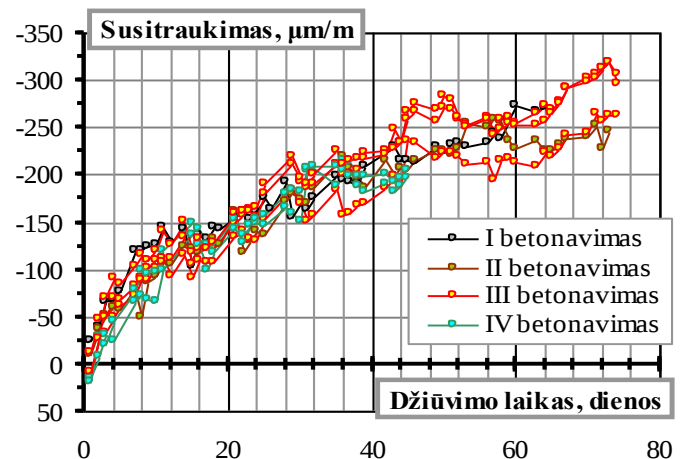


22 pav. Matavimo prietaisų išdėstymas

## 2.4. Betono ir armatūros savybių tyrimas

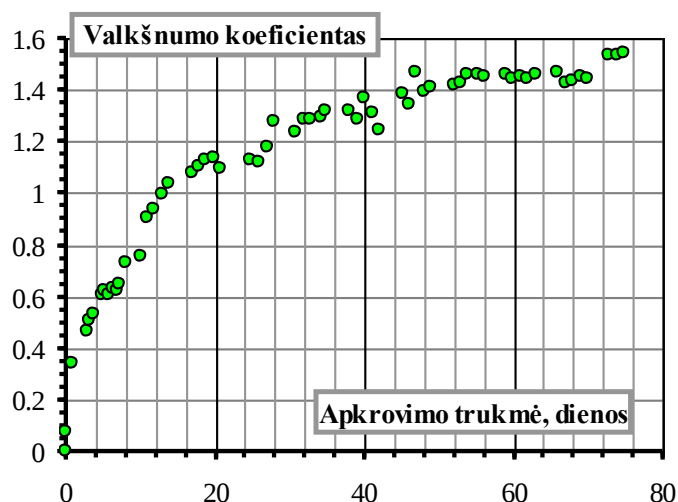
### 2.4.1. Betonas

Eksperimentiniams bandiniams panaudotas UAB „Markučiai“ pagamintas prekinis betono mišinys, kurio nominali klasė nemažesnė kaip C35/45. Gniuždomasis betono stipris nustatytas bandant 100×100×100 mm, 150×150×150 mm, 200×200×200 mm kubelius bei 150 mm skersmens cilindrus. Betono tamprumo modulis nustatytas gniuždant 100×100×400 mm matmenų betonines prizmes, o tempiamasis stipris – lenkiant tų pačių matmenų prizmes. Kiekvienos serijos bandiniai išbandyti praėjus 7, 14, 28 dienų po betonavimo ir bandymų dieną. Vidutinės gniuždomojo betono cilindrinio stiprio eksperimentiškai nustatytos reikšmės po 28 dienų kietėjimo ir bandymo dieną pateiktos 2.1 lentelėje. Taip pat matuotos betoninių prizmių 100×100×400 mm ir 280×300×400 mm (atitinka sijos skerspjūvį) bei cilindrų susitraukimo (23 pav.) deformacijos, taip pat 100×100×400 mm prizmių valkšnumo deformacijos (24 pav.).



**23 pav.** Betono susitraukimo sukeltų deformacijų matavimas (kairėje); visų serijų betono laisvosios betono susitraukimo deformacijos (dešinėje)

Susitraukimo deformacijoms matuoti naudotas skaitmeninis 200 mm matavimų bazės DEMEC deformacijų matuoklis (23 pav.). Valkšnumo koeficientui nustatyti prizmės apkrautos spyruokliniu presu (praėjus 14 dienoms po betonavimo). Betono įtempiai apkrovimo metu siekė  $\approx 0,3 f_{cm}(t_0)$ , kur  $f_{cm}(t_0)$  – betono vidutinis prizminis stipris apkrovimo metu. Susitraukimo ir valkšnumo deformacijų reikšmės buvo nuskaitomos kiekvieną dieną iki paskutinės atitinkamos serijos sijos bandymo. Betono laisvojo susitraukimo deformacijų (280×300×400 mm bandiniams) ir valkšnumo koeficiento kitimo laiko atžvilgiu grafikai pateikti, atitinkamai, 23 ir 24 paveiksluose.



24 pav. Betono valkšnumo matavimas (kairėje); betono valkšnumo koeficiento kitimas (dešinėje)

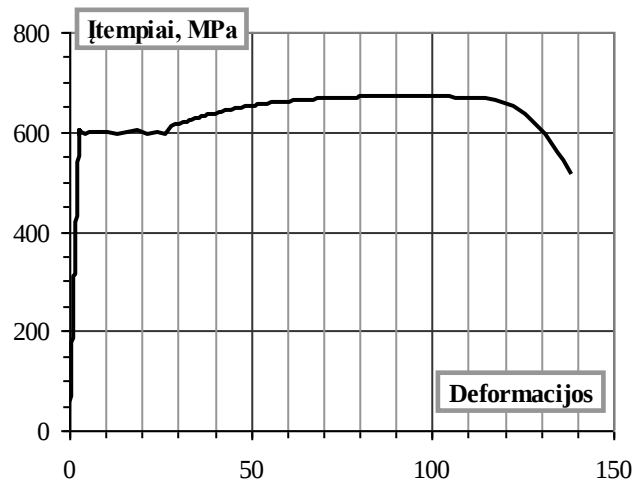
#### 2.4.2. Armatūra

Gelžbetonių sijų armatūros strypynams gaminti pagaminimui panaudota armatūra, kurią tiekia UAB “Markučiai“. Jos charakteristikoms nustatyti išbandyti po tris kiekvieno skersmens strypai, kurių bandymo ilgis  $l_b=500$  mm.



25 pav. Armatūros strypų bandymas

Armatūra bandyta tempimo mašinoje, keliant apkrovą pastoviu greičiu. Armatūros deformacijos fiksuotos poslinkių matuokliais *ALMEMO T50*, o gauti rezultatai apdoroti naudojant su asmeniniu kompiuteriu sujungtą signalo apdorojimo prietaisą *ALMEMO 25 90-9* (25 pav.). Išbandžius armatūros strypus eksperimentiškai gautos pilnos armatūros plieno  $\sigma-\epsilon$  diagramos (26 pav), iš kurių nustatytos pagrindinės charakteristikos: takumo riba  $f_s$  ir tamprumo modulis  $E_s$ . Eksperimentinės šių charakteristikų reikšmės pateiktos 2.1 lentelėje.



26 pav. Armatūros bandiniai bei įtempių ir deformacijų diagrama ( $\varnothing 10$  mm)

### 2.4.3. Eksperimentinių tyrimų rezultatai

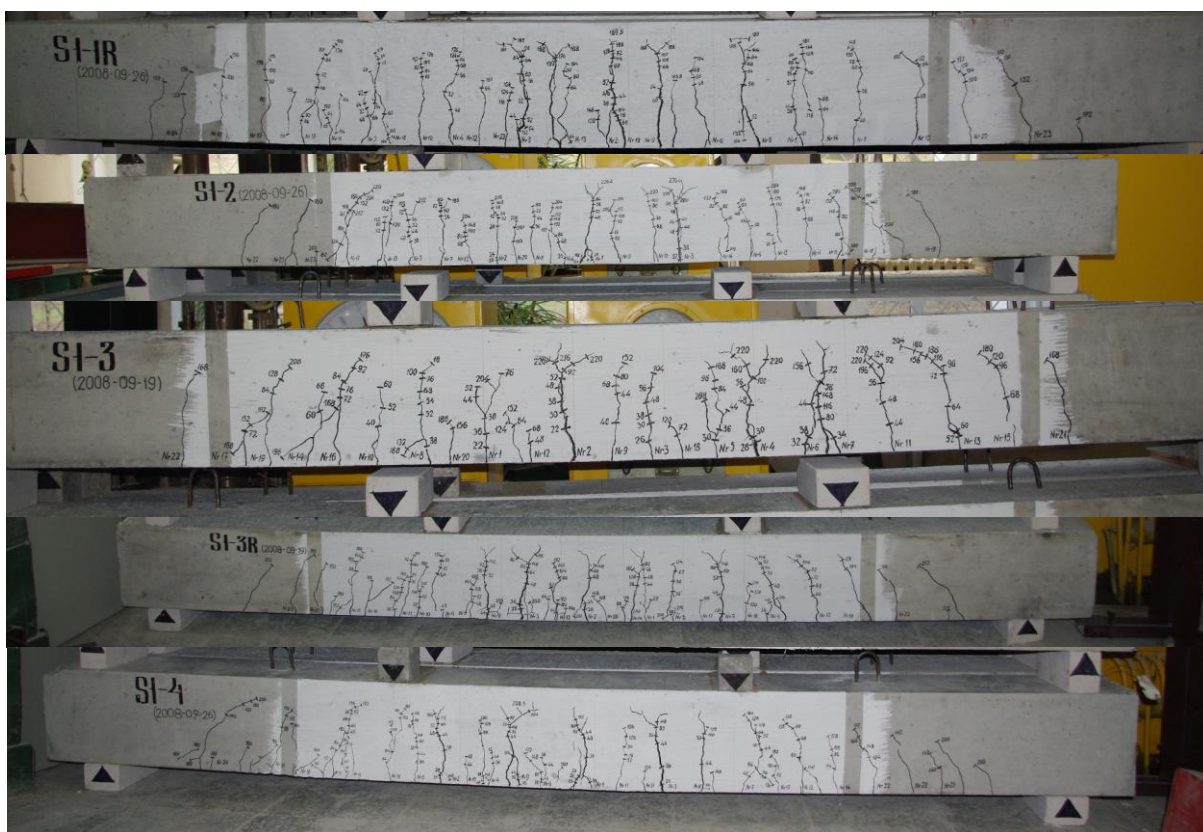
Eksperimentinių pleišėjimo ir suirimo momentai pateikti 2.2 lentelėje. 2.2 lentelėje S1-\* atitinka I serijos sijas ( $p = 1\%$ ), S2-\* – II serijos sijas ( $p = 0,6\%$ ) ir S3-\* – III serijos sijas ( $p = 0,3\%$ ).

2.2 lentelė. Pateikti sijų pleišėjimo  $M_{cr}$  ir suirimo  $M_u$  momentai.

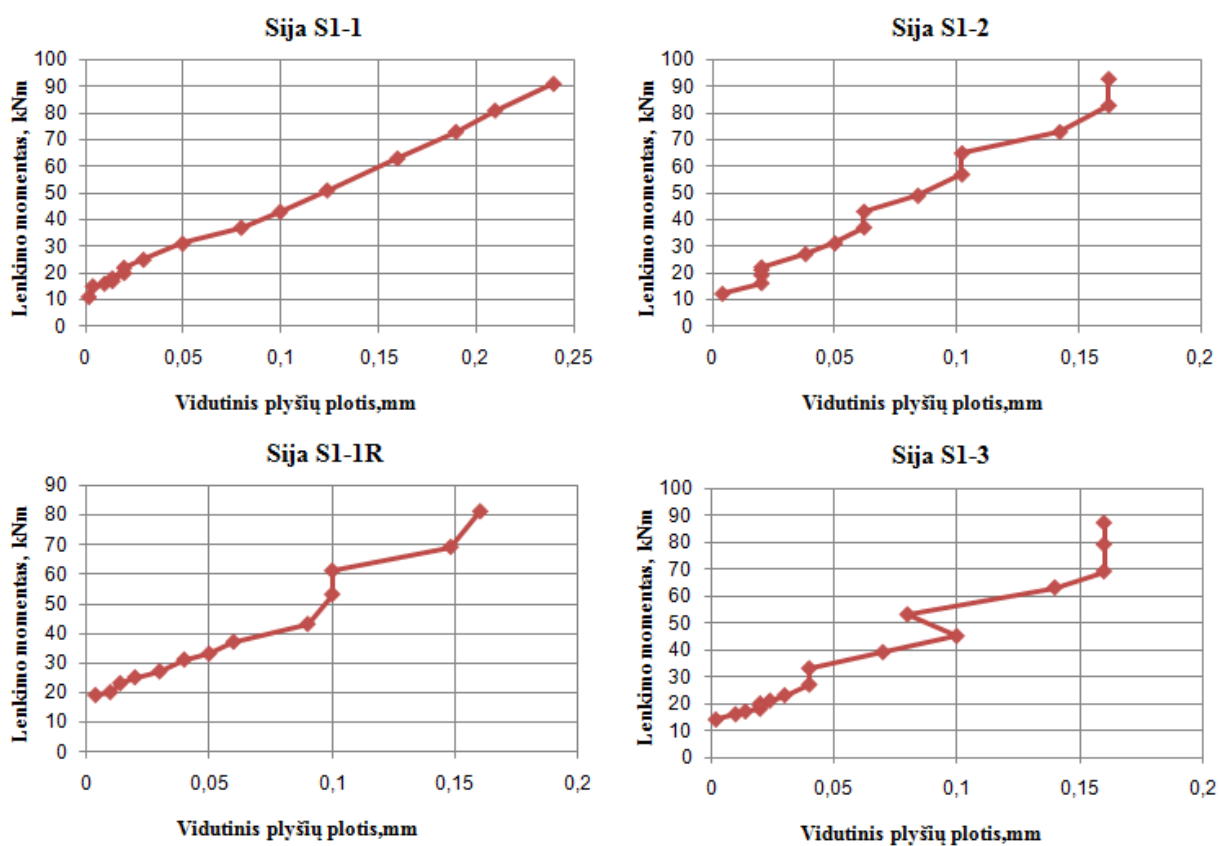
| Serija | Nr. | Sija    | $M_{cr}$ , kNm | $M_u$ , kNm | $M_0$ , kNm |
|--------|-----|---------|----------------|-------------|-------------|
| I      | 1   | S1-1    | 11,161         | 99,511      | 3,161       |
|        | 2   | S1-1R   | 21,23          | 98,13       | 3,23        |
|        | 3   | S1-2    | 11,186         | 116,386     | 3,186       |
|        | 4   | S1-3    | 14,14          | 114,04      | 3,14        |
|        | 5   | S1-3R   | 14,131         | 113,631     | 3,131       |
|        | 6   | S1-4    | 14,15          | 107,40      | 3,147       |
| II     | 7   | S2-1    | 17,108         | 66,358      | 3,108       |
|        | 8   | S2-2    | 12,113         | 72,063      | ,113        |
|        | 9   | S2-3    | 16,114         | 69,614      | 3,114       |
|        | 10  | S2-3R   | 15,12          | 71,97       | 3,12        |
| III    | 11  | S3-1-1  | 19,05          | 39,05       | 3,050       |
|        | 12  | S3-1-2  | 15,269         | 38,719      | 3,019       |
|        | 13  | S3-2-1  | 21,034         | 46,884      | 3,034       |
|        | 14  | S3-2-2  | 18,144         | 40,394      | 3,144       |
|        | 15  | S3-2-3  | 19,059         | 41,309      | 3,059       |
|        | 16  | S3-2-6  | 20,061         | 41,151      | 3,061       |
|        | 17  | S3-2-9  | 18,164         | 39,314      | 3,164       |
|        | 18  | S3-2-10 | 16,13          | 38,18       | 3,13        |

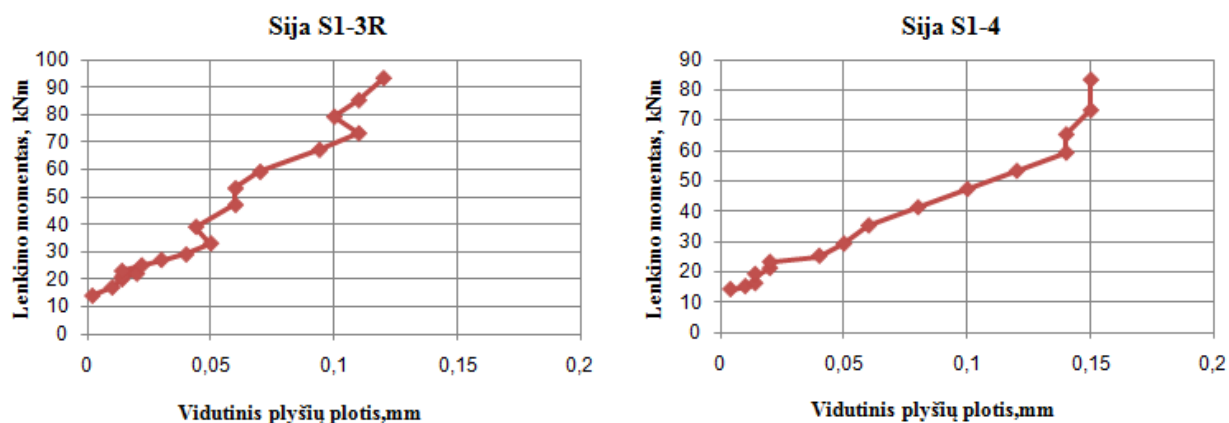
Lentelėje R – indeksas, rodantis sijos papildomą armavimą;  $M_0$  - sijos momentas, sukeltas nuo sijos

Eksperimentiniai vidutiniai plyšio pločiai pateikti 28 pav., 30 pav., 32 pav. Sijų pleišėjimo pobūdis pateikti 27 pav., 39 pav., 31 pav.



27 pav. I serijos eksperimentinių sijų pleišėjimo pobūdis

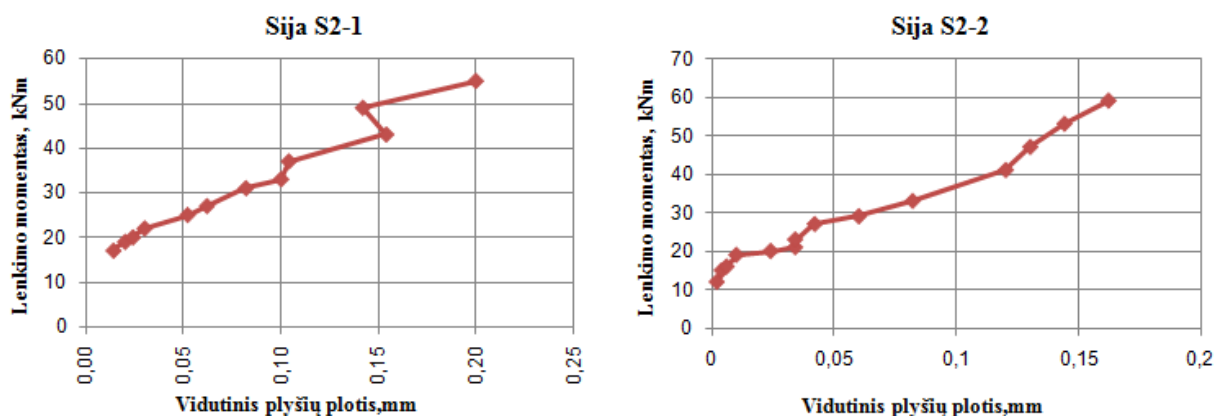


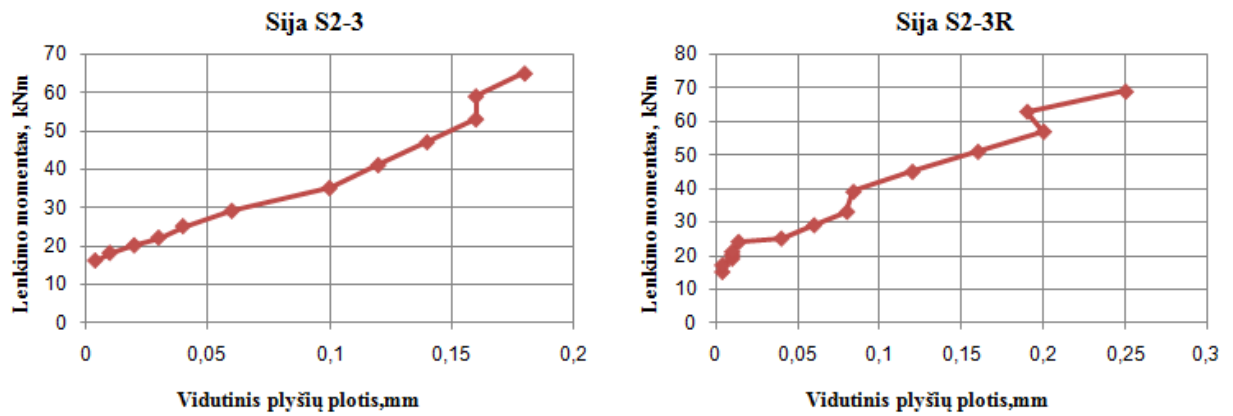


28 pav. I serijos sijų eksperimentinės plyšio pločio reikšmės

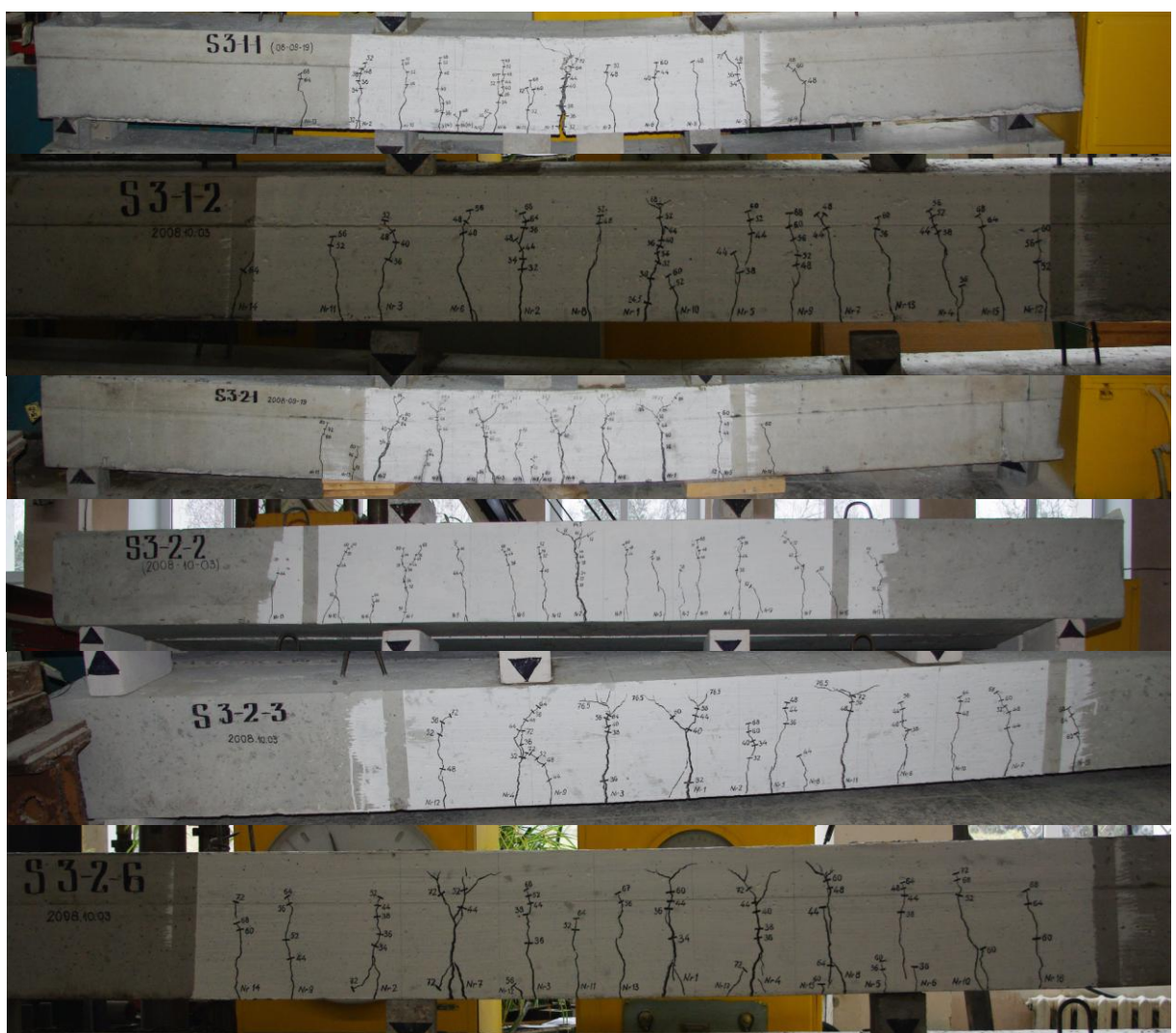


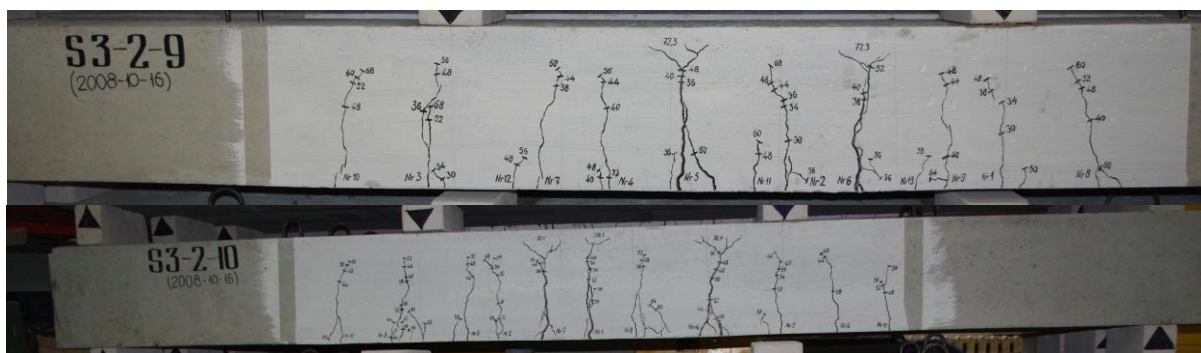
29 pav. II serijos eksperimentinių sijų pleišėjimo pobūdis



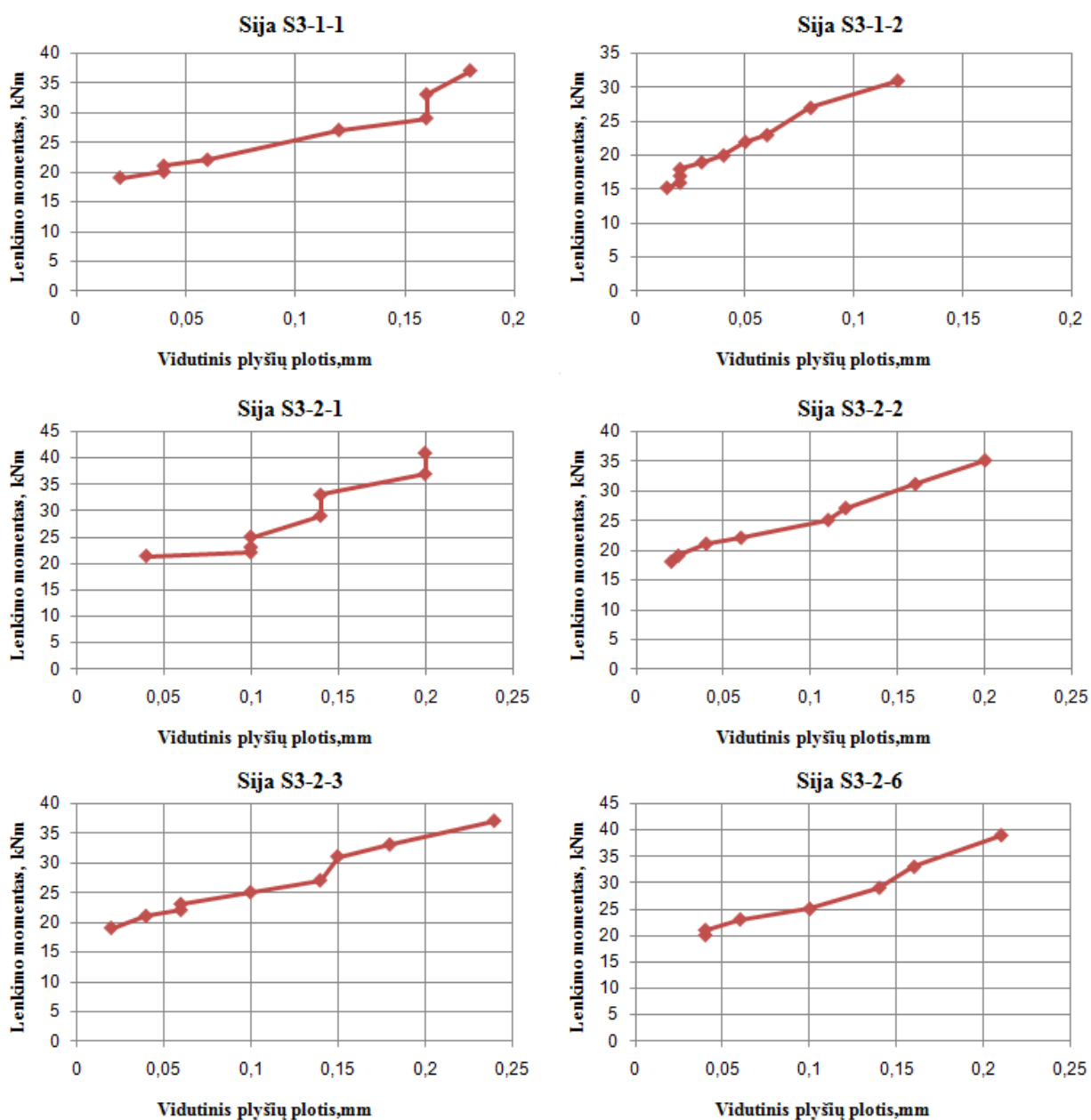


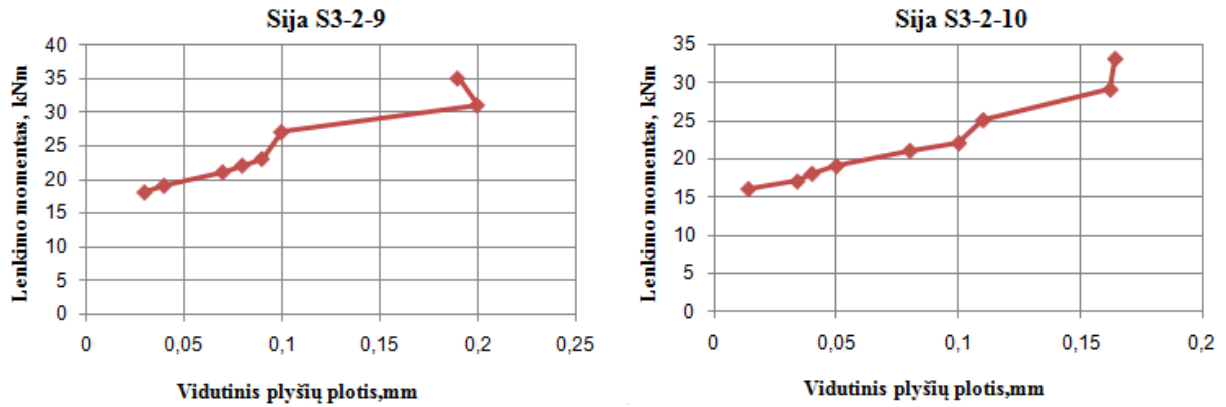
30 pav. II serijos sijų eksperimentinės plyšio pločio reikšmės





31 pav. III serijos eksperimentinių sijų pleišėjimo pobūdis





32 pav. III serijos sijų eksperimentinės plyšio pločio reikšmės

Iš gautų rezultatų matyti, kad skirtingo armavimo procento sijų elgsena skiriasi. Dėl mažo armavimo procento, III serijos sijų suirimas po supleišėjimo yra daug staigesnis nei II ir I serijos. Skirtingas yra ir šių sijų pleišėjimo pobūdis (27 pav., 29 pav., 31 pav.). Mažesnę armavimą turinčiose sijose atstumas tarp plyšių yra didesnis, o jų skaičius – mažesnis. Tai galima paaiškinti tuo, kad armatūros takumo įtempiai silpnai armuotuose elementuose pasiekiami greičiau nei vidutiniškai armuotuose.

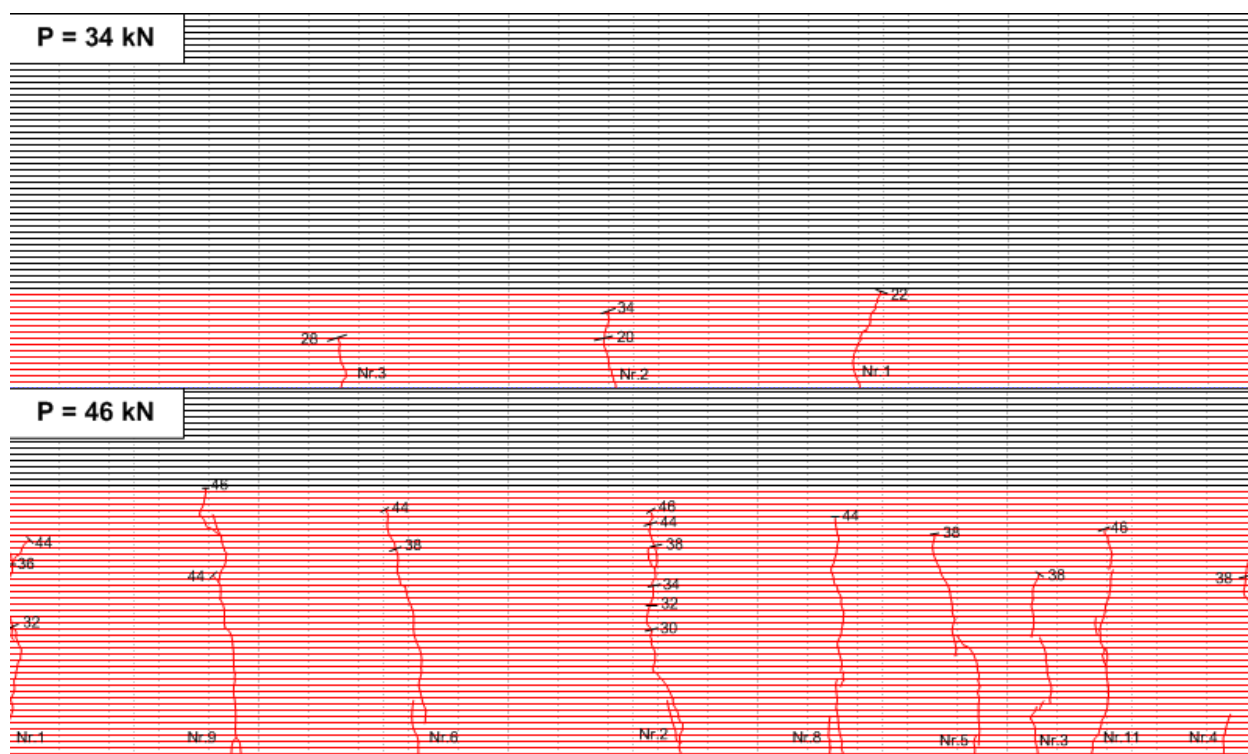
## 2.5. Baigiamosios skyriaus išvados ir pastabos

1. Eksperimentinių tyrimų metu pagamintos ir trumpalaikė apkrova išbandytos 18 silpnai ir vidutiniškai armuotos ( $p \approx 0,3 \%$ ,  $0,6 \%$  ir  $1,0 \%$ ) laisvai atremtos stačiakampio skerspjūvio gelžbetoninės sijos. Sijos suskirstytos į 3 serijas. Nominalūs visų sijų matmenys buvo vienodi: skerspjūvio aukštis  $h = 300$  mm, skerspjūvio plotis  $b = 280$  mm, ilgis  $l = 3280$  mm. Siekiant eliminuoti betono susitraukimo sukeltus apatinio krašto betono tempimo įtempius sijose, pažymėtose indeksu R, gniuždomoji zona armuota papildomais armatūros strypais.
2. Laisvai atremtos sijos apkrautos dviem koncentruotomis tarpatramio trečdaliuose išdėstytomis jėgomis iki suirimo. Skaičiuotinas visų sijų tarpatramio ilgis  $l_0 = 3,0$  m. Gelžbetoninės sijos išbandytos bandymų stende, naudojant IIP-1000 presą. Apkrova buvo keliama pakopomis po 2 kN. Apkrovos dydis fiksuotas skaitmeniniu 500 kN dinamometru.
3. Tyrimų metu nustatytas pilnas lenkiamųjų gelžbetonio sijų deformacijų būvis nuo elemento pagaminimo iki jo suirimo, veikiant trumpalaikėi apkrovai. Eksperimento metu nustatyti sijų įlinkiai 5 skirtinguose pjūviuose (viso 8 stebėjimo taškai) ir vidutinės

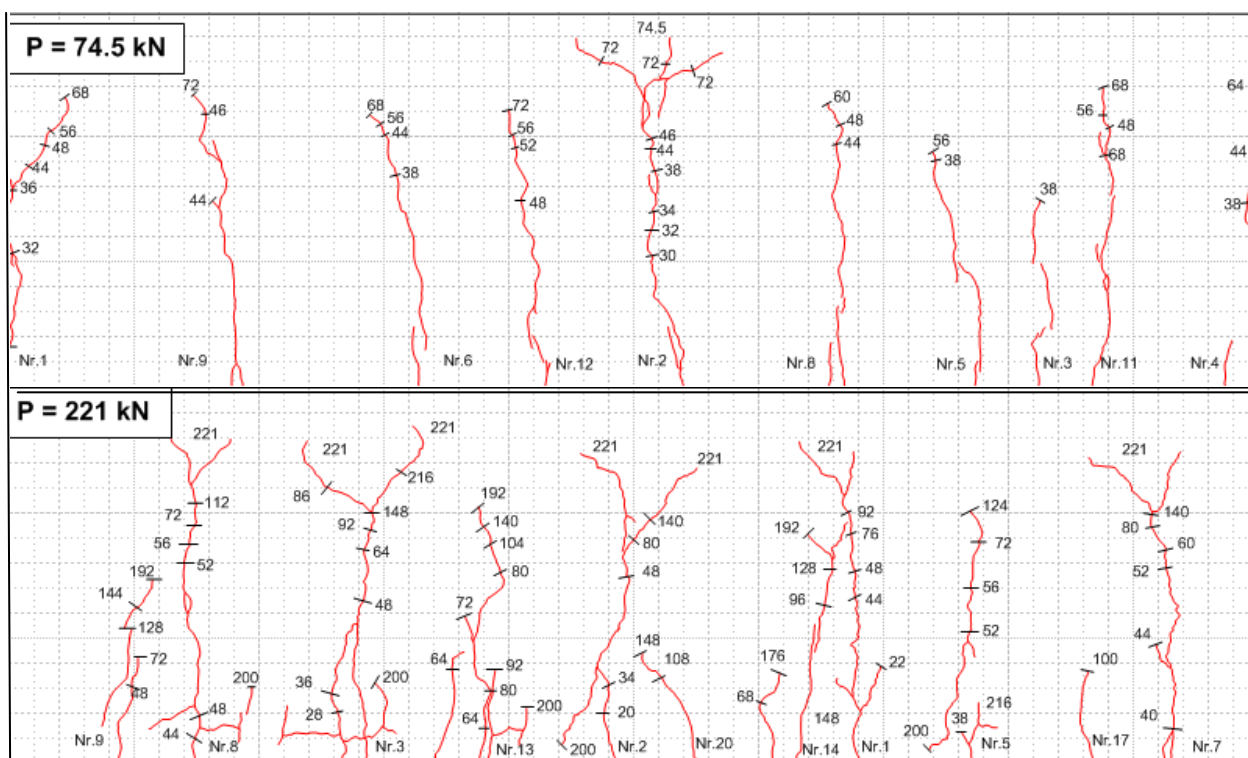
deformacijos 4 skirtinguose grynojo lenkimo zonos lygiuose bei 5 skirtinguose kiekvienos zonos ruožuose (viso 20 stebėjimo taškų). Taip pat matuoti plyšių pločiai ir fikasuotos plyšių vystimosi schemos atstumo tarp plyšių nustatymui. Šių stebėjimų duomenys panaudoti nustatant eksperimentinius gelžbetonio sijų pleišėjimo parametrus: plyšio pločius ir atstumą tarp plyšių.

4. Gauti rezultatai rodo, kad skirtingo armavimo procento sijų elgsena skiriasi. Dėl mažo armavimo procento, III serijos sijų suirimas po supleišėjimo yra daug staigesnis nei II ir I serijos. Skirtingas yra ir šių sijų pleišėjimo pobūdis. Mažesnę armavimą turinčiose sijose atstumas tarp plyšių yra didesnis, o jų skaičius – mažesnis. Tai galima paaiškinti tuo, kad armatūros takumo įtempiai silpnai armuotuose elementuose pasiekiami greičiau nei vidutiniškai armuotuose.





34 pav. Sijų S1-3R ir S3-2-2 pleišėjimo schema atitinkamai prie 34 kN ir 46 kN apkrovų



35 pav. Supleišėjusių sijų S1-3R ir S3-2-2 schema atitinkamai prie 74,5 kN ir 221 kN apkrovų

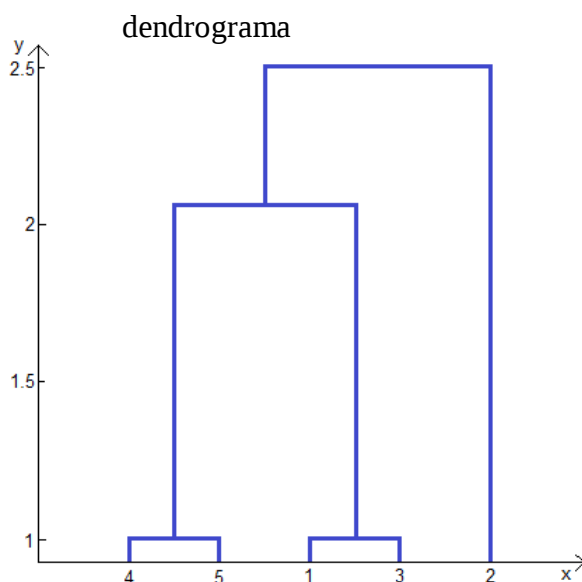
Nuotraukos ( $M 1:1$ ) su sijų grynojo lenkimo zona keliamos į *Microsoft Office Visio* programą. Programoje kuriami atskiri darbo laukai kiekvienam sijos apkrovimo lygiui, tam, kad būtų galima stebėti sijos pleišėjimo elgseną prie kiekvienos apkrovos (34 pav.).

Prie kiekvienos apkrovos (iki pat sijos suirimo) sudaroma plyšių schema, per visą sijos aukštį, kas 5 mm, braižomas tinklėlis, kuris dedamas ant schemos (34 pav). Sudaromos realių plyšių projekcijos į  $x$  ašį, gaunamos duomenų imtys. Pagal apdorotus duomenis, *klasterio* taškų grupavimo metodu, gauname vidutinius atstumus tarp plyšių (*klasterio* metodas aprašomas 3.3 poskyryje).

### 3.3. Klasterinės analizės metodas

*Klasteris* (angl. *cluster*) - tai panašių objektų grupė, sudaryta iš kelių, vieno tipo, elementų. *Klasterinė* analizė — tai metodas, taikomas, norint atskirti panašių objektų grupes (*klasterius*) taip, kad skirtumai klasterių viduje būtų mažesni, nei skirtumai tarp klasterių. Išskiriami du pagrindiniai *klasterinės* analizės metodai — *hierarchiniai* ir *nehierarchiniai* metodai. Šiame tyrime buvo naudojamas *hierarchinis* metodas. *Hierarchinis klasterio* metodas nusako tam tikrų objektų tarpusavio hierarchiją. Visi objektai grupuojami į vieną *klasterį*, kurį sudaro mažesni *klasteriai*, šie grupuojami į dar mažesnius ir t.t.

*Hierarchinių klasterių* grupių formavimas pateikti dendrogramose (žr. 36 pav.)



**36 pav.** *Klasterių* dendrograma:  $x$  ašyje esantys skaičiai rodo klasterių skaičių, o  $y$  ašies skaičiai rodo kokiame aukštyje klasteriai susidaro, t.y. nurodomos klasterio koordinatės

Taikydami *hierarchinį klasterio* metodą gauname bendrą visų *klasterių* tarpusavio priklausomybių struktūrą t.y. *klasterių* skaičių ir vidutinį atstumą tarp jų, šiuo atveju *klasteriai* atitinka sijos plyšius, o vidutiniai atstumai tarp *klasterių* – vidutinius atstumus tarp plyšių.

Panašūs objektai į grupės jungiami skirstant juos pagal panašumo matus. Dažniausiai naudojami panašumo matai yra trys:

- Metriniai atstumo matai;
- Koreliacijos koeficientai;
- Asociatyvumo koeficientai.

Plyšio taškai jungiami pagal metrinis atstumo matus, t.y. nustatant galimą tolimiausią atstumą tarp *klasterių* (plyšių).

### 3.4. *Klasterinės analizės metodo pavyzdys skaičiuojant vidutinius atstumus tarp plyšių*

*Klasteriai* sudaromi *MATLAB* skaičiavimo programa pagal jau paruoštas duomenų imtis (kaip duomenys gaunami aprašoma 3.2 poskyryje). *Klasterinės* analizės taikymas skaičiuojant vidutinius atstumus tarp plyšių pavaizduotas 37 paveiksle.

37 a) paveiksle pavaizduotas *S1-3R* sijos grynojo lenkimo zonos pleišėjimo pobūdis prie suirimo apkrovos  $P=221 \text{ kN}$ . 37 b) pav. rodomas sijos *S1-3R* pleišėjimo pobūdis prie  $34 \text{ kN}$  ir  $60 \text{ kN}$ . 37 c) pav. pavaizduotas realaus plyšio projekcijos sudarymas į  $x$  ašį. Projekcijos sudaromos kiekviename apkrovimo lygyje iki sijos suirimo. Sudaromos duomenų imtys. 37 d) pav. vaizduojama sijos *S1-3R* dendrograma prie  $60 \text{ kN}$  apkrovos. Dendrogramoje  $x$  ašyje parodytas *klasterio* skaičius,  $y$  ašyje vaizduojamas intervalas, kuriame grupuojami *klasterio* taškai. 37 e) pav. sijos *S1-3R* histograma žyminti *klasterių* skaičių ir vidutinį atstumą tarp jų.

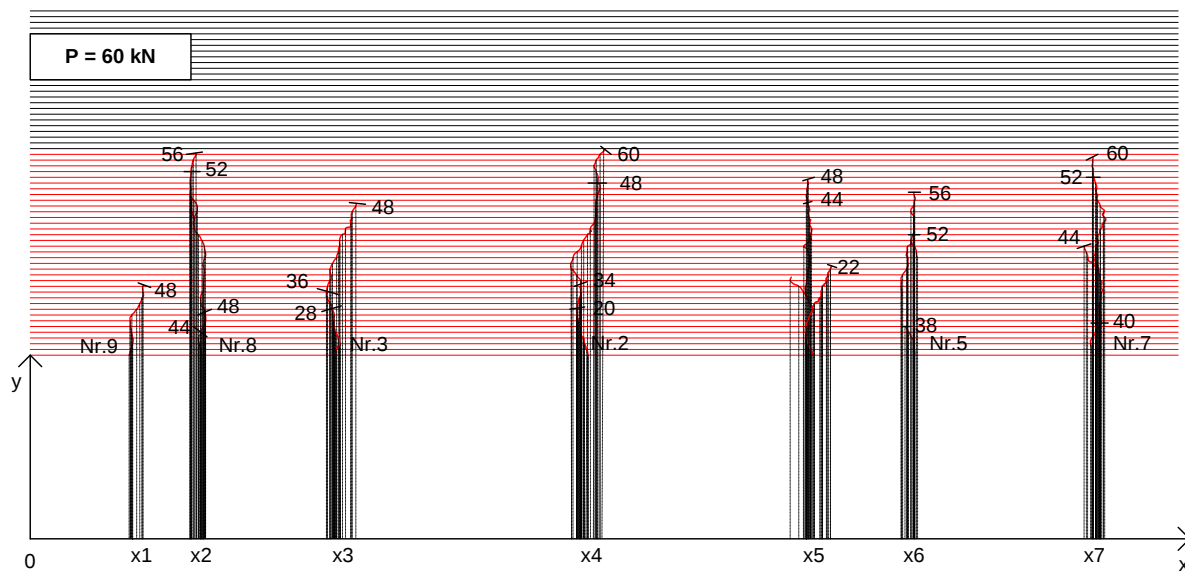
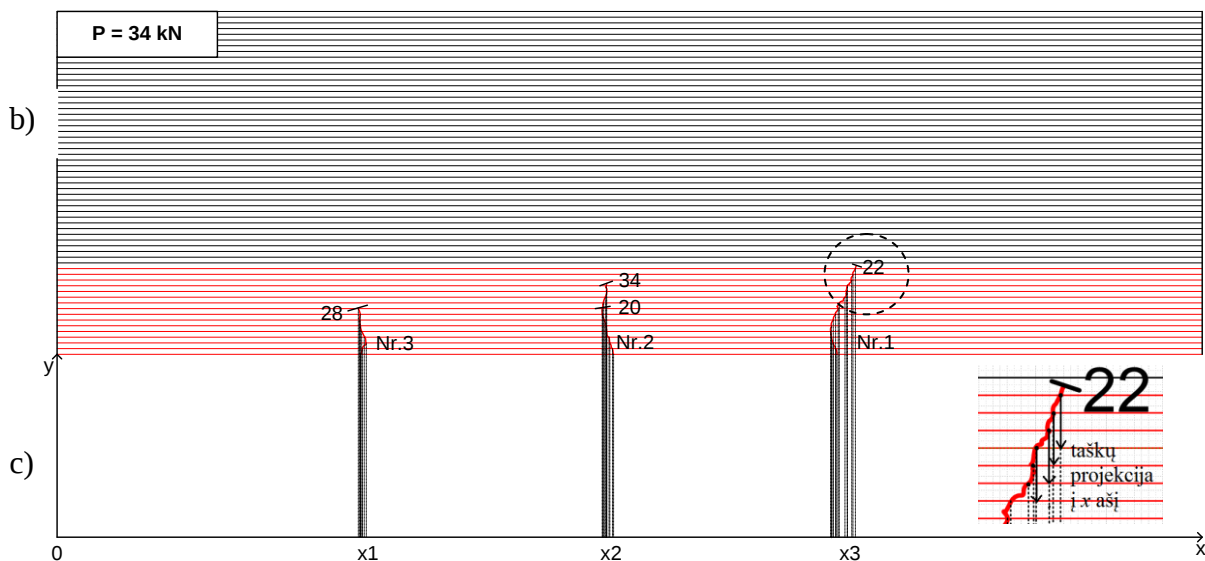
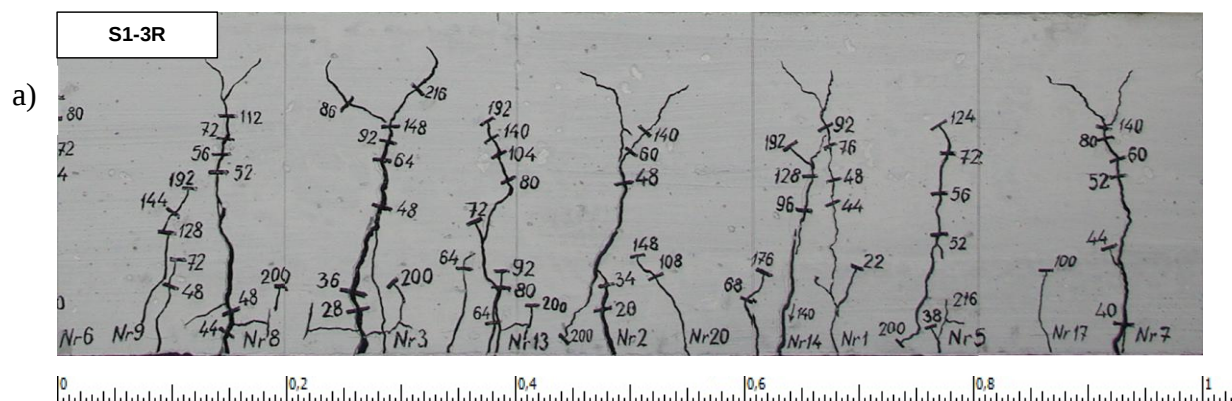
Kaip buvo minėta realių plyšių taškų projekcijos sudarytos į  $x$  ašį sudaro taškų duomenų imtį kiekviename apkrovimo etape, kurie į atskiras grupes jungiami intervale  $\leq \Delta_{\min}=2 \text{ cm}$  [37]. Vidutinis atstumas tarp plyšių (užrašomas 3.2 formule) prie skirtingų apkrovimo lygių.

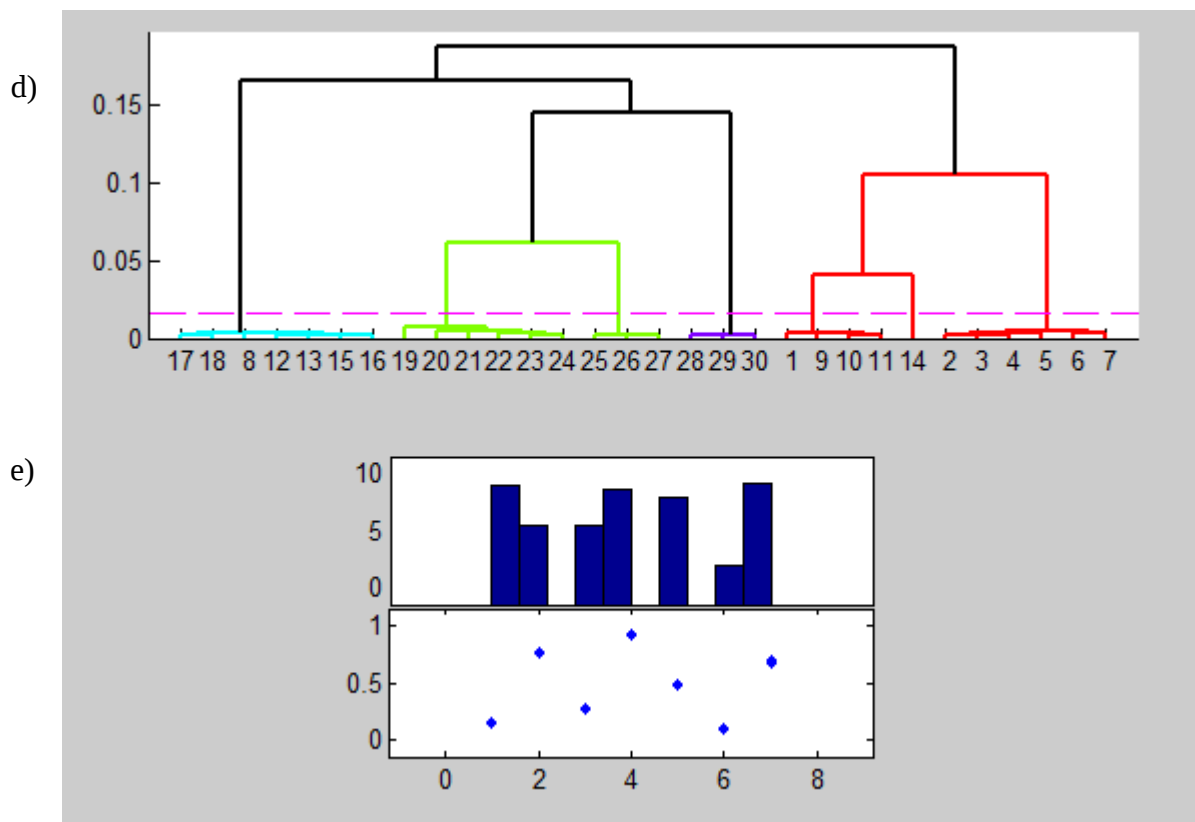
$$\Delta_{\text{vid}} = \frac{\sum_{i=2}^n (x_i - x_{i-1})}{n} \quad (3.1)$$

čia  $n$  – plyšių skaičius.

Atlikus taškų grupavimą gaunama:

- 1) Minimalų atstumą tarp plyšių  $\Delta_{\min}$  ;
- 2) Plyšių skaičių  $n$ ;
- 3) Vidutinį atstumą tarp plyšių  $\Delta_{\text{vid}}$  ;
- 4) Eksperimentinių taškų kiekviename *klasteryje* skaičių, kuris gali būti siejamas su plyšių pločiu (gali būti kito tyrimo objektas, šiame darbe naudojami išmatuoti plyšio pločiai).

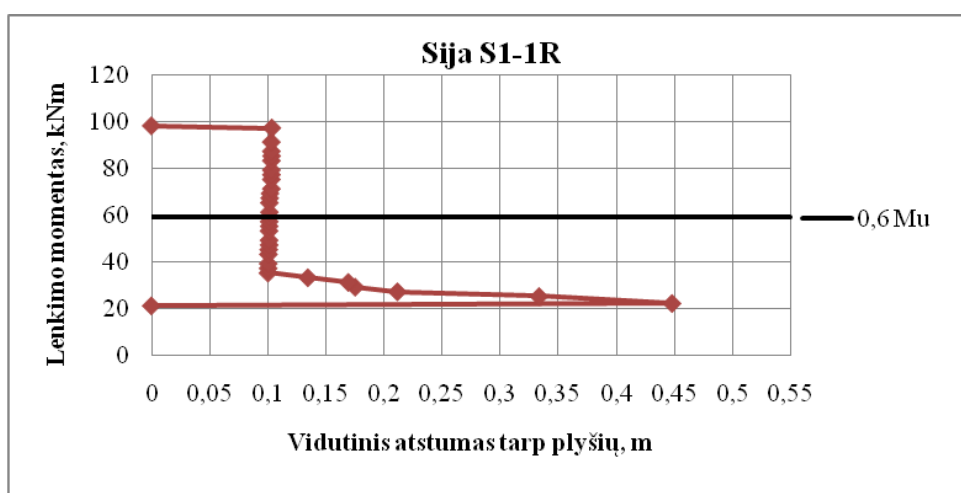




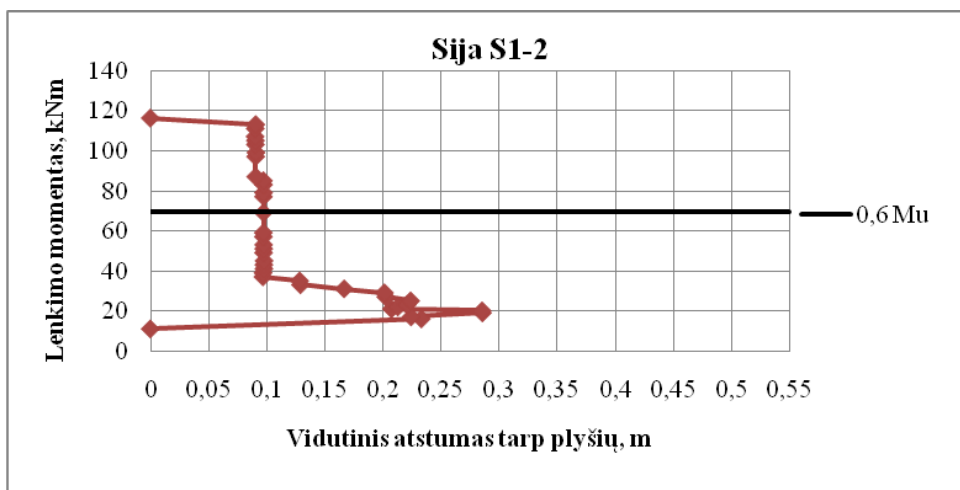
**37 pav.** Sijos *S1-3R* klasterinės analizės pavyzdys:

- a) sijos *S1-3R* grynojo lenkimo zonos pleišėjimo pobūdis; b) sijos *S1-3R* grynojo lenkimo zonos pleišėjimo pobūdis prie 34 kN ir 60 kN apkrovų; c) vietoj realaus plyšio sudaryta plyšio projekcija į  $x$  ašį; d) sijos *S1-3R* dendrograma prie 60 kN apkrovos; e) sijos *S1-3R* histograma prie 60 kN apkrovos

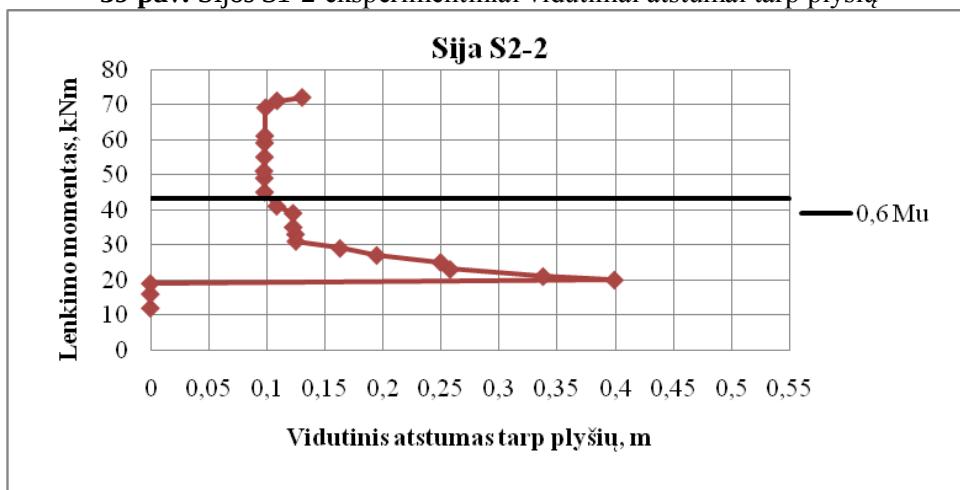
Klasterio metodu gautų vidutinių atstumų tarp plyšių kitimas apkrovos atžvilgiu pavaizduoti 38 pav. – 43 pav.



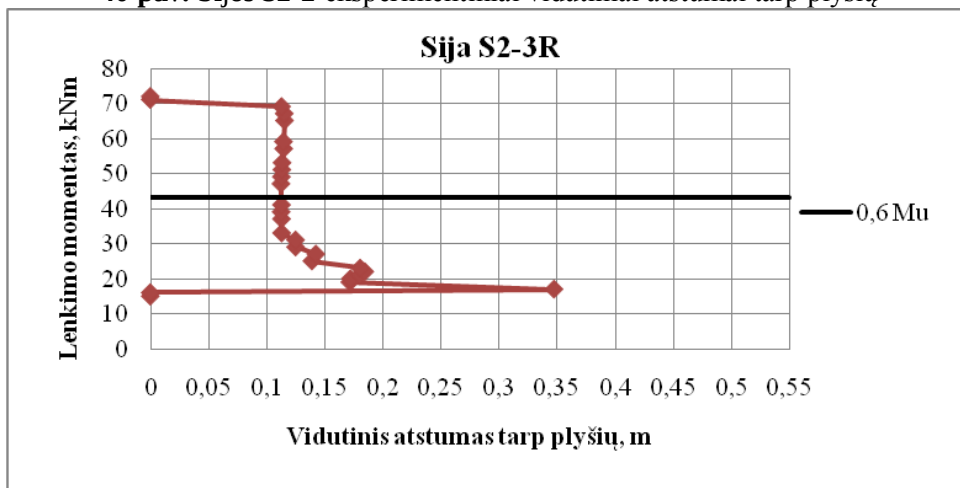
**38 pav.** Sijos *S1-1R* eksperimentiniai vidutiniai atstumai tarp plyšių



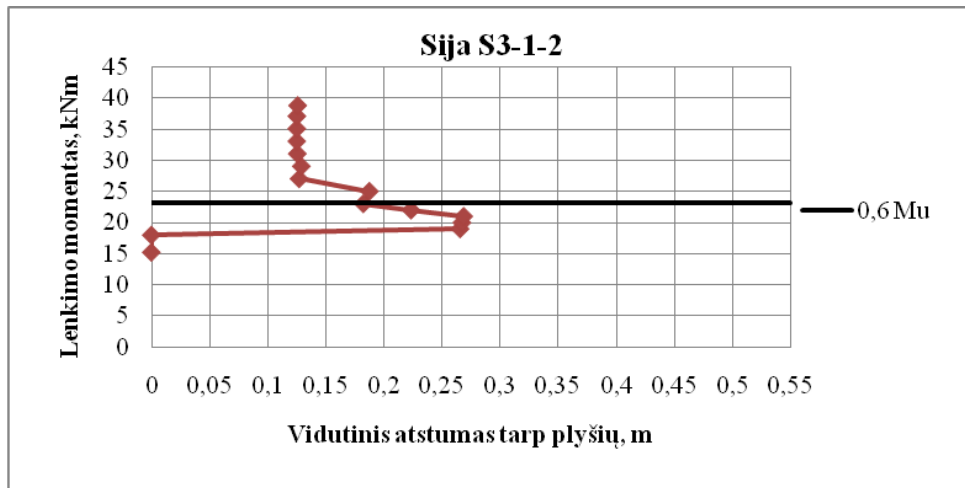
39 pav. Sijos S1-2 eksperimentiniai vidutiniai atstumai tarp plyšių



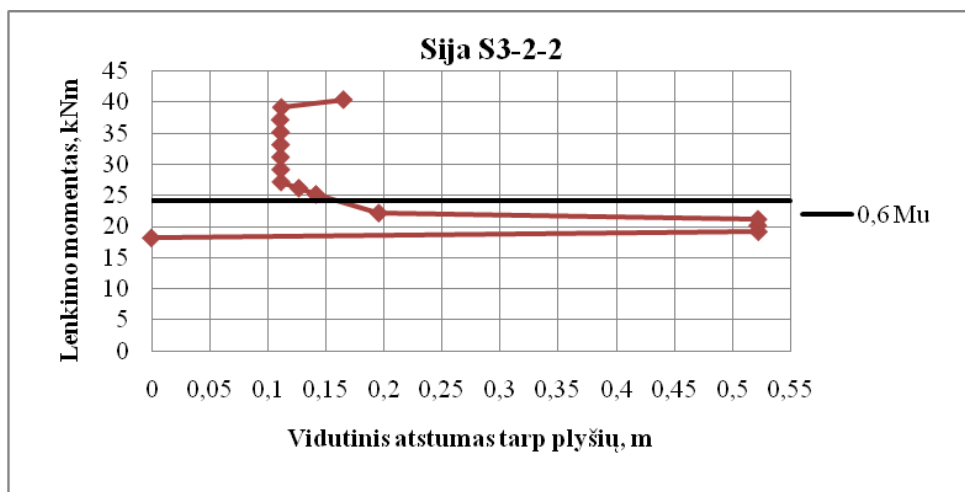
40 pav. Sijos S2-2 eksperimentiniai vidutiniai atstumai tarp plyšių



41 pav. Sijos S2-3R eksperimentiniai vidutiniai atstumai tarp plyšių



42 pav. Sijos S3-1-2 eksperimentiniai vidutiniai atstumai tarp plyšių



43 pav. Sijos S3-2-2 eksperimentiniai vidutiniai atstumai tarp plyšių

Iš gautų grafikų galime stebėti elemento pleišėjimo eigą: prie kokios apkrovos atsiranda pirmas plyšys, koks yra vidutinis atstumas tarp plyšių ir prie kokios apkrovos pasiekama nusistovėjusi pleišėjimo stadija.

Pirmas plyšys sijoje S1-2 (žr. 39 pav) atsiranda, kai lenkimo momentas  $M$  lygus  $11,186 \text{ kNm}$ , antras –  $M=16,186 \text{ kNm}$ . Vidutiniai atstumai, atsiradus pirmiesiems plyšiams elemente yra didžiausi, atsiradus daugiau, plyšių vidutinis atstumas tarp plyšių mažėja, kol pasiekama plyšių nusistovėjimo stadija. Šioje stadijoje vidutinis atstumas tarp plyšių išlieka pastovus, naujų plyšių sijoje neatsiranda. Plyšių nusistovėjimo stadija sijoje S1-2 pasiekama, kai  $M=36,186 \text{ kNm}$ , o plyšių skaičius  $n$  lygus 12. Ši stadija tęsiasi iki  $M=111,186 \text{ kNm}$ , vėliau atsiranda nauji plyšiai ir sija sužyra  $M=116,386 \text{ kNm}$ .

Beveik visose sijose aiškiai pastebima nusistovėjusio pleišėjimo stadija. Visų sijų klasterio metodu gautų vidutinių atstumų tarp plyšių kitimas apkrovos atžvilgiu grafikai pateikti B priede, o grafikų analizės rezultatai pateikti 3.1. lentelėje.

**3.1 lentelė.** Vidutinių atstumų tarp plyšių grafikų analizės rezultatai

| <b>Sija</b> | <b><math>p</math>, %</b> | <b><math>L_{vid.}/L_{ser}</math></b> | <b><math>n</math></b> |
|-------------|--------------------------|--------------------------------------|-----------------------|
| S1-1        | 1,00                     | ~0,99                                | 9                     |
| S1-1R       | 1,02                     | ~1,00                                | 10                    |
| S1-2        | 1,00                     | ~1,00                                | 12                    |
| S1-3        | 0,99                     | ~1,36                                | 9                     |
| S1-3R       | 1,02                     | ~1,16                                | 10                    |
| S1-4        | 1,02                     | ~0,82                                | 10                    |
| S2-1        | 0,61                     | ~0,88                                | 13                    |
| S2-2        | 0,62                     | ~1,05                                | 11                    |
| S2-3        | 0,61                     | ~0,88                                | 11                    |
| S2-3R       | 0,61                     | ~1,00                                | 9                     |
| S3-1-1      | 0,30                     | ~0,50                                | 9                     |
| S3-1-2      | 0,32                     | ~0,70                                | 8                     |
| S3-2-1      | 0,30                     | ~0,74                                | 8                     |
| S3-2-2      | 0,30                     | ~0,79                                | 10                    |
| S3-2-3      | 0,30                     | ~0,89                                | 8                     |
| S3-2-6      | 0,30                     | ~0,70                                | 8                     |
| S3-2-9      | 0,30                     | ~0,99                                | 7                     |
| S3-2-10     | 0,30                     | ~1,01                                | 7                     |

Lentelėje  $L_{vid.}$  – vidutinis atstumas tarp plyšių nusistovėjusioje pleišėjimo stadijoje;  $L_{ser}$  – vidutinis atstumas tarp plyšių prie eksploatacinės apkrovos.

### 3.5. Baigiamosios skyriaus išvados ir pastabos

1. *Klasteris* - tai panašių objektų grupė, sudaryta iš kelių, vieno tipo, elementų. *Klasterinė* analizė — tai metodas, taikomas, norint atskirti panašių objektų grupes (*klasterius*) taip, kad skirtumai klasterių viduje būtų mažesni, nei skirtumai tarp klasterių. Išskiriami du pagrindiniai *klasterinės* analizės metodai — *hierarchiniai* ir *nehierarchiniai* metodai.
2. Taikant matematinį klasterio metodą, iš eksperimentinių tyrimų pleišėjimų schemų kiekvienos serijos sijoms nustatytas vidutinis atstumas tarp plyšių. Taikydami *hierarchinį klasterio* metodą gauname bendrą visų *klasterių* tarpusavio

priklausomybių struktūrą t.y. *klasterių* skaičių ir vidutinį atstumą tarp jų, šiuo atveju *klasteriai* atitinka sijos plyšius, o vidutiniai atstumai tarp *klasterių* – vidutinius atstumus tarp plyšių.

3. Taikant analizės rezultatus galima stebėti elemento pleišėjimo eigą: prie kokios apkrovos atsiranda pirmas plyšys, koks yra vidutinis atstumas tarp plyšių ir prie kokios apkrovos pasiekama nusistovėjusi pleišėjimo stadija.

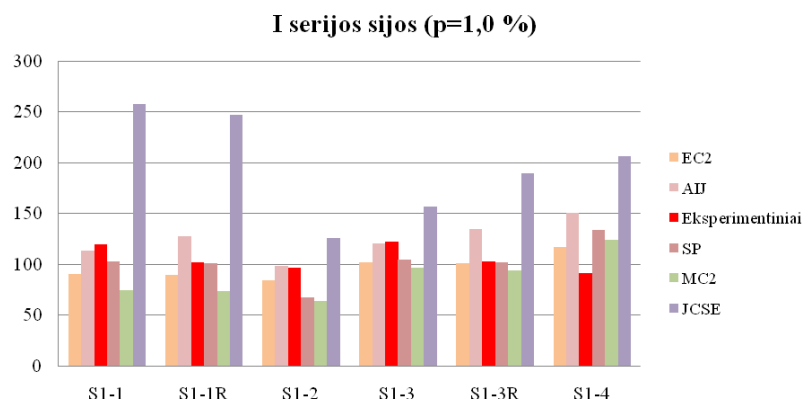
## 4. EKSPERIMENTINIŲ IR TEORINIŲ REZULTATŲ PALYGINIMAS

### 4.1. Bendros žinios

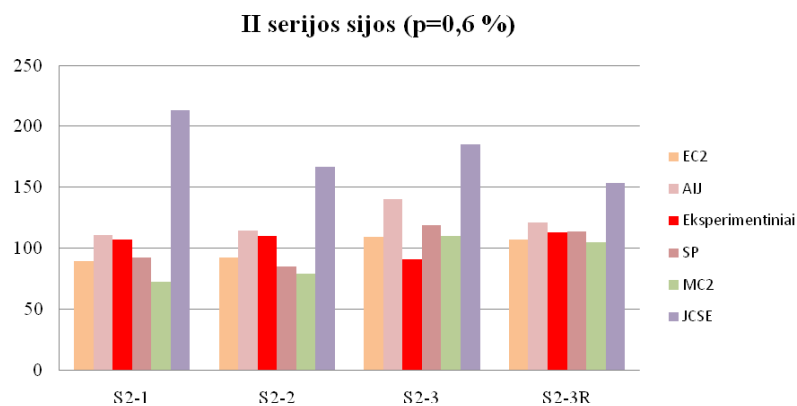
Šiame skyriuje pateiktas eksperimentinių vidutinių atstumų tarp plyšių ir plyšio palyginimas su teoriniais skaičiavimų rezultatais. Teorinių skaičiavimų modeliai aprašyti 1.7 ir 1.8 poskyriuose. Atlikta vidutinio atstumo tarp plyšių duomenų statistinė analizė.

### 4.2. Eksperimentinių ir teorinių vidutinių atstumų tarp plyšių rezultatų palyginimas

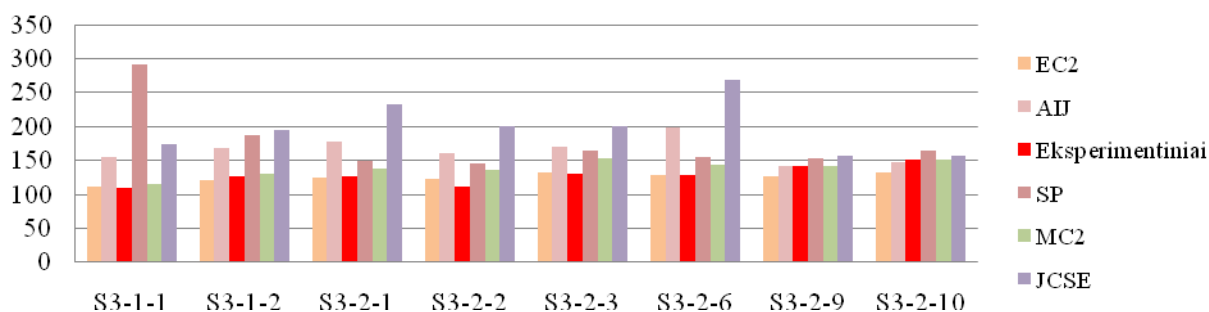
Vidutinių atstumų tarp plyšių apskaičiuotų, taikant projektavimo normas, palyginimas su eksperimentinių tyrimų rezultatais pateiktas 44 - 46 pav. Šiuose paveiksluose *EC2* atitinka Euronormas [15], *AIJ* – Japonų architektūros instituto normos [3], *SP* – Rusijos normos [36], *MC90* – Europos betono komiteto rekomendacijas [13], *JSCE* – Japonijos statybos inžinierių sąjungos rekomendacijas [4], *BS8110* – Britanijos projektavimo normų [8]



**44 pav.** I serijos sijų vidutinių atstumų tarp plyšių eksperimentinių ir teorinių rezultatų palyginimas (pagal normas)

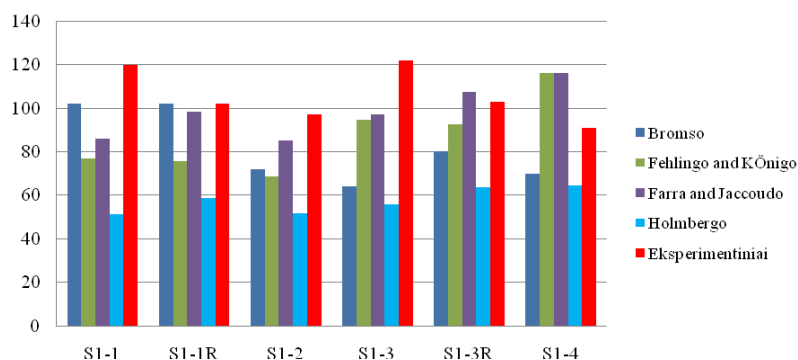


**45 pav.** II serijos sijų vidutinių atstumų tarp plyšių eksperimentinių ir teorinių rezultatų palyginimas (pagal normas)

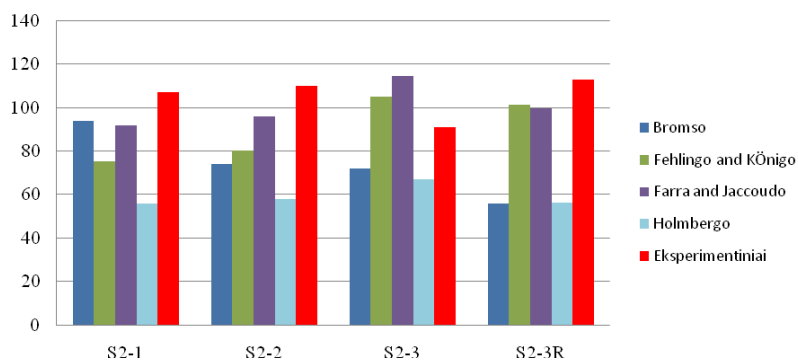
III serijos sijos ( $p=0,3\%$ )

**46 pav.** III serijos sijų vidutinių atstumų tarp plyšių eksperimentinių ir teorinių rezultatų palyginimas (pagal normas)

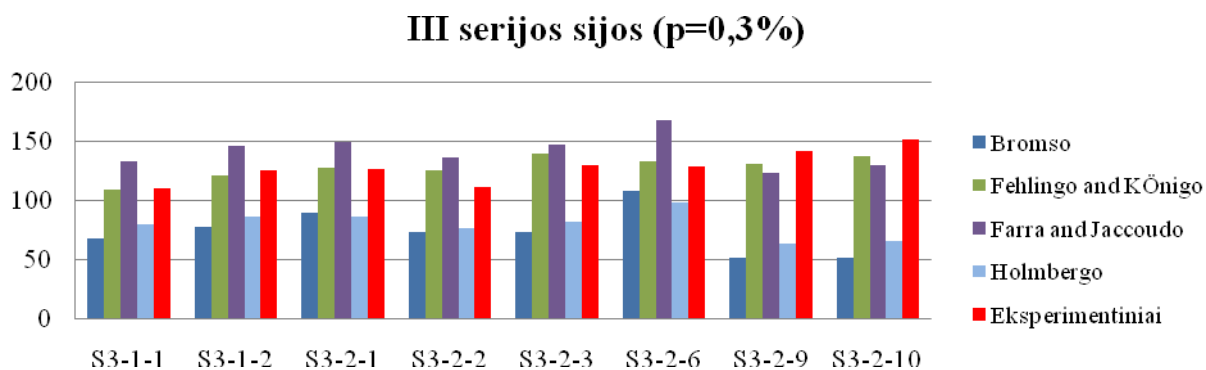
Vidutinių atstumų tarp plyšių, taikant alternatyvius skaičiavimo metodus, palyginimas su eksperimentinių tyrimų rezultatais pateikti 47 – 49 pav.

I serijos sijos ( $p=1,0 \%$ )

**47 pav.** I serijos sijų vidutinių atstumų tarp plyšių eksperimentinių ir teorinių rezultatų palyginimas (pagal alternatyvius skaičiavimus)

II serijos sijos ( $p=0,6 \%$ )

**48 pav.** II serijos sijų vidutinių atstumų tarp plyšių eksperimentinių ir teorinių rezultatų palyginimas (pagal alternatyvius skaičiavimus)



**49 pav.** III serijos sijų vidutinių atstumų tarp plyšių eksperimentinių ir teorinių rezultatų palyginimas (pagal alternatyvius skaičiavimus)

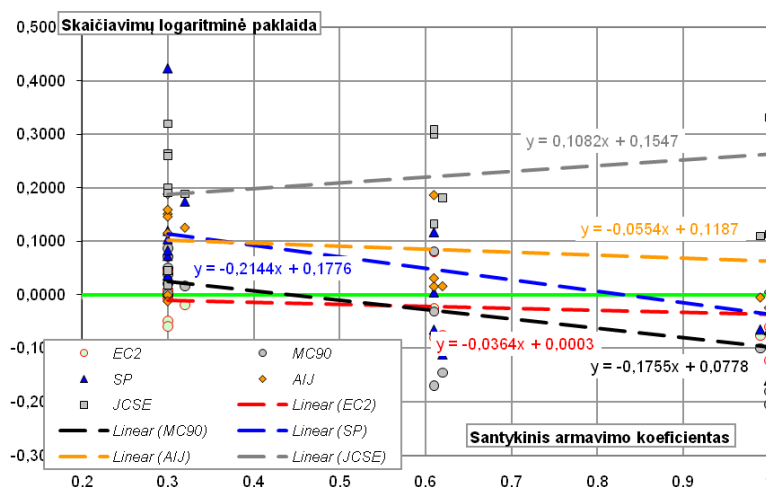
Teorinių ir eksperimentinių vidutinių atstumų tarp plyšių duomenys pateikti 4.1 lentelėje, o detali rezultatų palyginimo statistinė analizė 4.3 poskyryje.

4.1 lentelė. Teorinių ir eksperimentinių vidutinių atstumų tarp plyšių duomenys

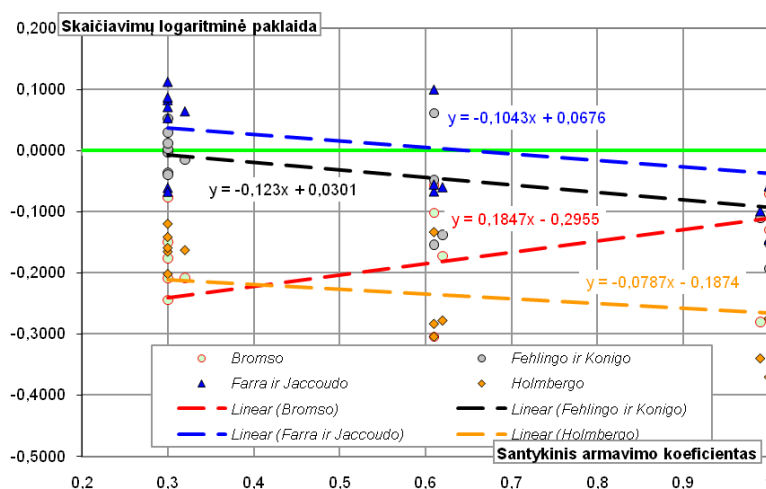
| Sija    | Vidutiniai atstumai tarp plyšių (mm) |     |                    |                   |     |           |     |     |      |                  |
|---------|--------------------------------------|-----|--------------------|-------------------|-----|-----------|-----|-----|------|------------------|
|         | Bromso                               | EC2 | Fehlingo ir Konigo | Farra ir Jaccoudo | AIJ | Holmbergo | SP  | MC2 | JCSE | Eksperimentiniai |
| S1-1    | 102                                  | 90  | 77                 | 86                | 113 | 51        | 103 | 75  | 258  | 120              |
| S1-1R   | 102                                  | 90  | 76                 | 98                | 128 | 59        | 101 | 73  | 247  | 102              |
| S1-2    | 72                                   | 85  | 68                 | 85                | 98  | 52        | 67  | 64  | 126  | 97               |
| S1-3    | 64                                   | 102 | 95                 | 97                | 121 | 56        | 105 | 97  | 157  | 122              |
| S1-3R   | 80                                   | 101 | 92                 | 107               | 135 | 64        | 102 | 94  | 189  | 103              |
| S1-4    | 70                                   | 117 | 116                | 116               | 151 | 65        | 134 | 124 | 207  | 91               |
| S2-1    | 94                                   | 89  | 75                 | 92                | 111 | 56        | 92  | 72  | 213  | 107              |
| S2-2    | 74                                   | 92  | 80                 | 96                | 114 | 58        | 85  | 79  | 167  | 110              |
| S2-3    | 72                                   | 109 | 105                | 115               | 140 | 67        | 119 | 110 | 185  | 91               |
| S2-3R   | 56                                   | 107 | 101                | 100               | 121 | 56        | 114 | 105 | 153  | 113              |
| S3-1-1  | 68                                   | 112 | 109                | 133               | 156 | 80        | 291 | 115 | 174  | 110              |
| S3-1-2  | 78                                   | 121 | 122                | 146               | 168 | 87        | 188 | 131 | 194  | 126              |
| S3-2-1  | 90                                   | 125 | 128                | 150               | 178 | 87        | 150 | 139 | 234  | 127              |
| S3-2-2  | 74                                   | 123 | 125                | 136               | 160 | 77        | 146 | 136 | 202  | 111              |
| S3-2-3  | 74                                   | 133 | 139                | 147               | 170 | 82        | 165 | 153 | 202  | 130              |
| S3-2-6  | 108                                  | 128 | 133                | 167               | 199 | 98        | 156 | 145 | 270  | 129              |
| S3-2-9  | 52                                   | 127 | 131                | 124               | 142 | 64        | 154 | 142 | 158  | 142              |
| S3-2-10 | 52                                   | 132 | 138                | 130               | 147 | 66        | 164 | 151 | 158  | 151              |

#### 4.3. Vidutinių atstumų tarp plyšių statistinė analizė

Atlikta statistinė analizė (žr. 50 -51 pav. ) iliustruoja teorinių vidutinių atstumų tarp plyšių skaičiavimo metodų sisteminių paklaidų priklausomybės nuo armavimo koeficiento. Statistinė analizė, atlikta prie eksploatacinės apkrovos  $M_{ser}$ , nurodo, kurie skaičiavimo metodai vidutinius atstumus tarp plyšių skaičiuoja tiksliausiai.



50 pav. Projektavimo normų sisteminės paklaidos priklausomybė nuo armavimo koeficiento



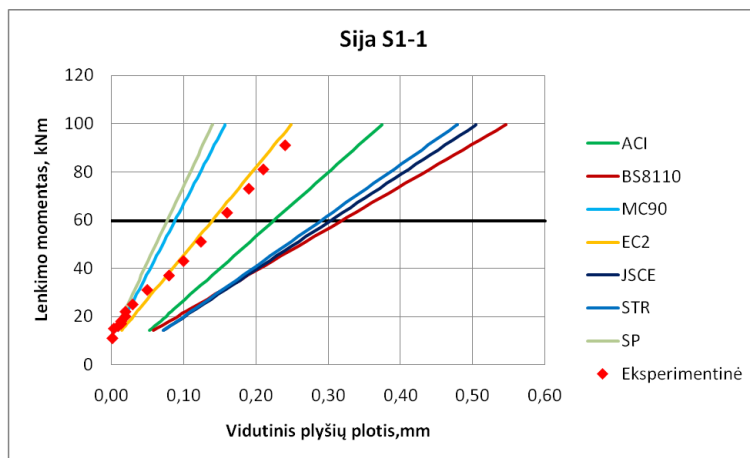
51 pav. Alternatyvių metodų sisteminės paklaidos priklausomybė nuo armavimo koeficiento

Iš pateiktų statistinės analizės rezultatų matyti, kad patikimiausi skaičiavimo metodai yra EC2 ir MC90. Teoriniai skaičiavimai nuo eksperimentinių atitinkamai skiriasi 5,1 % ir 6,8 %. Šių metodų

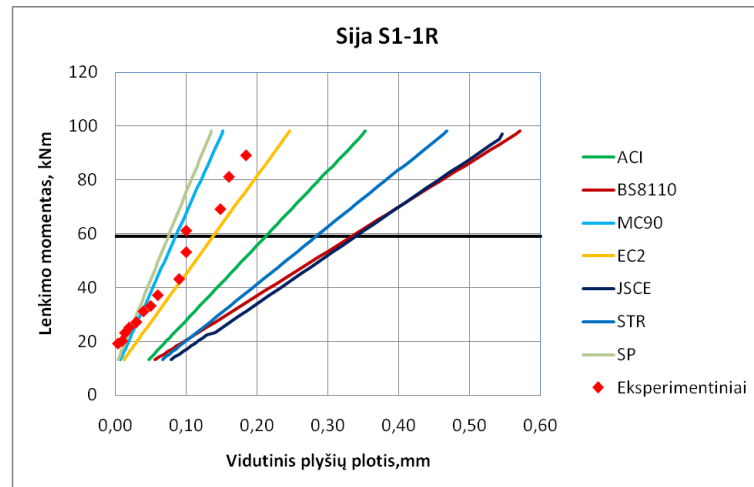
rezultatams elementų armavimo procentas  $p$  % įtakos neturi. *EC2* ir *MC90* normos nepakankamai įvertina vidutinį atstumą tarp plyšių. *SP* normos vidutinį atstumą tarp plyšių pervertina ~11 %. *Fehlingo* ir *Konigo* pasiūlitas skaičiavimo metodas vidutinio atstumo tarp plyšių ~11 % nedavertina. *AIJ* normos vidutinį atstumą tarp plyšių pervertina ~20 %, bet silpai armuotus elementus, kurių armavimo procentas siekia iki 0,5 %, skaičiuoja patikimai. Iš alternatyvių skaičiavimo modelių patikimiausias yra *Farra* ir *Jaccoudo* vidutinio atstumo tarp plyšių modelis. Modelio paklaida siekia vos 1 %. Kitais metodais gaunamos paklaidos viršija 50 % : *Bromso* - ~53 %, *JSCE* - ~66 %, *Holmbergo* - *JSCE* - ~66 %

#### 4.4. Plyšių pločių rezultatų palyginimas

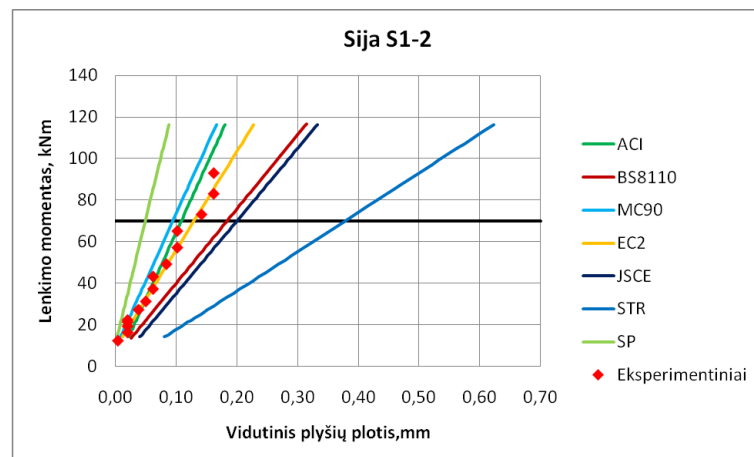
Šiame poskyryje pateikiami plyšio pločio eksperimentinių ir teorinių rezultatų palyginimas. I serijos sijų ( $p=1,0$  %) eksperimentinių ir projektavimo normų rezultatų palyginimas pateikiamas 52-57 paveiksluose.



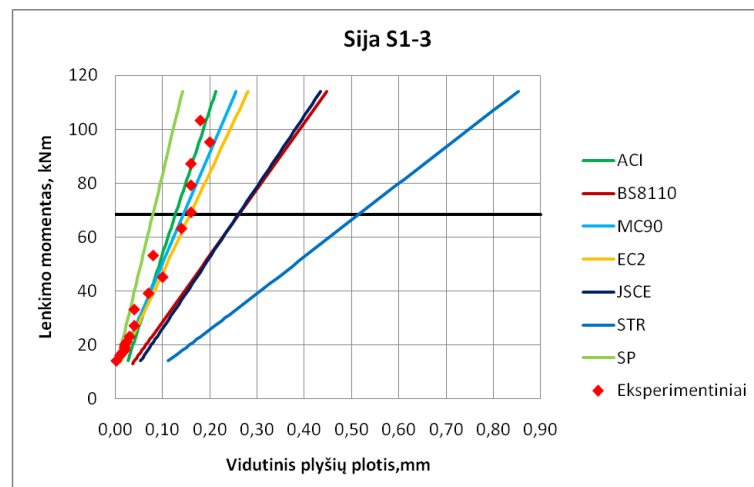
52 pav. Sijos S1-1 rezultatų palyginimas



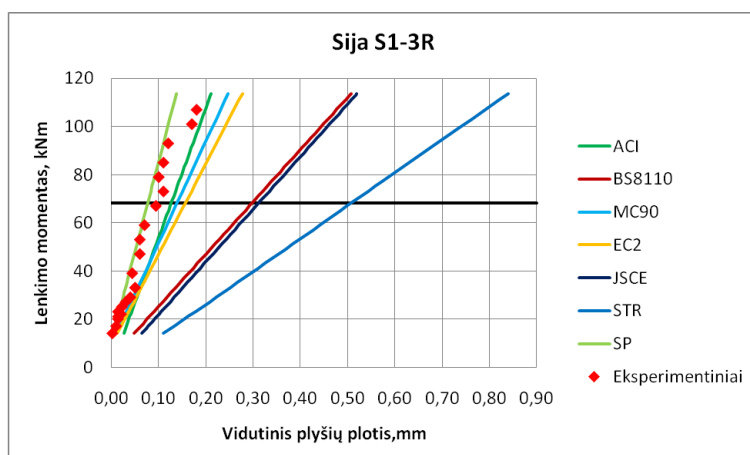
53 pav. Sijos S1-1R rezultatų palyginimas



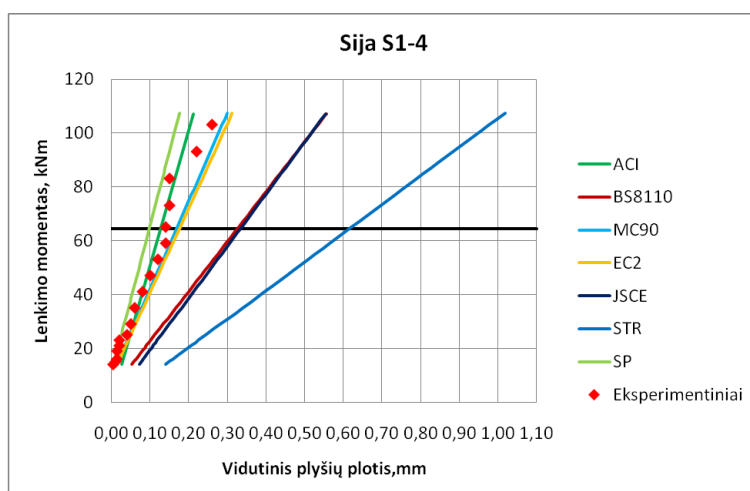
54 pav. Sijos S1-2 rezultatų palyginimas



55 pav. Sijos S1-3 rezultatų palyginimas



56 pav. Sijos S1-3R rezultatų palyginimas



57 pav. Sijos S1-4 rezultatų palyginimas

Iš gautų momentų ir plyšio pločio priklausomybių diagramų, matyti, kad labiausiai su eksperimentiniais rezultatais sutampa *EC2*, *ACI* ir *MC90* normų siūlomos plyšio pločio skaičiavimo išraiškos.

Skaičiuojant plyšio plotį pagal *ACI*, *BS8110* normas, plyšio plotis mažėja sijose *S1-2*, *S1-3*, *S1-3R*, *S1-4*. Šių sijų armatūros skersmuo siekia nuo 14 mm iki 18 mm, o atstumai tarp armatūros strypų atitinkamai lygūs 28 mm, 111 mm, 111 mm, 180 mm (žr. 16 pav.) Skaičiuojant pagal *MC90*, *STR* normas šių sijų plyšio plotis prie  $M_{ser}$  apkrovos yra didesnis nei sijų *S1-1*, *S1-1R*. Skaičiuojant plyšio plotį pagal kitas normas armatūros skersmuo ir armatūros išdėstymas įtakos plyšio pločiui neturi.

Didžiausias teorinių ir eksperimentinių plyšio pločio rezultatų skirtumas yra skaičiuojant plyšio plotį pagal *SP* normas, plyšio pločio skirtumas nuo eksperimento metu gautų rezultatų skiriasi

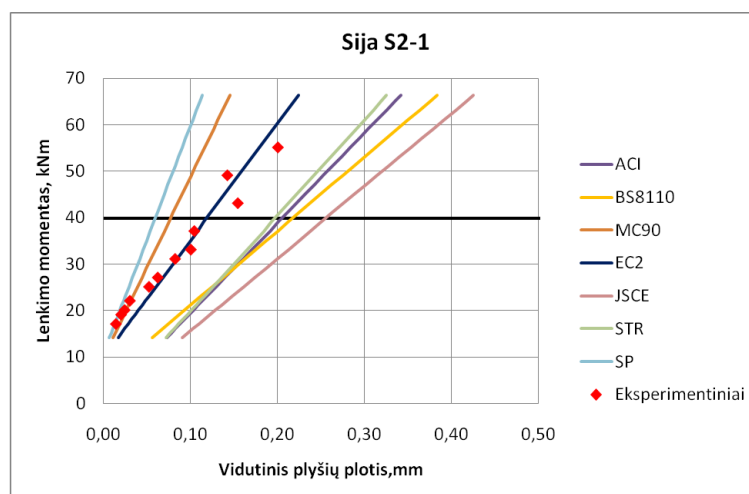
iki 85 %. I serijos sijų, prie eksplotacinės apkrovos, rezultatų santykis su eksperimentiniais plyšio pločiais pateiki 4.2 lentelėje. Teorinių ir eksperimentinių vidutinių plyšio pločių reikšmės prie  $M_{ser}$  pateiktos C priede.

**4.2 lentelė.** I serijos sijų eksperimentinių ir teorinių rezultatų santykis prie  $M_{ser}$  apkrovos

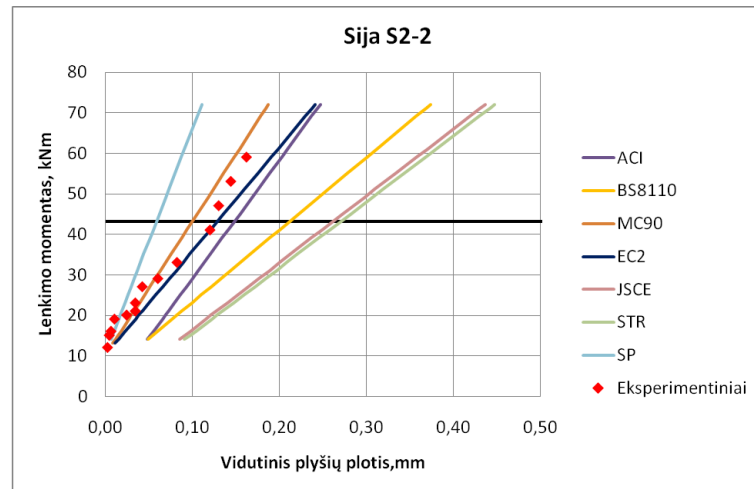
| Sijos<br>Nr.                         | $W_{m,exp}/W_{m,calc}$ |      |      |        |      |      |      |
|--------------------------------------|------------------------|------|------|--------|------|------|------|
|                                      | EC2                    | MC90 | ACI  | BS8110 | JSCE | STR  | SP   |
| S1-1                                 | 1,15                   | 1,82 | 0,72 | 0,50   | 0,53 | 0,55 | 2,22 |
| S1-1R                                | 0,72                   | 1,18 | 0,47 | 0,30   | 0,30 | 0,35 | 1,33 |
| S1-2                                 | 1,10                   | 1,49 | 1,31 | 0,77   | 0,71 | 0,38 | 2,90 |
| S1-3                                 | 1,01                   | 1,40 | 1,25 | 0,61   | 0,61 | 0,31 | 2,00 |
| S1-3R                                | 0,60                   | 0,68 | 0,74 | 0,32   | 0,30 | 0,19 | 1,22 |
| S1-4                                 | 0,80                   | 0,83 | 1,10 | 0,43   | 0,42 | 0,23 | 1,43 |
| <b>Rezultatų<br/>skirtumas<br/>%</b> | 25                     | 25   | 33   | 51     | 52   | 67   | 85   |

Pagal 4.2 lentelėje pateiktus duomenis matyti, kad eksperimentinių ir *EC2* normų plyšių pločių santykis kinta nuo 0,72 iki 1,15, šios normos nuo eksperimentinių rezultatų skiriasi ~25 %, panašius rezultatus gauname skaičiuojant pagal *MC90* normas: eksperimentinių ir teorinių skaičiavimų santykis kinta nuo 0,68 iki 1,82 ir nuo eksperimentinių duomenų skiriasi ~ 25 %, *ACI* kinta nuo 0,47 iki 1,31, skiriasi ~33 %. *BS8110* kinta nuo 0,30 iki 1,77, skiriasi ~51 %. *JSCE* nuo eksperimentinių duomenų skiriasi ~52 %, kinta nuo 0,30 iki 0,71

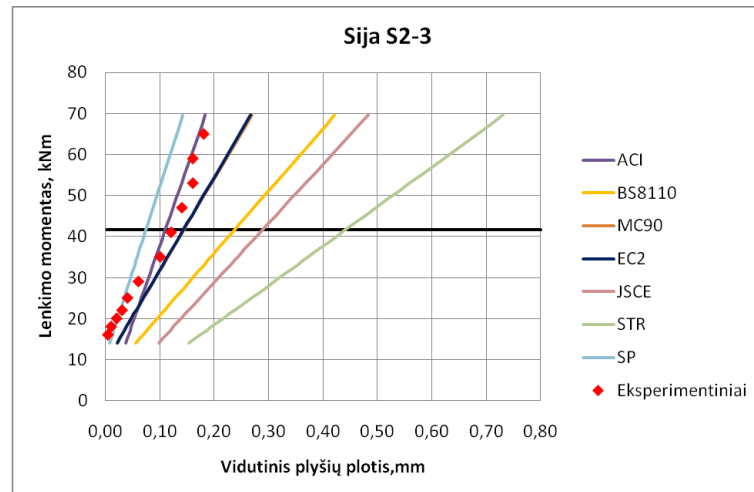
II serijos sijų ( $p=0,60$  %) eksperimentinių ir projektavimo normų rezultatų palyginimas pateiktas 58-61 paveiksluose.



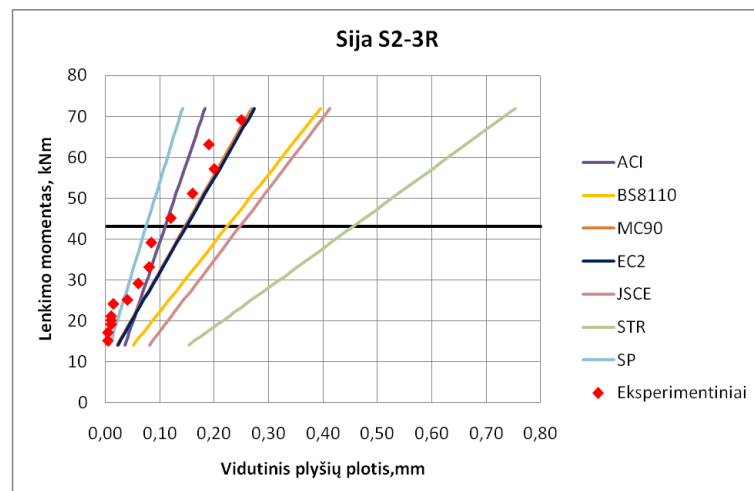
**58 pav.** Sijos S2-1 rezultatų palyginimas



59 pav. Sijos S2-2 rezultatų palyginimas



60 pav. Sijos S2-3 rezultatų palyginimas



61 pav. Sijos S2-3R rezultatų palyginimas

II serijos eksperimentinių kreivių reikšmės artėja prie *EC2* normų. Didžiausias teorinių ir eksperimentinių plyšio pločio rezultatų skirtumas yra skaičiuojant plyšio plotį pagal *SP* normas, rezultatai skiriasi ~92 %. II serijos sijų, prie eksplotacinės apkrovos, rezultatų santykis su eksperimentiniais plyšio pločiais pateiki 4.3 lentelėje.

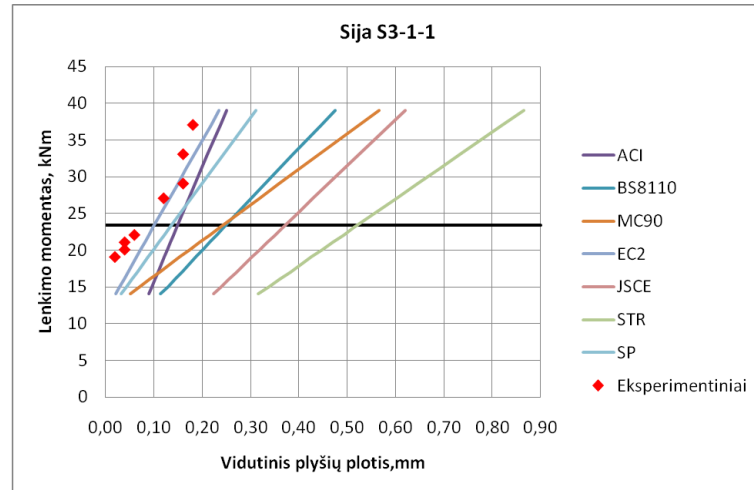
**4.3 lentelė.** II serijos sijų eksperimentinių ir teorinių rezultatų santykis prie  $M_{ser}$  apkrovos

| Sijos<br>Nr.                | $W_{m,exp}/W_{m,calc}$ |      |      |      |        |      |      |
|-----------------------------|------------------------|------|------|------|--------|------|------|
|                             | ACI                    | EC2  | MC90 | JSCE | BS8110 | STR  | SP   |
| S2-1                        | 0,75                   | 1,29 | 2,00 | 0,60 | 0,71   | 0,78 | 2,61 |
| S2-2                        | 0,82                   | 0,95 | 1,22 | 0,47 | 0,58   | 0,45 | 2,07 |
| S2-3                        | 1,16                   | 0,89 | 0,88 | 0,44 | 0,54   | 0,29 | 1,71 |
| S2-3R                       | 0,91                   | 0,67 | 0,68 | 0,40 | 0,45   | 0,22 | 1,33 |
| Rezultatų<br>skirtumas<br>% | 17                     | 20   | 41   | 52   | 54     | 57   | 93   |

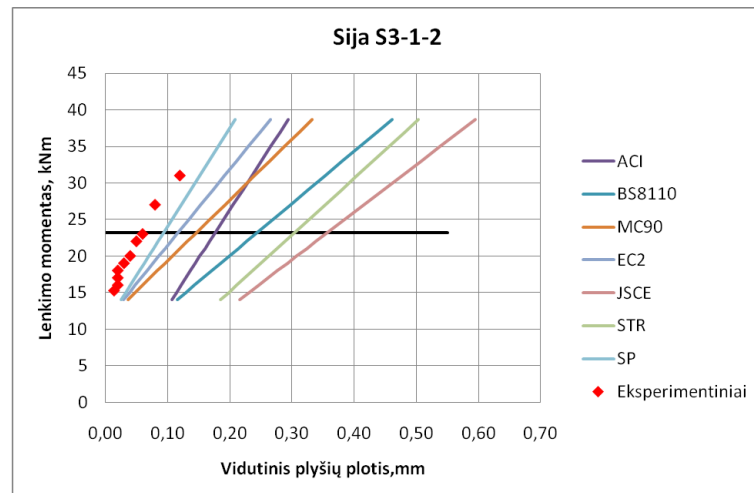
Skaičiuojant plyšio plotį pagal *ACI* normas, matome, kad plyšio plotis mažėja sijose S2-3, S2-3R. Šių sijų armatūros skersmuo 14 mm, o atstumas tarp armatūros strypų yra lygus 113 mm (žr. 16 pav.) Skaičiuojant pagal *MC90*, *STR* normas šių sijų plyšio plotis prie  $M_{ser}$  apkrovos yra didesnis nei sijų S2-1, S2-2., kurių armatūros skersmuo nuo 6 mm iki 8 mm, o atstumas tarp armatūros strypų atitinkamai lygus 59 mm ir 58 mm. Skaičiuojant plyšio plotį pagal *BS8110* ir *JSCE* normas armatūros skersmuo ir armatūros išdėstymas įtakos plyšio pločiui neturi.

Pagal 4.3 lentelėje pateiktus duomenis matyti: eksperimentinių ir *ACI* normų plyšių pločių santykis kinta nuo 0,75 iki 1,16, šios normos nuo eksperimentinių rezultatų skiriasi ~17 %. *EC2* normos kinta nuo 0,67 iki 1,29, skiriasi ~ 20 %, *MC90* kinta nuo 0,68 iki 2,00, skiriasi ~42 %. *JSCE*, *BS8110* ir *STR* normų nuo eksperimentinių rezultatų skiriasi beveik vienodai: *JSCE* kinta nuo 0,40 iki 0,60, skiriasi ~52 %, *BS8110* kinta nuo 0,45 iki 0,71, skiriasi ~54 %, *STR* kinta nuo 0,22 iki 0,78 skiriasi ~57 %.

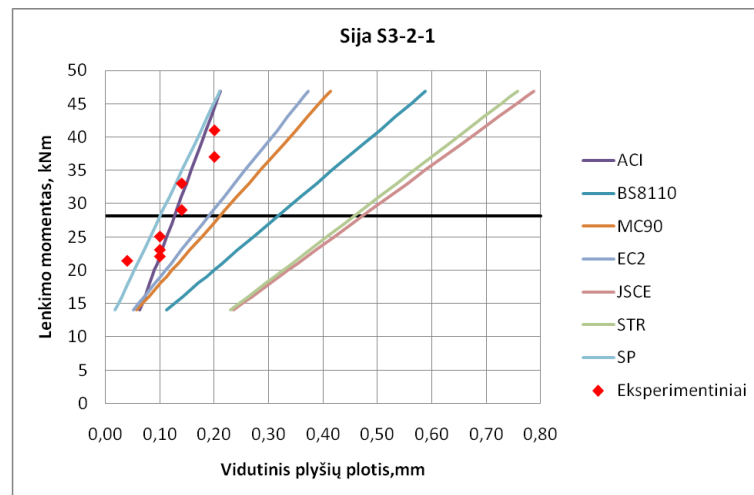
III serijos sijų ( $p=0,30$  %) eksperimentinių ir projektavimo normų rezultatų palyginimas pateiktas 62-69 paveiksluose.



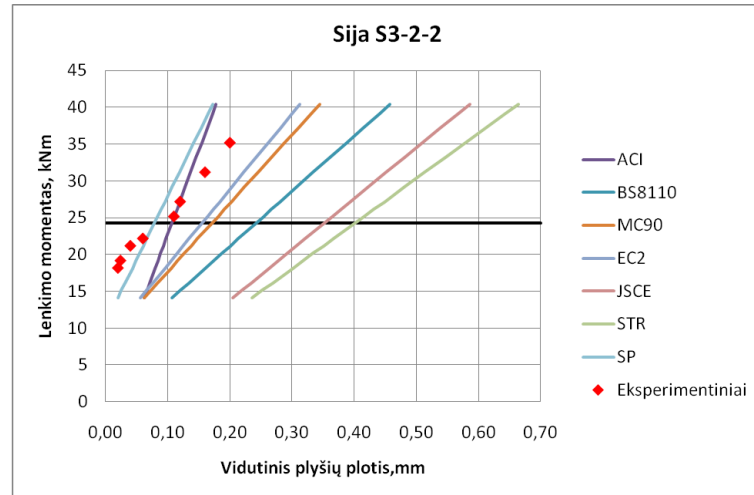
**62 pav. Sijos S3-1-1 rezultatų palyginimas**



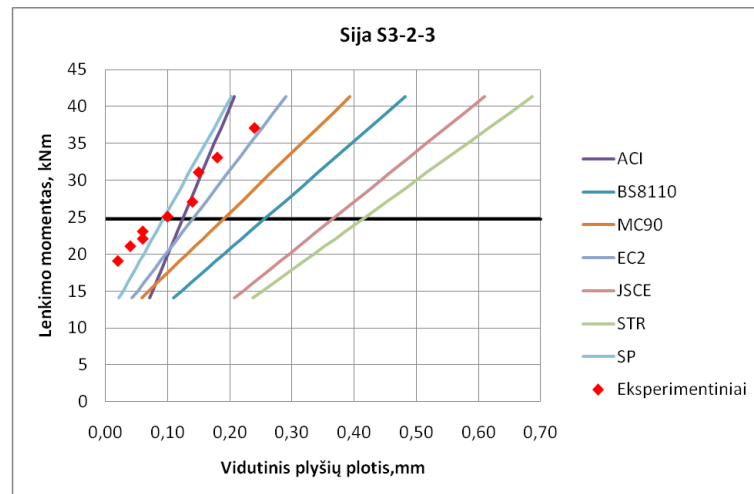
**63 pav. Sijos S3-1-2 rezultatų palyginimas**



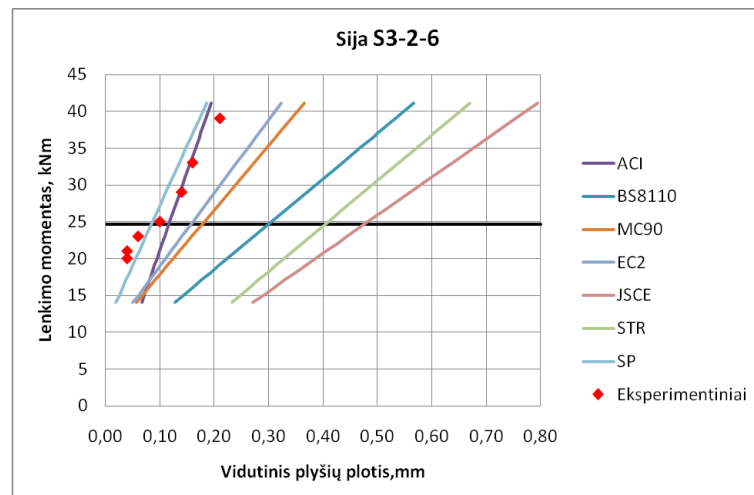
**64 pav. Sijos S3-2-1 rezultatų palyginimas**



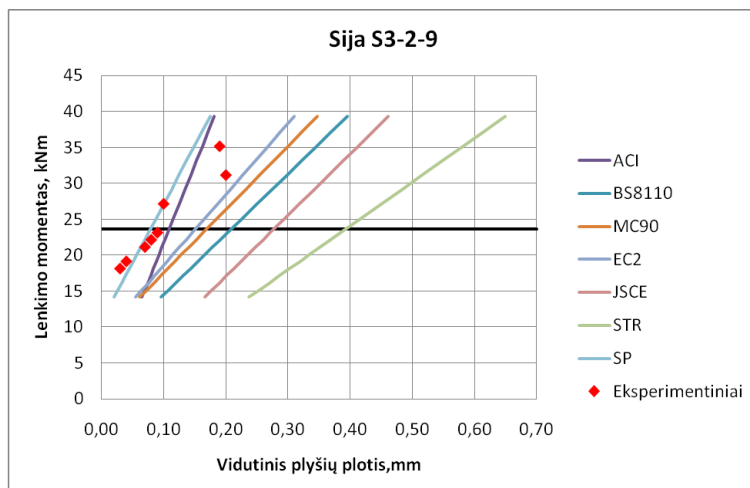
**65 pav.** Sijos S3-2-2 rezultatų palyginimas



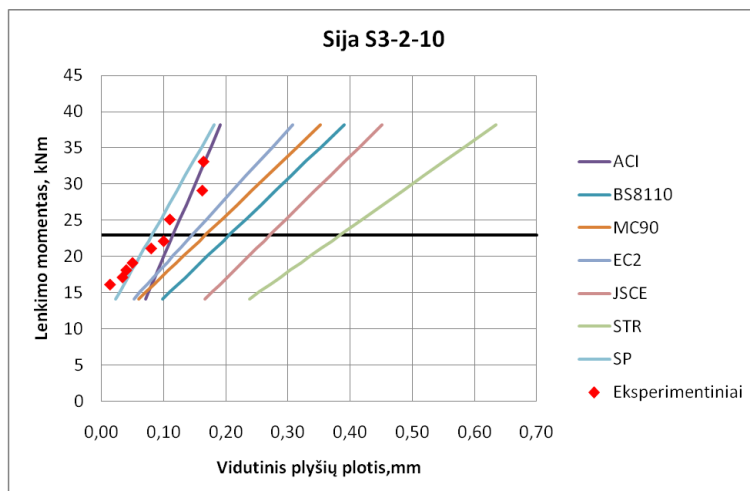
**66 pav.** Sijos S3-2-3 rezultatų palyginimas



**67 pav.** Sijos S3-2-6 rezultatų palyginimas



68 pav. Sijos S3-2-9 rezultatų palyginimas



69 pav. Sijos S3-2-10 rezultatų palyginimas

Iš gautų momentų ir plyšio pločio priklausomybių diagramų, matyti, kad III serijos sijų, kurių armavimo procentas yra mažas, labiausiai prie eksperimentinių rezultatų priartėja *ACI* normos. Didžiausią galimo plyšio pločio atsargą įvertina *STR* ir *JSCE*. III serijos sijų rezultatai pateiki 4.4 lentelėje.

4.4 lentelė. III serijos sijų eksperimentinių ir teorinių rezultatų santykis prie  $M_{ser}$  apkrovos

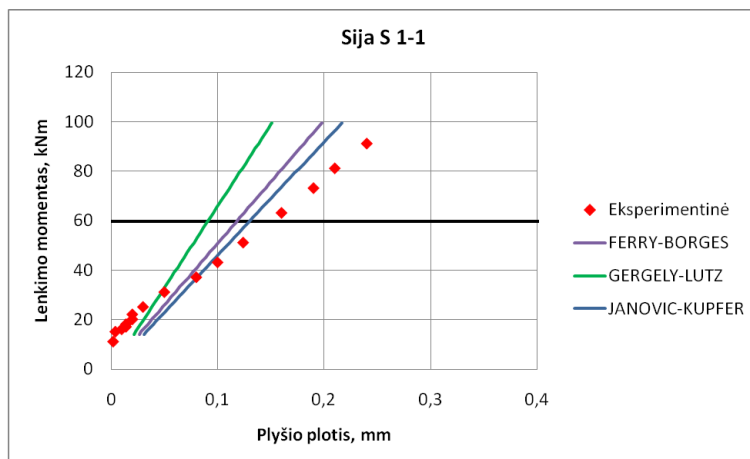
| Sijos<br>Nr. | $W_{m,exp}/W_{m,calc}$ |      |      |      |        |      |      |
|--------------|------------------------|------|------|------|--------|------|------|
|              | ACI                    | SP   | EC2  | MC90 | BS8110 | JSCE | STR  |
| S3-1-1       | 0,56                   | 0,61 | 0,83 | 0,34 | 0,34   | 0,23 | 0,16 |
| S3-1-2       | 0,34                   | 0,64 | 0,51 | 0,41 | 0,25   | 0,17 | 0,20 |

4.4 lentelės tęsinys

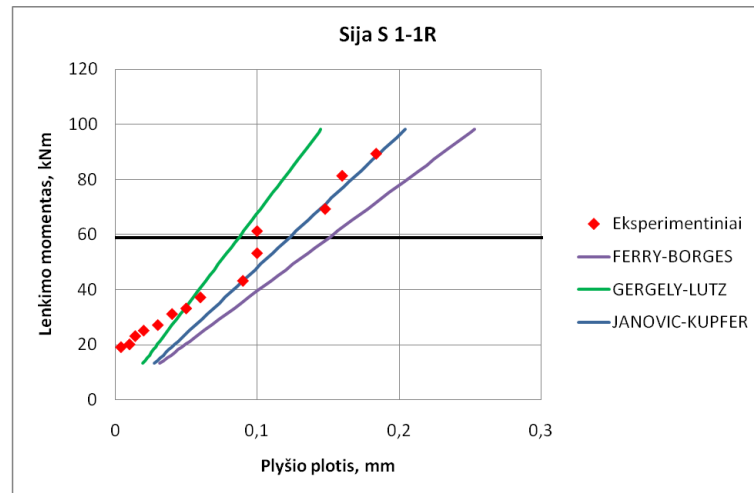
|                              |      |      |      |      |      |      |      |
|------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| S3-2-1                       | 1,10 | 1,40 | 0,74 | 0,67 | 0,44 | 0,30 | 0,31 |
| S3-2-2                       | 1,03 | 1,39 | 0,71 | 0,64 | 0,45 | 0,31 | 0,27 |
| S3-2-3                       | 0,81 | 1,08 | 0,71 | 0,53 | 0,39 | 0,27 | 0,24 |
| S3-2-6                       | 0,86 | 1,18 | 0,63 | 0,56 | 0,33 | 0,21 | 0,25 |
| S3-2-9                       | 0,88 | 1,23 | 0,64 | 0,57 | 0,46 | 0,35 | 0,24 |
| S3-2-10                      | 0,87 | 1,23 | 0,69 | 0,60 | 0,49 | 0,37 | 0,26 |
| <b>Rezultatų skirtumas %</b> | 23   | 28   | 32   | 46   | 61   | 73   | 76   |

Pagal 4.4 lentelėje pateiktus duomenis matyti: eksperimentinių ir *ACI* normų plyšių pločių santykis kinta nuo 0,34 iki 1,10, šios nomos nuo eksperimentinių rezultatų skiriasi ~23 %. *SP* normos kinta nuo 0,61 iki 1,40, skiriasi ~28 %, *EC2* kinta nuo 0,51 iki 0,83, skiriasi ~32 %. *MC90* kinta nuo 0,34 iki 0,67, skiriasi ~46 %. *BS8110* kinta nuo 0,25 iki 0,49, skiriasi ~73 %, *STR* kinta nuo 0,16 iki 0,24, ir nuo eksperimentinių duomenų skiriasi ~76 %.

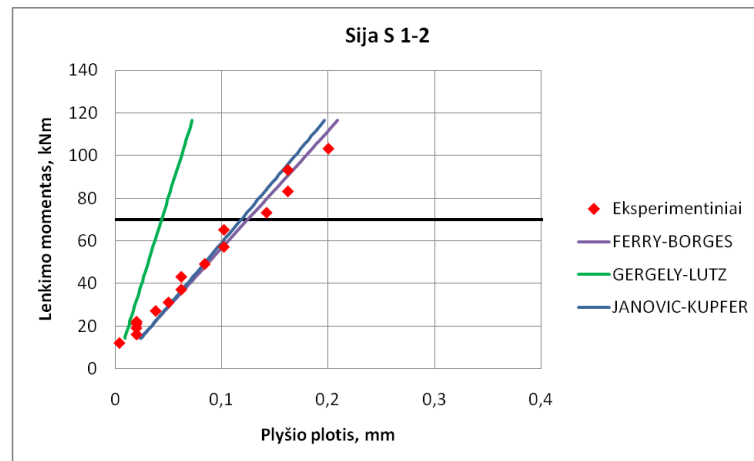
I serijos sijų ( $p=1,0$  %) eksperimentinių ir alternatyvių metodų rezultatų palyginimas pateiktas 70-75 paveiksluose. I serijos sijų eksperimentinių ir teorinių rezultatų santykis prie eksploatacinės apkrovos pateiki 4.5 lentelėje.



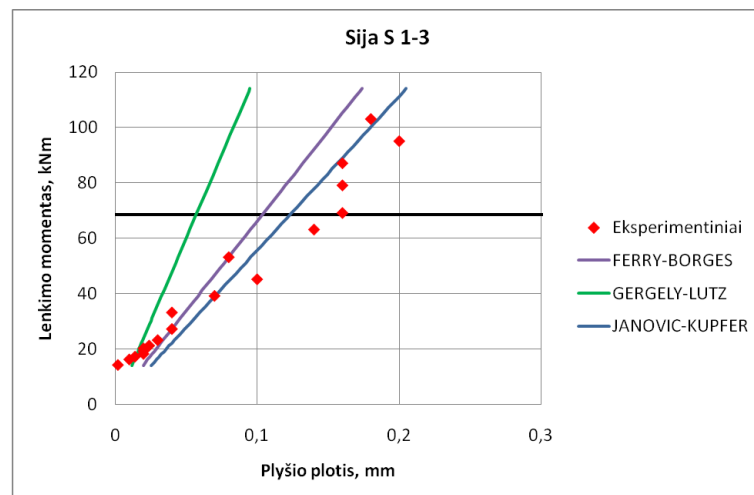
70 pav. Sijos S1-1 eksperimentinių ir alternatyvių skaičiavimų rezultatų palyginimas



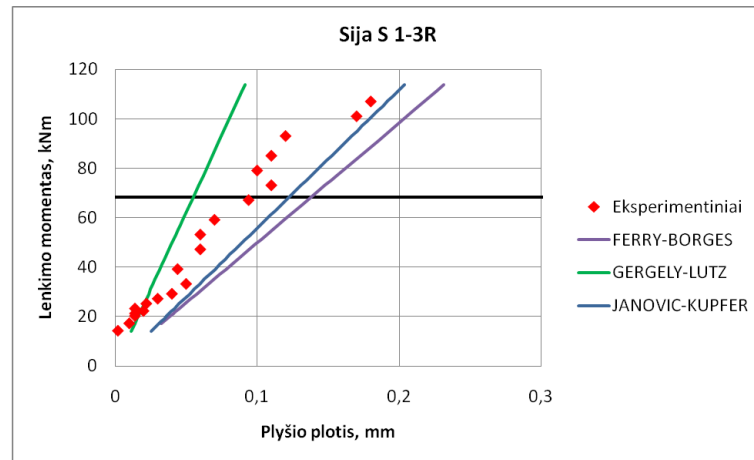
71 pav. Sijos *S1-1R* eksperimentinių ir alternatyvių skaičiavimų rezultatų palyginimas



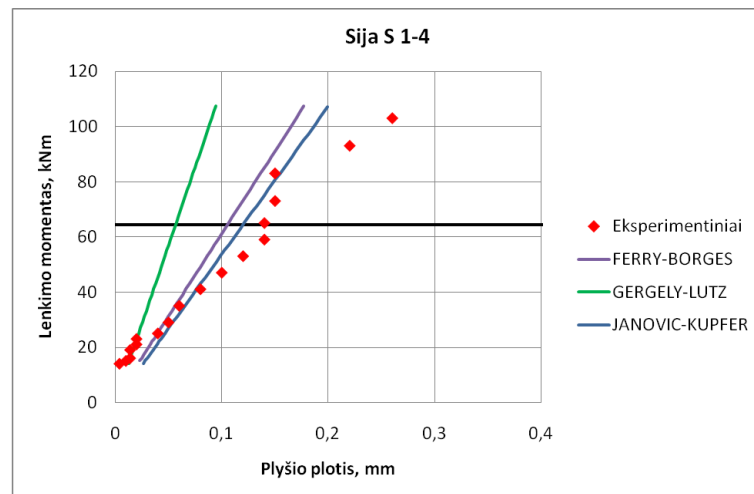
72 pav. Sijos *S1-2* eksperimentinių ir alternatyvių skaičiavimų rezultatų palyginimas



73 pav. Sijos *S1-3* eksperimentinių ir alternatyvių skaičiavimų rezultatų palyginimas



74 pav. Sijos S1-3R eksperimentinių ir alternatyvių skaičiavimų rezultatų palyginimas



75 pav. Sijos S1-4 eksperimentinių ir alternatyvių skaičiavimų rezultatų palyginimas

 4.5 lentelė. I serijos sijų eksperimentinių ir alternatyvių skaičiavimų santykis prie  $M_{ser}$  apkrovos

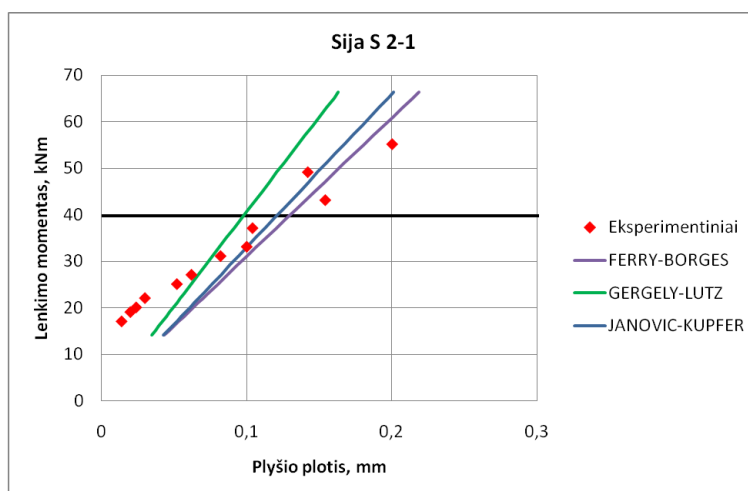
| Sijos<br>Nr. | $W_{m,exp}/W_{m,calc}$ |                  |                 |
|--------------|------------------------|------------------|-----------------|
|              | Janovic ir Kupfer      | Ferry ir Borgeso | Georgy ir Lutzo |
| S1-1         | 1,24                   | 1,36             | 1,06            |
| S1-1R        | 0,82                   | 0,66             | 1,15            |
| S1-2         | 1,21                   | 1,14             | 3,30            |
| S1-3         | 1,31                   | 1,55             | 2,81            |

4.5 lentelės tęsinys

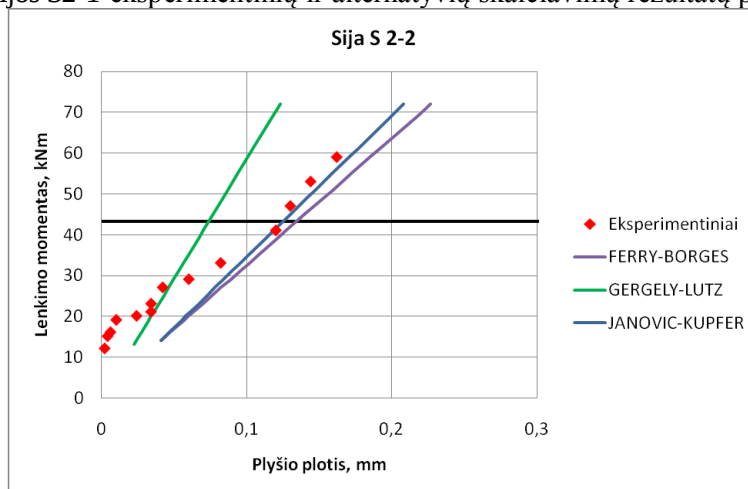
|                              |      |      |      |
|------------------------------|------|------|------|
| <b>S1-3R</b>                 | 0,77 | 0,68 | 1,71 |
| <b>S1-4</b>                  | 1,16 | 1,32 | 2,46 |
| <b>Rezultatų skirtumas %</b> | 22   | 34   | 108  |

Pagal lentelėje pateiktus duomenis matyti: eksperimentinių ir *Janovic ir Kupfer* skaičiavimo metodo plyšių pločių santykis kinta nuo 0,77 iki 1,31, nuo eksperimentinių duomenų skiriasi ~22 %. *Ferry ir Borges* skaičiavimo metodo plyšių pločių santykis kinta nuo 0,66 iki 1,55, šie skaičiavimai nuo eksperimentinių rezultatų skiriasi ~34 %. *Georgy ir Lutzo* skaičiavimo išraiška kinta nuo 1,06 iki 3,30, skiriasi ~ 108 %.

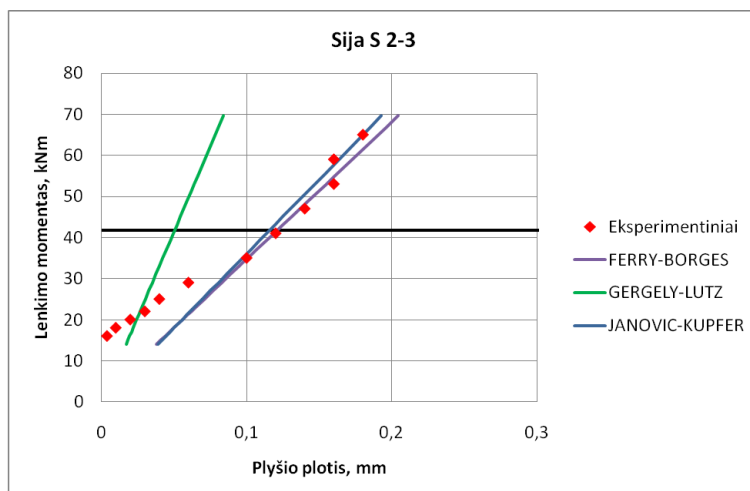
II serijos sijų ( $p=0,6$  %) eksperimentinių ir alternatyvių skaičiavimų rezultatų palyginimas pateiktas 76-79 paveiksluose ir 4.6 lentelėje.



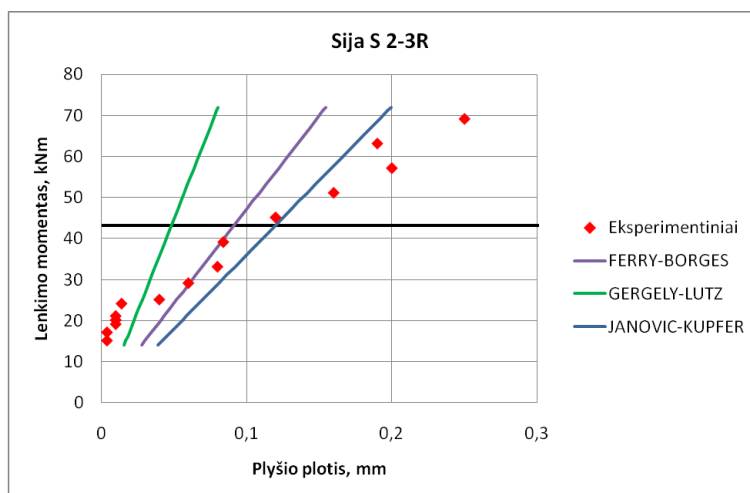
76 pav. Sijos S2-1 eksperimentinių ir alternatyvių skaičiavimų rezultatų palyginimas



77 pav. Sijos S2-2 eksperimentinių ir alternatyvių skaičiavimų rezultatų palyginimas



78 pav. Sijos S2-3 eksperimentinių ir alternatyvių skaičiavimų rezultatų palyginimas



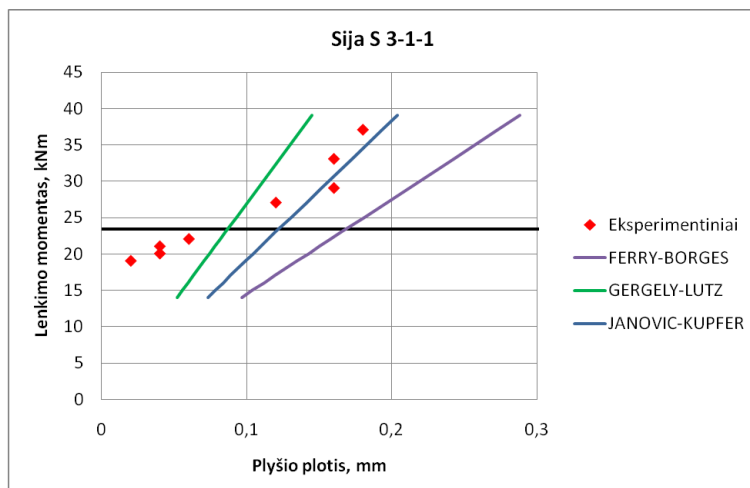
79 pav. Sijos S2-3R eksperimentinių ir alternatyvių skaičiavimų rezultatų palyginimas

 4.6 lentelė. II serijos sijų eksperimentinių ir alternatyvių skaičiavimų santykis prie  $M_{ser}$  apkrovos

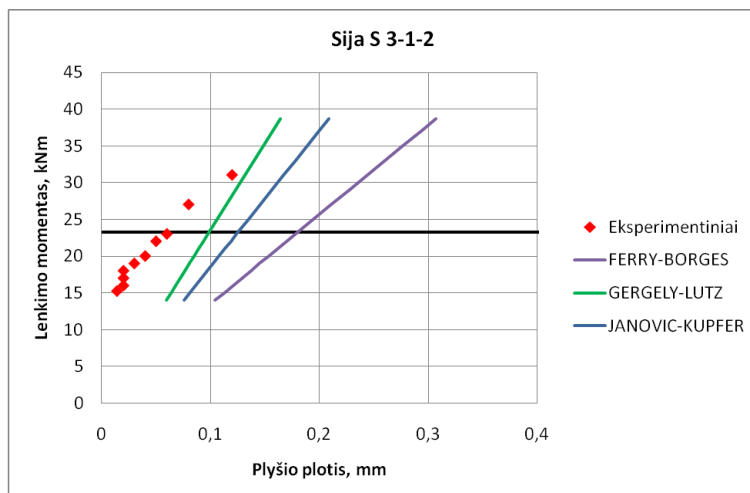
| Sijos Nr.             | $w_{m,exp}/w_{m,calc}$ |                   |                 |
|-----------------------|------------------------|-------------------|-----------------|
|                       | Ferry ir Borgeso       | Janovic ir Kupfer | Georgy ir Lutzo |
| S2-1                  | 1,19                   | 1,28              | 1,57            |
| S2-2                  | 0,91                   | 0,97              | 1,65            |
| S2-3                  | 1,06                   | 1,11              | 2,56            |
| S2-3R                 | 1,10                   | 0,84              | 2,08            |
| Rezultatų skirtumas % | 11                     | 14                | 97              |

Pagal 4.6 lentelėje pateiktus duomenis matyti: eksperimentinių ir *Ferry ir Borgeso* skaičiavimo išraiškos plyšių pločių santykis kinta nuo 0,91 iki 1,19, šie skaičiavimai su eksperimentiniais rezultatais sutampa ~11 %. *Janovic ir Kupfer* nuo 0,84 iki 1,28, sutampa ~14 %. *Georgy ir Lutzo* skaičiavimo išraiška kinta nuo 1,57 iki 2,56 sutampa ~ 97 %,

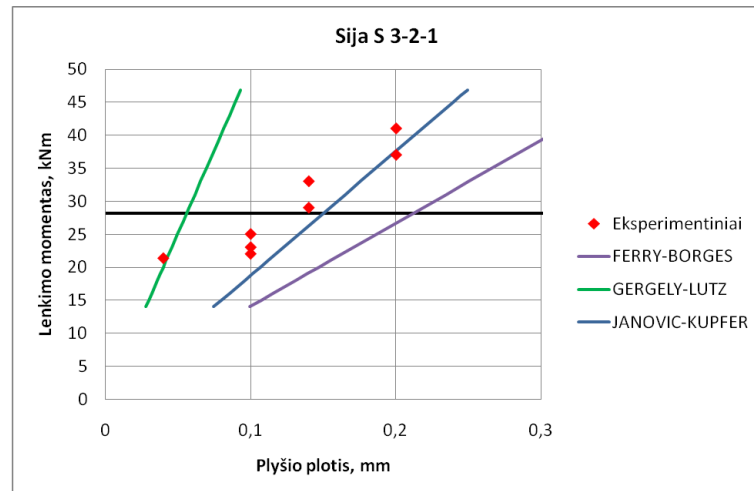
III serijos sijų ( $p=0,3$  %) eksperimentinių ir alternatyvių skaičiavimų rezultatų palyginimas pateiktas 80-87 pav. ir 4.7 lentelėje.



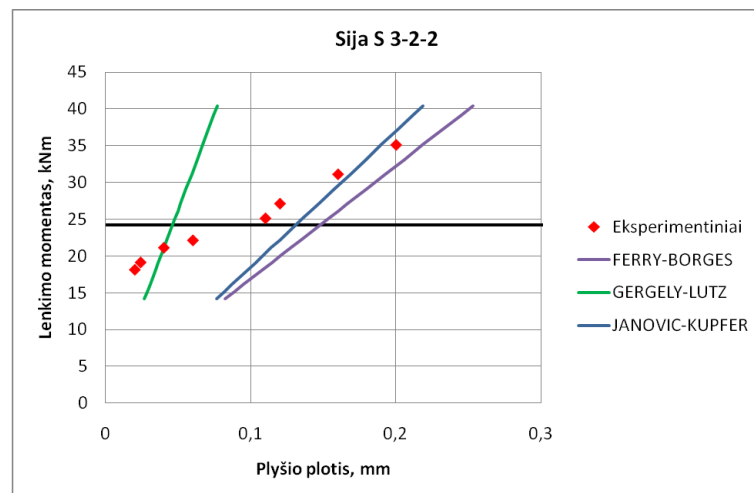
80 pav. Sijos S3-1-1 eksperimentinių ir alternatyvių skaičiavimų rezultatų palyginimas



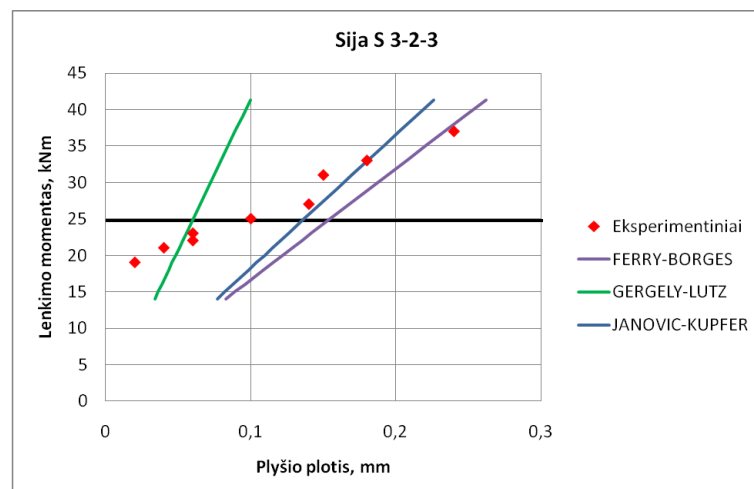
81 pav. Sijos S3-1-2 eksperimentinių ir alternatyvių skaičiavimų rezultatų palyginimas



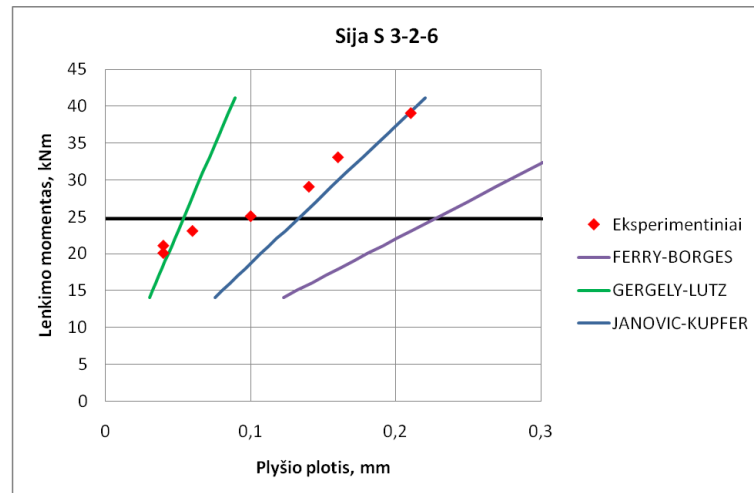
**82 pav.** Sijos S3-2-1 eksperimentinių ir alternatyvių skaičiavimų rezultatų palyginimas



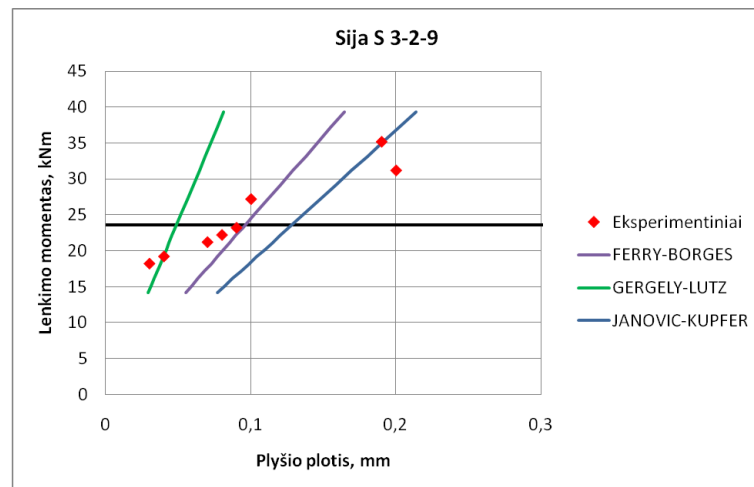
**83 pav.** Sijos S3-3-2 eksperimentinių ir alternatyvių skaičiavimų rezultatų palyginimas



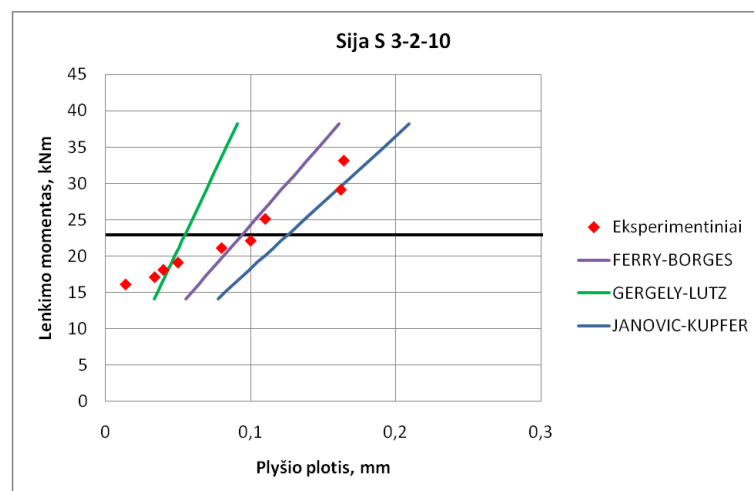
**84 pav.** Sijos S3-2-3 eksperimentinių ir alternatyvių skaičiavimų rezultatų palyginimas



**85 pav.** Sijos S3-2-6 eksperimentinių ir alternatyvių skaičiavimų rezultatų palyginimas



**86 pav.** Sijos S3-2-9 eksperimentinių ir alternatyvių skaičiavimų rezultatų palyginimas



**87 pav.** Sijos S3-2-10 eksperimentinių ir alternatyvių skaičiavimų rezultatų palyginimas



*EC2* ir *MC90* normų skaičiavimo rezultatai nuo eksperimentinių duomenų prie eksploatacinės apkrovos skiriasi 25 %. II serijos sijų, kurių armavimo procentas  $p=0,6\%$ , *ACI* ir *EC2* skaičiavimo rezultatai atitinkamai skiriasi 17 % ir 19 %. III serijos sijų, kurių armavimo procentas  $p=0,3\%$ , *ACI* ir *EC2* skaičiavimo rezultatai atitinkamai skiriasi 23 % ir 32 %. Didžiausias rezultatų skirtumas tarp eksperimentinių ir teorinių skaičiavimo metodų, net iki 93 %, gaunamas skaičiuojant plyšio plotį pagal *SP* normas, nors mažai armuotus elementus, kai armavimo procentas  $p=0,3\%$ , *SP* normų skaičiavimo rezultatai nuo eksperimentinių skiriasi 28 %.

3. Skaičiuojant plyšių pločius pagal alternatyvius skaičiavimo metodus, mažiausiai priklausomas nuo armavimo procento ir armatūros strypų išdėstymo yra *Janovic* ir *Kupfer* pasiūlytas skaičiavimo modelis, kurio rezultatai nuo eksperimentinių skiriasi ~20 %. Kitais metodais gaunamos daug didesnės skaičiavimo paklaidos.

## 5. Bendros darbo išvados, pastabos ir rezultatai:

1. Visų statybinių konstrukcijų patikimumas, ilgaamžiškumas ir sauga priklauso nuo ribinių būvių nustatymui taikomų skaičiavimo metodų, matematinio aparato ir fizikinių modelių adekvatumo. Eksploatacinio (II) ribinio būvio (deformacijų, įlinkių, plyšio pločio) skaičiavimuose taikomų algoritmų sudėtingumas priklauso nuo konstrukciją sudarančių medžiagų deformacinių savybių.
2. Didžiausią įtaką deformacijų skaičiavimo rezultatams turi betono pleišėjimo bei armatūros ir betono sąveikos modeliavimas. Modeliavimą apsunkina ir tai, kad plyšiai yra diskretūs, t. y. nutolę tam tikru atstumu, kintančiu priklausomai nuo įvairių veiksnių.
3. Eksperimentinių tyrimų metu pagamintos ir trumpalaikė apkrova išbandytos 18 silpnai ir vidutiniškai armuotos ( $p \approx 0,3 \%$ ,  $0,6 \%$  ir  $1,0 \%$ ) laisvai atremtos stačiakampio skerspjūvio gelžbetoninės sijos. Laisvai atremtos sijos apkrautos dviem koncentruotomis tarpatramio trečdaliuose išdėstytomis jėgomis iki suirimo.
4. Tyrimų metu nustatytas pilnas lenkiamųjų gelžbetonio sijų deformacijų būvis nuo elemento pagaminimo iki jo suirimo, veikiant trumpalaikiai apkrovai. Eksperimento metu matuoti plyšių pločiai ir fiksuotos plyšių vystymosi schemos atstumo tarp plyšių nustatymui. Šių stebėjimų duomenys panaudoti nustatant eksperimentinius gelžbetonio sijų pleišėjimo parametrus: plyšio pločius ir atstumą tarp plyšių.
5. Taikant matematinį klasterio metodą, iš eksperimentinių tyrimų pleišėjimų schemų kiekvienos serijos sijoms nustatytas vidutinis atstumas tarp plyšių.
6. Atlikta atstumo tarp plyšių teorinių ir eksperimentinių rezultatų statistinė palyginamoji analizė prie eksploatacinės apkrovos  $M_{ser}$ , parodė, kad patikimiausi skaičiavimo metodai yra *EC2* ir *MC90*. Teoriniai rezultatai nuo eksperimentinių atitinkamai skiriasi  $5,1 \%$  ir  $6,8 \%$ . Iš alternatyvių skaičiavimo modelių tiksliausiai skaičiavimo rezultatus atitiko *Farra* ir *Jaccoudo* vidutinio atstumo tarp plyšių skaičiavimo modelis. Modelio paklaida siekia  $1 \%$ .
7. Palyginus plyšio pločio eksperimentinius ir teorinius rezultatus, gaunamos momentų ir plyšio pločio priklausomybių diagramos. I serijos sijų, kurių armavimo procentas  $p=1 \%$ , *EC2* ir *MC90* normų skaičiavimo rezultatai nuo eksperimentinių duomenų prie eksploatacinės apkrovos skiriasi  $25 \%$ . II serijos sijų, kurių armavimo procentas  $p=0,6\%$ , *ACI* ir *EC2* skaičiavimo rezultatai atitinkamai skiriasi  $17 \%$  ir  $19 \%$ . III serijos sijų, kurių armavimo

procentas  $p=0,3$  %, *ACI* ir *EC2* skaičiavimo rezultatai atitinkamai skiriasi 23 % ir 32 %. Didžiausias rezultatų skirtumas tarp eksperimentinių ir teorinių skaičiavimo metodų, net iki 93 %, gaunamas skaičiuojant plyšio plotį pagal *SP* normas, nors mažai armuotus elementus, kai armavimo procentas  $p=0,3$  %, *SP* normų skaičiavimo rezultatai nuo eksperimentinių skiriasi 28 %.

8. Skaičiuojant plyšių pločius pagal alternatyvius skaičiavimo metodus, mažiausiai priklausomas nuo armavimo procento ir armatūros strypų išdėstymo yra *Janovic ir Kupfer* pasiūlytas skaičiavimo modelis, kurio rezultatai nuo eksperimentinių skiriasi ~20 %. Kitais metodais gaunamos daug didesnės skaičiavimo paklaidos.

## PADĖKA

Darbo autorius išreiškia didelę padėką VGTU Tiltų ir specialiųjų statinių katedros tyrėjui Viktor Gribniak, už suteiktą galimybę pasinaudoti jo atliktų eksperimentinių bandymų duomenimis bei už konsultacijas, eksperimentinių duomenų apdorojimo klausimais.

## LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. Alander, C. 'Relative rib area: is it an open question?', fib TG Bond Models, *Towards a Harmonised European Bond Test, International Workshop*, University of Brescia, May 4, 2001.
2. American Concrete Institute Committee 224. Cracking of concrete members in direct tension (ACI 224.2R-86), *ACI Journal*, 1986, 84, No. 1, 3 – 13.
3. American Concrete Institute. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-95) and Commentary (ACI 318R-95). *ACI Manual of Concrete Practice, Part 3 – Use of Concrete in Buildings – Design, Specifications and Related Topics*. ACI, Detroit, USA, 1997.
4. Architectural Institute of Japan. *Standard for Structural Calculation of RC Structures*. AIJ, Tokyo, 1986.
5. Beeby, A. W. The influence of the parameter  $\rho_{eff}$  on crack widths. *Structural Concrete*, 2004, 5, No. 2, 71 – 83.
6. Bernardi, S., Mesureur, B. and Rivillon, P. Study of high-strength concretes reinforced with high-strength reinforcement: study of bonding laws and cracking in static system. *ACI Materials Journal*, 1999, 96, No. 4, 491 – 499.
7. Borosnyó'i, A. and Bala'zs, G. L. Models for flexural cracking in concrete: the state of the art. Thomas Telford and *fib*, 2005.
8. Borosnyó'i, A. *Serviceability of CFRP Prestressed Concrete Beams*. PhD Thesis, Budapest University of Technology and Economics, 2002.
9. Braam, C. R. *The Cracking Behaviour of Reinforced Concrete Structures. Annual Report of Delft University*, 1990, Vol. 1, pp. 1 – 17.
10. Brice, L. P. Idées Générales sur la Fissuration du Béton Armé et du Béton Précontraint. *Annales ITBTP*, No. 198, 1964.
11. Broms, B. B. and Lutz, L. A. Effects of arrangement of reinforcement on crack width and spacing of reinforced concrete members. *Journal of the ACI*, 1965, 62, No. 11, 1395–1409.
12. Broms, B. B. Crack width and crack spacing in reinforced concrete members. *Journal of the ACI*, 1965, 62, No. 10, 1237 – 1256.
13. *CEB-FIP Model Code 1990 - Design Code*. CEB, Thomas Telford, London, 1993 (CEB

Bulletin d'Information No. 213/214).

14. Comité Euro-Internationale du Béton. *CEB-FIP Model Code 1978 – Design Code*. Comité Euro-International du Béton, Thomas Telford, London, 1978 (CEB Bulletin d'Information No. 124/125.).
15. *Eurocode 2: Design of Concrete Structures, General Rules and Rules for Buildings*. European Prestandard ENV 1992-1-1, Dec 1991.
16. Farra, B. and Jaccoud, J-P. Bond behaviour, tension stiffening and crack prediction of high
17. Fehling, E. and König, G. Zur Rissbreitenbeschränkung im Stahlbetonbau. *Beton- und Stahlbetonbau*, 1988, 6, 161–167; 1988, 7, 199–204.
18. Ferry-Borges, J. *Cracking and Deformability of Reinforced Concrete Beams*. IABSE Publication, Zürich, Vol. 26, pp. 75 – 95.
19. Gergely, P. and Lutz, L. A. Maximum crack width in reinforced flexural members. *ACI SP-20, Causes, Mechanism and Control of Cracking in Concrete*, pp. 87 – 117.
20. Holmberg, A. *Flexural crack widths*. *Nordisk Betong*, 1970, 4, 343 – 345.
21. Jaccoud, J-P. *Armature minimale pour le controle de la fissuration des structures en béton*. École Polytechnique Fédérale de Lausanne Thèse No. 666, 1987.
22. Janovic, K. and Kupfer, H. Beschränkung der Rissbreite bei teilweiser Vorspannung. *Bauingenieur*, 1982, 57, 109 – 114.
23. Janovic, K. and Kupfer, H. Zur Rissbildung im Stahlbeton- und Spannbetonbau. *Betonwerk und Fertigteil-Technik*, 1986, 12, 161 – 169.
24. Japan Society of Civil Engineers. *Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforcing Materials*, (ed. A. Machida). Concrete Engineering Series Vol. 23, JSCE, Tokyo, 1997.
25. Kaklauskas, G. 2004. Flexural layered deformational model of reinforced concrete members. *Magazine of Concrete Research*, 56(10): 575–584.
26. Leonhardt, F. *Crack Control in Concrete Structures*. IABSE Surveys, No. S-4/77, IABSE, Zürich, August 1977.
27. Letia, L. C. *Cracking of Reinforced Concrete Elements*. *Annual Report of Technical University Cluj Napoca*, 2007, Vol. 1, pp. 1-8.
28. Menn, C. Zwang und Mindestbewehrung, *Beton- und Stahlbetonbau*, 1986, 4, 94 – 99.
29. Noakowski, P. Verbundorientierte, kontinuierliche Theorie zur Ermittlung der Rissbreite. *Beton- und Stahlbetonbau*, 1985, 7, 185 – 190; 1985, 8, 215 – 221.

30. Piyasena, R. *Crack spacing, crack width and tension stiffening effect in reinforced concrete beams and one-way slabs*. PhD Thesis, school of Engineering Faculty of Engineering and Information Technology, 2002.
31. Saliger, R. *Die neue Theorie des Stahlbetons*. Franz Deuticke, Wien, 1950.
32. Sam – Young, N. Tension Stiffening Model of Numerical Analysis of RC Structures by Using Bond – Slip Relationship. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2009, Vol. 7, No. 1, pp. 61-78.
33. Sjoberg, B. D. *Crack Width in Reinforced Concrete*. PhD Thesis, Calgary University of Technology, 1999.
34. Statybos techninis reglamentas, *STR 2.05.05:2005* betoninių ir gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas, 2005.
35. Strength concrete. *Proceedings of International Symposium 'Bond in Concrete'*, Riga, 1992.
36. Система нормативных документов в строительстве свод правил по проектированию и строительству бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры, *СП 52-101*, 2003.
37. Ферронская, А. В. 2006. Долговечность конструкций из бетона и железобетона. Москва: АСВ. 336 с.
38. Kauklauskas G. *Gelžbetoninių elementų deformacijų modelis, įvertinantis betono susitraukimą ir valkšnumą ikieksplotacinėje stadijoje*. Vilnius: VGTU, 2008.

## **PRIEDAI**

1 lentelė. vidutinio atstumo tarp plyšių formulė

| Vidutinio atstumo tarp plyšių formulė ( $s_{rm}$ )                         | Pertvarkyta formulė                                | Autorius           |
|----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------|
| $s_{rm} = \kappa c$                                                        | $s_{rm} = A_1 c$                                   | Broms and Lutz     |
| $s_{rm} = 2 \left( c + \frac{\phi_s}{2} \right)$                           | $s_{rm} = A_1 c + A_2 \phi_s$                      | Broms              |
| $s_{rm} = 50 + \kappa c$                                                   | $s_{rm} = A_1 + A_2 s$                             | Janovic and Kupfer |
| $s_{rm} = 50 + 0,637(s) \frac{d}{25}$                                      | $s_{rm} = A_1 + A_2 s$                             | Janovic and Kupfer |
| $s_{rm} = \frac{4}{3} [50 + 1,5 \kappa \times s]$                          | $s_{rm} = A_1 + A_2 s$                             | Jaccoud            |
| $s_{rm} = k [4c + 0,7(s - \phi_s)]$                                        | $s_{rm} = A_1 c + A_2 s + A_3 \phi_s$              | JSCE               |
| $s_{rm} = \frac{2}{3} \times \frac{\phi_s}{3 \cdot 6 \varphi_{ef}}$        | $s_{rm} = A_1 \frac{\phi_s}{\varphi_{ef}}$         | MC 90              |
| $s_{rm} = 0,157 \frac{\phi_s f_{cm}}{4 \rho \tau_{bm}}$                    | $s_{rm} = A_1 \frac{\phi_s}{\varphi_{ef}}$         | Saliger            |
| $s_{rm} = 50 + 0,25 k_1 k_2 \frac{\phi_s}{\varphi_{ef}}$                   | $s_{rm} = A_1 + A_2 \frac{\phi_s}{\varphi_{ef}}$   | Eurocode 2         |
| $s_{rm} = \frac{1}{1,7} \left( 30 + \frac{\phi_s}{4 \varphi_{ef}} \right)$ | $s_{rm} = A_1 + A_2 \frac{\phi_s}{\varphi_{ef}}$   | Fehling and König  |
| $s_{rm} = 1,5c + 0,12 \frac{\phi_s}{\varphi_{ef}}$                         | $s_{rm} = A_1 c + A_2 \frac{\phi_s}{\varphi_{ef}}$ | Farra and Jaccoud  |
| $s_{rm} = \kappa_1 c + \kappa_2 \frac{\phi_s}{\varphi_{ef}}$               | $s_{rm} = A_1 c + A_2 \frac{\phi_s}{\varphi_{ef}}$ | Ferry-Borges       |
| $s_{rm} = k_1 c + 0,25 k_2 k_3 \frac{\phi_s}{\varphi_{ef}}$                | $s_{rm} = A_1 c + A_2 \frac{\phi_s}{\varphi_{ef}}$ | Braam              |

|                                                                                                                                                                                          |                                                                         |                 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| $s_{rm} = 3,5c + k_w \frac{\phi_s}{\varphi_{ef}}$                                                                                                                                        | $s_{rm} = A_1 c + A_2 \frac{\phi_s}{\varphi_{ef}}$                      | Alander         |
| $s_{rm} = \frac{3\phi_s}{k} \left( 1 + \frac{1}{10\varphi_{ef}} \right)$                                                                                                                 | $s_{rm} = A_1 \phi_s + A_2 \frac{\phi_s}{\varphi_{ef}}$                 | Brice           |
| $s_{rm} = 2 \left( c + \frac{s}{10} \right) + \kappa_1 \kappa_2 \frac{\phi_s}{\varphi_{ef}}$                                                                                             | $s_{rm} = A_1 c + A_2 s + A_3 \frac{\phi_s}{\varphi_{ef}}$              | CEB-FIP MC 78   |
| $s_{rm} = 2 \left( c + \frac{s}{10} \right) + 0,1 \frac{\phi_s}{\varphi_{ef}}$                                                                                                           | $s_{rm} = A_1 c + A_2 s + A_3 \frac{\phi_s}{\varphi_{ef}}$              | AIJ             |
| $s_{rm} = 2 \left( c + \frac{s}{10} \right) + k \frac{\phi_s}{10\varphi_{ef}}$                                                                                                           | $s_{rm} = A_1 c + A_2 s + A_3 \frac{\phi_s}{\varphi_{ef}}$              | Menn            |
| $s_{rm} = 1,65 + 0,56 \sqrt{c \frac{A_{c,ef}}{\sum \phi_s}}$                                                                                                                             | $s_{rm} = A_1 + f(c; \phi_s)$                                           | Holmberg        |
| $s_{rm} = 5(\phi_s - 7,2) + 0,08 \frac{\phi_s}{\varphi_{ef}} + K_1(c; s)$                                                                                                                | $s_{rm} = A_1 + A_2 \phi_s + A_3 \frac{\phi_s}{\varphi_{ef}} + f(c; s)$ | Leonhardt       |
| $s_{rm} = 3,1 \times k \left( \frac{(0,22 f_{ctm} / \varphi)^{0,88}}{f_{ctm}^{0,66}} \times \phi_s \right)^{0,89}$                                                                       | $s_{rm} = f(\varphi; f_{ctm}; \phi_s)$                                  | Noakowski       |
| $s_{rm} = \frac{1}{2} \times \frac{\sigma_{s2}}{\alpha \sigma_{c1}} \times \phi_s$                                                                                                       | $s_{rm} = f(\sigma_s; f_{ctm}; \phi_s)$                                 | Janko           |
| $s_{rm} = 2 \left[ d + A c h^{-1} \sqrt{\frac{\sigma_s}{\sigma_s - (f_{ctm} / \varphi_{ef})}} \right]$                                                                                   | $s_{rm} = f(\sigma_s; f_{ctm}; \varphi_{ef})$                           | Bernardi ir kt. |
| $\frac{s_{rm}}{\phi} = 25,7 \left( \frac{h-d}{h-x_2} \right)^{4,5} + 1,66 \left( \frac{1}{n} \times \frac{A_{c,ef}}{A_s} \right)^{1/3} + \frac{0,236 \cdot 10^{-6}}{\varepsilon_{s2}^2}$ | -                                                                       | Oh and Kang     |

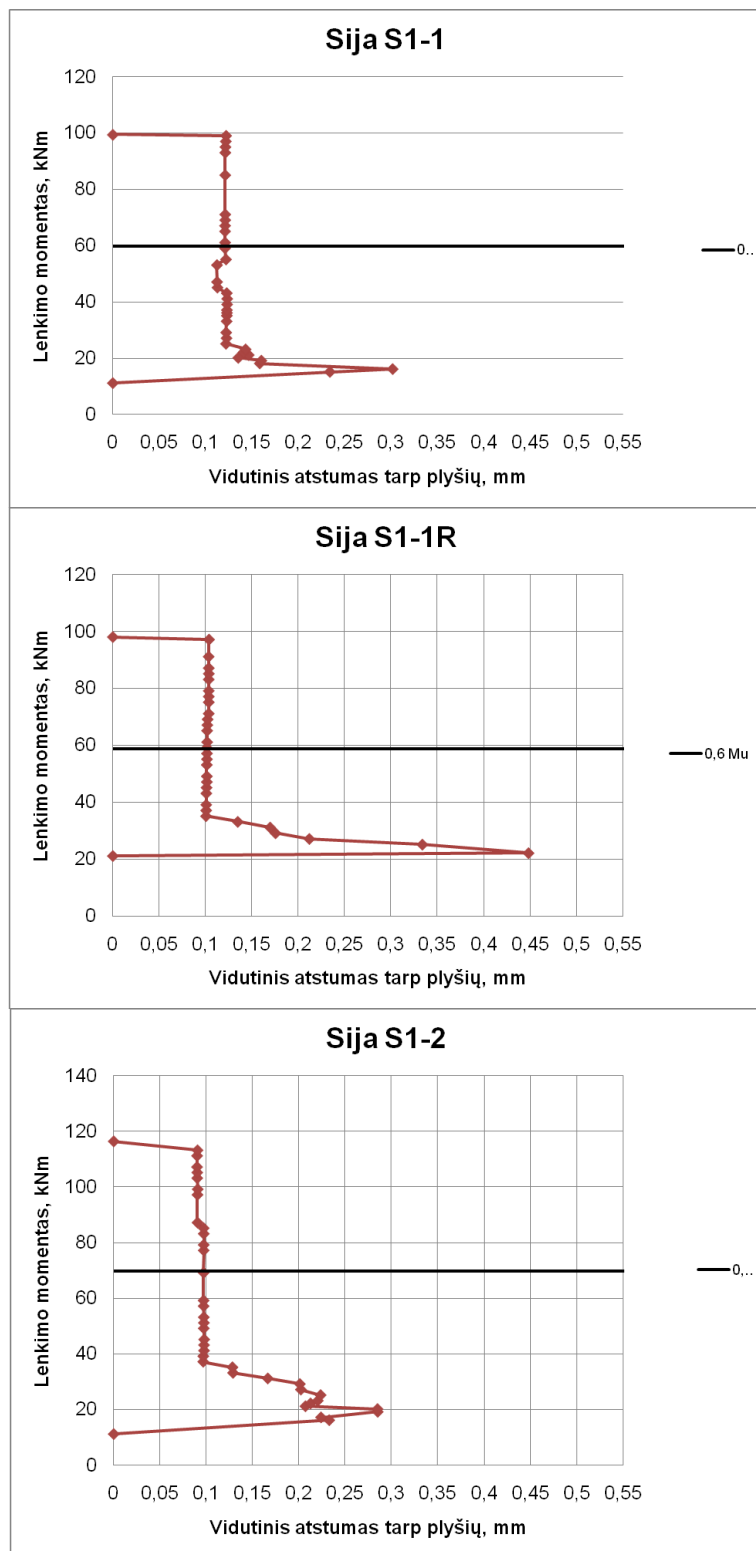
| 2 lentelė. pateiktos pagrindinių plyšio pločio skaičiavimo metodų formulių išraiškos |                                                                                                                                                                        |                       |
|--------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| Bendra išraiška                                                                      | Pagrindinė formulė                                                                                                                                                     | Autorius              |
| $w_k = \beta \cdot w_m$                                                              | $\beta = 1,5$                                                                                                                                                          |                       |
|                                                                                      | $w_k = 1,5(k)3,1 \left[ \frac{(0,22 f_{ctm} / \varphi)^{0,89}}{f_{ctm}^{0,66}} \phi_s \right]^{0,89} \times \frac{\sigma_{s2} - k(0,56)(0,22 f_{ctm} / \varphi)}{E_s}$ | Noakowski             |
|                                                                                      | $w_k = 1,5 \left[ 2(c + \frac{s}{10}) + 0,1 \frac{\phi_s}{\varphi_{ef}} \right] \left( \frac{\sigma_s - k_1 k_2 f_{ctm} / \varphi_{ef}}{E_s} \right)$                  | AIJ                   |
|                                                                                      | $\beta = 1,55$                                                                                                                                                         |                       |
|                                                                                      | $\beta = 1,66$                                                                                                                                                         |                       |
|                                                                                      | $w_k = 1,66 \frac{1}{E_s} \left( 1,5c + 0,04 \frac{\phi_s}{\varphi} \right) \left( \sigma_{s2} - \frac{7,5}{\rho} \right)$                                             | Ferry -<br>Borges     |
|                                                                                      | $\beta = 1,7$                                                                                                                                                          |                       |
|                                                                                      | $w_k = 1,7 \left( 50 + 0,25 k_1 k_2 \frac{\phi_s}{\varphi_{ef}} \right) \xi \frac{\sigma_{s2}}{E_s}$                                                                   | Eurocode2             |
|                                                                                      | $w_k = 1,7(50 + 0,75s)0,8 \frac{\sigma_{s2}}{E_s}$                                                                                                                     | Janovic and<br>Kupfer |
|                                                                                      | $w_k = 1,7 \left( 2 \left( c + \frac{s}{10} \right) + \kappa_1 \kappa_2 \frac{\phi_s}{\varphi_{ef}} \right) \xi \frac{\sigma_{s2}}{E_s}$                               | CEB-FIP<br>MC78       |
|                                                                                      | $\beta = 2,0$                                                                                                                                                          |                       |
|                                                                                      | $w_k = 4t_e \varepsilon_{sm}$                                                                                                                                          | Broms and<br>Lutz     |
|                                                                                      | $w_k = 4 \left( c + \frac{\phi}{2} \right) \varepsilon_{sm}$                                                                                                           | Broms                 |
|                                                                                      | $w_k = 2 \left( 0,157 \frac{\phi_s}{4\rho} \frac{f_{cm}}{\tau_{bm}} \right) \left[ \frac{\sigma_{s2} - f_{cm}(0,05/\varphi + 2)}{E_s} \right]$                         | Saliger               |
| $w_k = s_{r,\max} \varepsilon_{sm,r}$                                                | $w_k = \frac{\phi_s}{3,6\varphi_{ef}} (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm})$                                                                                           | CEB-FIP<br>MC90       |
|                                                                                      | $w_k = \left( 4,5 + \frac{0,4}{\varphi_{ef}} \right) \phi_s \frac{\sigma_{s2}}{K_2}$                                                                                   | CEB                   |
| Empirinė priklausomybė                                                               | $w_k = K \cdot \sqrt[4]{\frac{A_{c,ef}}{n}} \frac{d - x}{h - x} \sigma_{s2}$                                                                                           | Kaar and<br>Hognestad |

|                         |                                                                                                                           |                                   |
|-------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|
|                         | $w_k = K \cdot \sqrt[3]{(h-d)A_{c,ef}} \frac{d-x}{h-x} \sigma_{s2}$                                                       | Gergery and Lutz                  |
|                         | $w_k = K \cdot \sigma_{s2}(h-d) \sqrt{1 + \left( \frac{s}{4(h-d)} \right)^2}$                                             | ACI 224.2R-86                     |
|                         | $w_k = K \cdot \frac{\sigma_s}{E_s} 20(3,5 - 100\rho) \sqrt{\phi}$                                                        | Sygula                            |
|                         | $w_k = K \cdot \sigma_{s2}(h-d) \left( \frac{A_{ct}}{A_s} \right)^{0,5}$                                                  | Suri and Dilger<br>Rao and Dilger |
| Analitinė priklausomybė | $w_k = \frac{1}{2} \frac{\sigma_{s2}^2 \phi_s}{k \sigma_{ct,1} E_s} \left( 1 - \frac{k f_{ctd}}{3 \sigma_{ct,1}} \right)$ |                                   |
|                         | $w_k = K \frac{A_{c,ef}}{\sum u} (\Delta \sigma_s)$                                                                       | Nawy                              |
|                         | $w_k = K \frac{A_{ct,1} \sigma_{ct,1}}{A_s} \frac{h-x}{d-x}$                                                              | Scholz                            |
|                         | $w_k = \frac{\sigma_{s2}^2 \phi_s}{k \sigma_{ct,1} E_s} \Phi_{rK}$                                                        |                                   |
|                         | $\Phi_{rK} = (1-\nu)(1-0,5\nu) \left( 1 - \frac{1-\nu}{\delta(1-0,5\nu)} \right)$                                         | Karman                            |
|                         | $\nu = \frac{\sigma_{s1}}{\sigma_{s2}} \quad \delta = \frac{\sigma_{ct,1}}{f_{ctd}}$                                      |                                   |
|                         | $w_k = \frac{3a_{cr} \varepsilon_m}{1 + 2((a_{cr} - c_{\min})/(h-x))}$                                                    | Reynolds-Steedman                 |
|                         | $w_k = l_r (\varepsilon_{s2} - \varepsilon_{c,lr})$                                                                       | Jaccoud                           |
|                         | $l_r = \frac{\Delta L - L_{\varepsilon_{c1}}}{n(\varepsilon_{s2} - \varepsilon_{c1})} \approx 0,7 l_t$                    | Farra and Jaccoud                 |
|                         | $w_k = \frac{\sigma_s}{E_s} l_r + \Delta w$                                                                               |                                   |

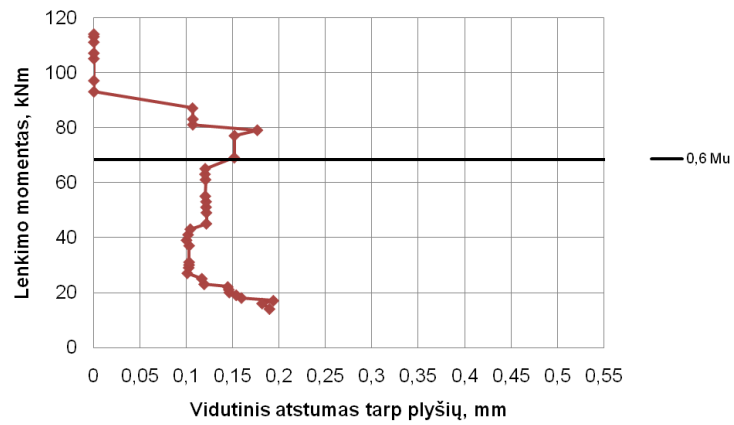
|  |                                                                                                                                                                                                  |                                   |
|--|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|
|  | $w_k = \frac{2\sigma_f}{E_f} \left[ d + A \tanh \left( \cosh^{-1} \sqrt{\frac{\sigma_f}{\sigma_f - (f_{ctm} / \rho_f)}} \right) \right]$                                                         | Toutanji<br>and Saafi             |
|  | $\frac{w_k}{\phi} = (\varepsilon_s - 0,0002) \frac{h - x_2}{d - x_2} \left[ 159 \left( \frac{h - d}{h - x_2} \right)^{4,5} + 2,83 \left( \frac{1}{n} \frac{A_{c,ef}}{A_s} \right)^{1/3} \right]$ | Oh and<br>Kang                    |
|  | $\frac{w_0}{\phi} = \frac{[(E_c(1 - \rho) / E_s \rho e^{\varepsilon_N}) + 1] \varepsilon_{cm} - \eta}{1 - (Nd / L) - \eta(d / w_c)}$                                                             | Ouyang and<br>Shah<br>Shah et al. |
|  | $\eta = \frac{(1 - \rho) f_{ct}}{\rho E_s} + \frac{f_{ct}}{E_c}$                                                                                                                                 |                                   |

## B priedas

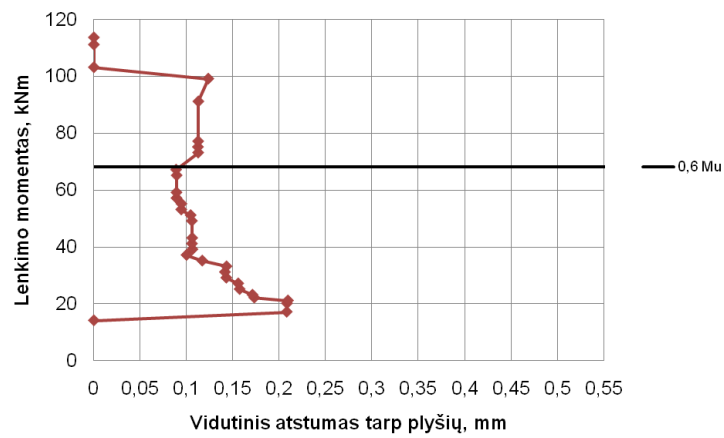
### Vidutinių atstumų tarp plyšių kitimas apkrovos atžvilgiu



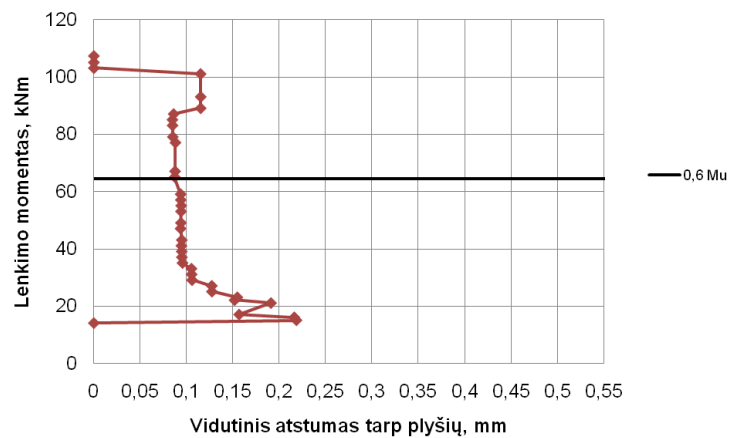
**Sija S1-3**



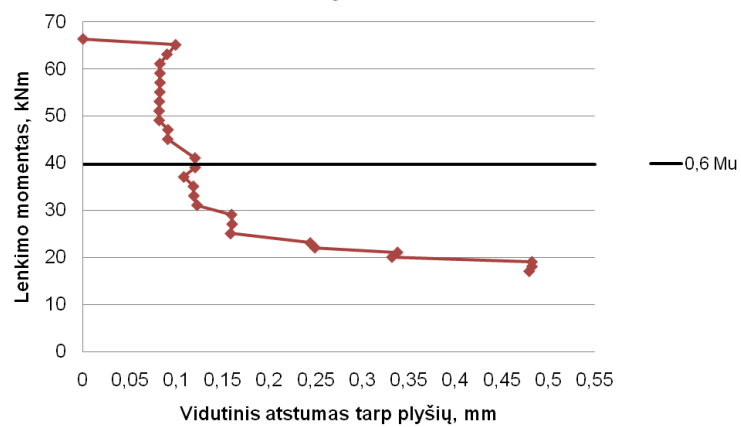
**Sija S1-3R**



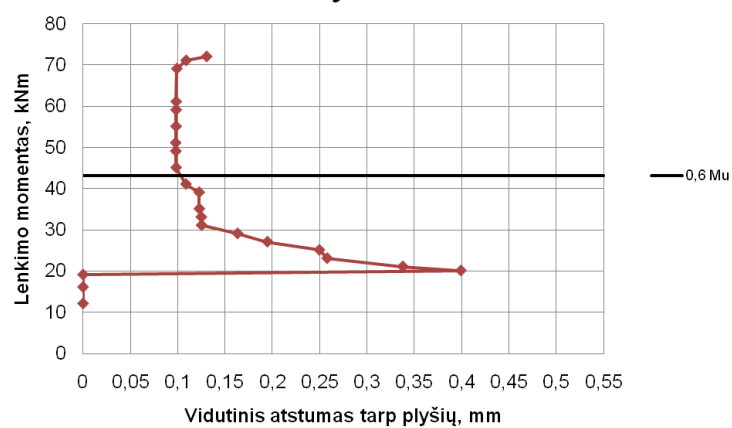
**Sija S1-4**



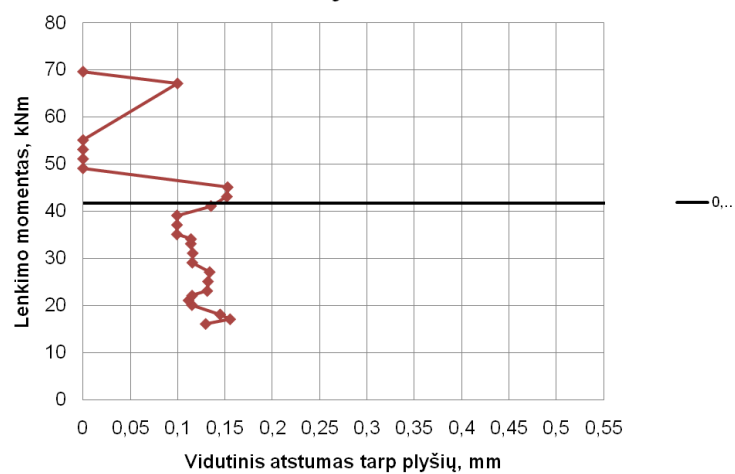
### Sija S2-1



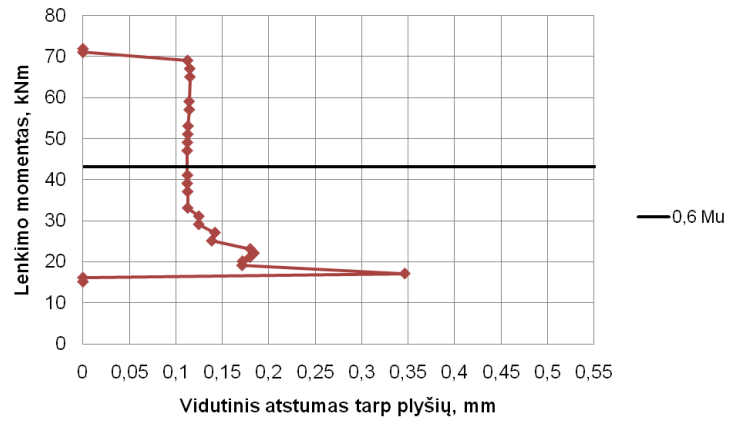
### Sija S2-2



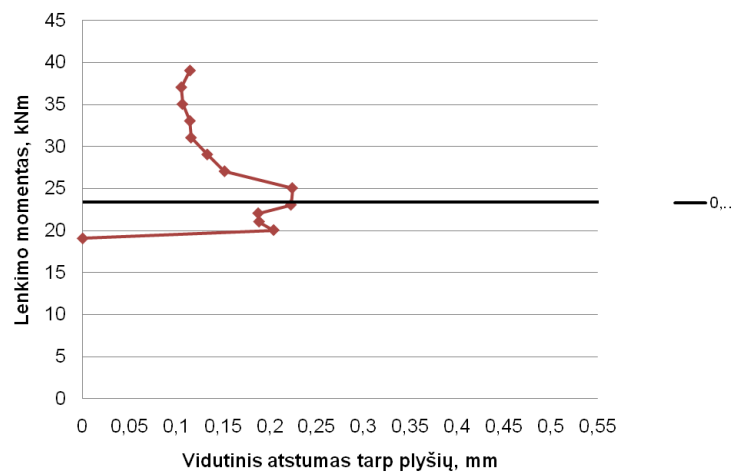
### Sija S2-3



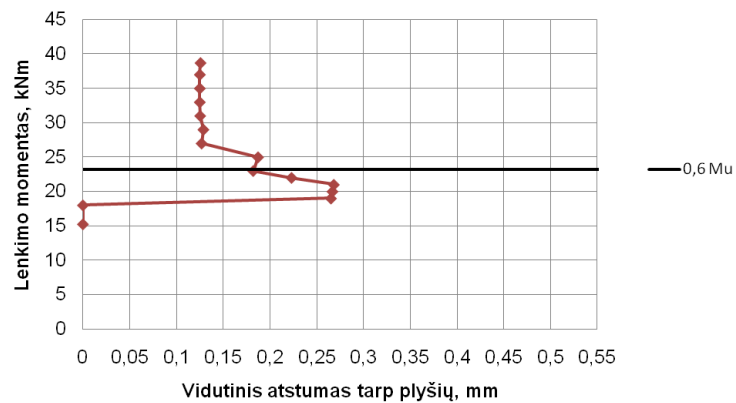
Sija S2-3R



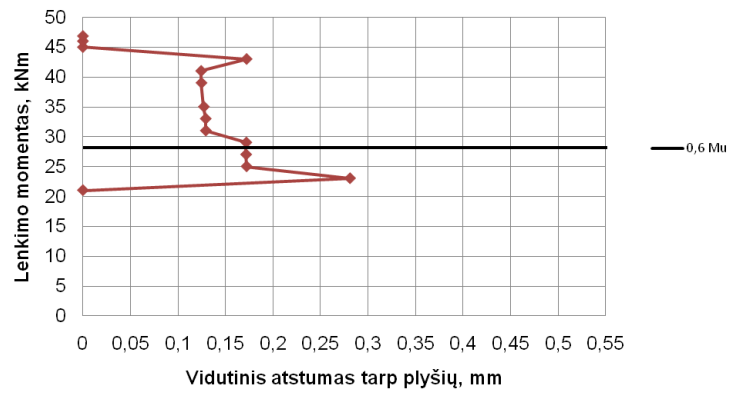
Sija S3-1-1



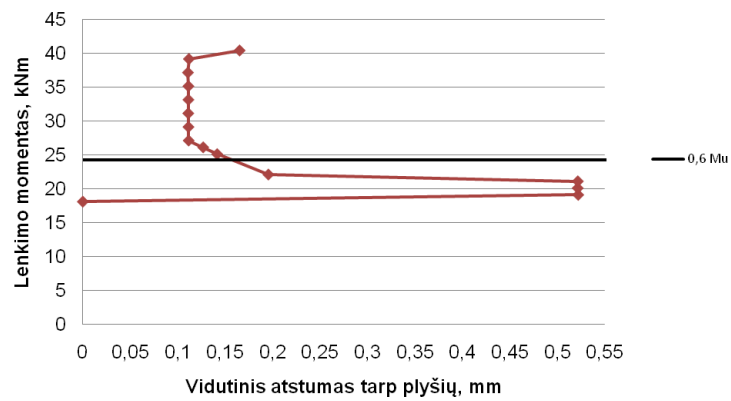
Sija S3-1-2



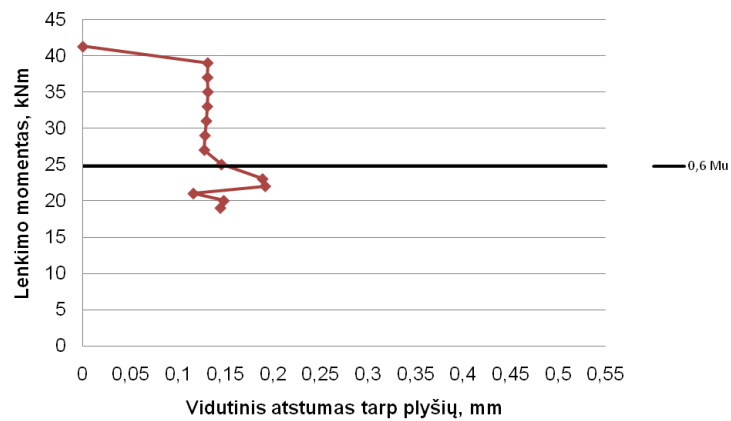
### Sija S3-2-1



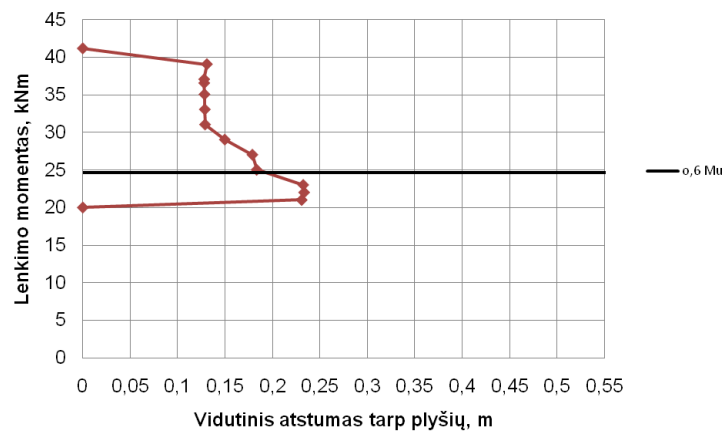
### Sija S3-2-2



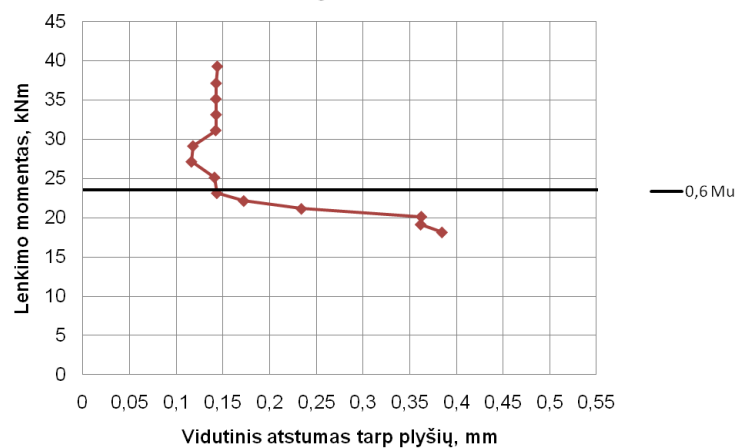
### Sija S3-2-3



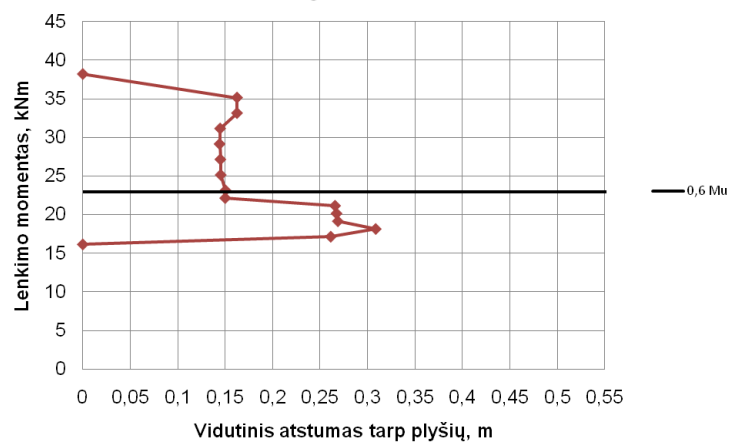
Sija S3-2-6



Sija S3-2-9



Sija S3-2-10



# C priedas

3 lentelė. Vidutiniai eksperimentiniai ir teoriniai (normų) plyšio pločiai prie  $M_{ser.}$

| Sijos Nr. | Metodai |       |       |       |       |       |        | Eksperimentinis |
|-----------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-----------------|
|           | SP      | STR   | ACI   | MC90  | EC2   | JSCE  | BS8110 |                 |
| S1-1      | 0,072   | 0,289 | 0,222 | 0,088 | 0,139 | 0,303 | 0,318  | 0,16            |
| S1-1R     | 0,075   | 0,283 | 0,212 | 0,085 | 0,138 | 0,328 | 0,333  | 0,1             |
| S1-2      | 0,049   | 0,378 | 0,108 | 0,095 | 0,129 | 0,2   | 0,184  | 0,142           |
| S1-3      | 0,08    | 0,516 | 0,128 | 0,114 | 0,158 | 0,261 | 0,262  | 0,16            |
| S1-3R     | 0,077   | 0,508 | 0,127 | 0,139 | 0,156 | 0,312 | 0,298  | 0,094           |
| S1-4      | 0,098   | 0,614 | 0,127 | 0,168 | 0,176 | 0,332 | 0,325  | 0,14            |
| S2-1      | 0,059   | 0,197 | 0,205 | 0,077 | 0,119 | 0,255 | 0,217  | 0,154           |
| S2-2      | 0,059   | 0,271 | 0,148 | 0,1   | 0,129 | 0,262 | 0,212  | 0,122           |
| S2-3      | 0,075   | 0,442 | 0,11  | 0,145 | 0,144 | 0,289 | 0,238  | 0,128           |
| S2-3R     | 0,075   | 0,456 | 0,11  | 0,146 | 0,149 | 0,248 | 0,224  | 0,1             |
| S3-1-1    | 0,137   | 0,522 | 0,15  | 0,244 | 0,101 | 0,372 | 0,25   | 0,084           |
| S3-1-2    | 0,094   | 0,304 | 0,176 | 0,146 | 0,117 | 0,357 | 0,244  | 0,06            |
| S3-2-1    | 0,1     | 0,457 | 0,127 | 0,21  | 0,19  | 0,472 | 0,317  | 0,14            |
| S3-2-2    | 0,079   | 0,401 | 0,107 | 0,171 | 0,155 | 0,351 | 0,242  | 0,11            |
| S3-2-3    | 0,093   | 0,414 | 0,124 | 0,19  | 0,14  | 0,366 | 0,256  | 0,1             |
| S3-2-6    | 0,085   | 0,404 | 0,116 | 0,178 | 0,158 | 0,477 | 0,3    | 0,1             |
| S3-2-9    | 0,078   | 0,392 | 0,109 | 0,169 | 0,151 | 0,277 | 0,208  | 0,096           |
| S3-2-10   | 0,081   | 0,383 | 0,115 | 0,167 | 0,145 | 0,271 | 0,205  | 0,1             |

4 lentelė. Vidutiniai eksperimentiniai ir teoriniai (alternatyvių skaičiavimo metodų) plyšio pločiai prie  $M_{ser.}$

| Sijos Nr. | Metodai          |                 |                   | Eksperimentinis |
|-----------|------------------|-----------------|-------------------|-----------------|
|           | Ferry ir Borgeso | Georgy ir Lutzo | Janivic ir Kupfer |                 |
| S1-1      | 0,118            | 0,151           | 0,129             | 0,16            |
| S1-1R     | 0,151            | 0,087           | 0,122             | 0,1             |
| S1-2      | 0,125            | 0,043           | 0,117             | 0,142           |
| S1-3      | 0,103            | 0,057           | 0,122             | 0,16            |
| S1-3R     | 0,134            | 0,055           | 0,122             | 0,094           |
| S1-4      | 0,106            | 0,057           | 0,120             | 0,14            |
| S2-1      | 0,129            | 0,098           | 0,120             | 0,154           |
| S2-2      | 0,134            | 0,074           | 0,126             | 0,122           |
| S2-3      | 0,121            | 0,05            | 0,115             | 0,128           |
| S2-3R     | 0,091            | 0,048           | 0,119             | 0,1             |
| S3-1-1    | 0,168            | 0,087           | 0,122             | 0,084           |
| S3-1-2    | 0,179            | 0,099           | 0,126             | 0,06            |
| S3-2-1    | 0,127            | 0,056           | 0,150             | 0,14            |
| S3-2-2    | 0,148            | 0,046           | 0,132             | 0,11            |
| S3-2-3    | 0,153            | 0,06            | 0,136             | 0,1             |
| S3-2-6    | 0,226            | 0,053           | 0,133             | 0,1             |

4 lentelės tęsinys

|                |       |       |       |              |
|----------------|-------|-------|-------|--------------|
| <b>S3-2-9</b>  | 0,096 | 0,049 | 0,128 | <b>0,096</b> |
| <b>S3-2-10</b> | 0,094 | 0,055 | 0,126 | <b>0,1</b>   |