



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Lenkiamųjų gelžbetoninių supleišėjusių elementų standumo analizė

Baigiamasis magistro projektas

Aistė Švilpauskaitė

Projekto autorė

Doc. Mindaugas Augonis

Vadovas

Kaunas, 2022



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Lenkiamųjų gelžbetoninių supleišėjusių elementų standumo analizė

Baigiamasis magistro projektas

Statybos inžinerija (6121EX008)

Aistė Švilpauskaitė

Projekto autorė

Doc. Mindaugas Augonis

Vadovas

Lekt. Villalon Fornes Ignacio

Recenzentas

Kaunas, 2022



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Aistė Švilpauskaitė

Lenkiamųjų gelžbetoninių supleišėjusių elementų standumo analizė

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdama(s) kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasi(s) Lietuvos Respublikos autorių teisių ir gretutinių teisių įstatymo nuostatų, Kauno technologijos universiteto (toliau – Universitetas) intelektinės nuosavybės valdymo ir perdavimo nuostatų bei Universiteto akademinės etikos kodekse nustatytų etikos reikalavimų;
2. baigiamajame projekte visi pateikti duomenys ir tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti teisėtai, nei viena šio projekto dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar elektroninių šaltinių, visos baigiamojo projekto tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąrašė;
3. įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą ar jo dalis niekam nesu mokėjęs (-usi);
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalinta(s) iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Aistė Švilpauskaitė

Patvirtinta elektroniniu būdu



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS**

Magistro baigiamojo projekto užduotis

Studijų programa: STATYBINIŲ KONSTRUKCIJŲ IR GAMINIŲ INŽINERIJA

Baigiamojo projekto tematika (lietuvių k.):
GELŽBETONINIŲ ELEMENTŲ STANDUMO ANALIZĖ ĮVERTINANT TEMPIAMO
BETONO DARBĄ

Baigiamojo projekto tema patvirtinta dekanu potvarkiu Nr.: ST18-F-09-1

(lietuvių k.): LENKIAMŲJŲ GELŽBETONINIŲ SUPLEIŠĖJUSIŲ ELEMENTŲ STANDUMO
ANALIZĖ

(anglų k.): Analysis of the Stiffness of Flexural Cracked Reinforced Concrete Elements

Pradiniai duomenys darbui:

Baigiamojo projekto dalys:

	Atlikti
Įvadas	x
Literatūros apžvalga	x
Metodologija	x
Eksperimentiniai tyrimai	<input type="checkbox"/>
Analitiniai tyrimai	x
Skaitiniai tyrimai	<input type="checkbox"/>
Ekonominė dalis	<input type="checkbox"/>
Išvados	x

Kita informacija (pagal poreikį):

Vadovas: Doc. Mindaugas Augonis
(indėlis _100_ %) *pareigos, vardas, pavardė*
Patvirtinta elektroniniu būdu

Konsultantas: _____
(indėlis _____ %) *pareigos, vardas, pavardė*

Konsultantas: _____
(indėlis _____ %) *pareigos, vardas, pavardė*

Studentė: Aistė Švilpauskaitė
vardas, pavardė
Patvirtinta elektroniniu būdu

Švilpauškaitė, Aistė. Lenkiamųjų gelžbetoninių supleišėjusių elementų standumo analizė. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. Mindaugas Augonis; Kauno technologijos universitetas, Statybos ir architektūros fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Inžinerijos mokslai, Statybos inžinerija (E05).

Reikšminiai žodžiai: gelžbetoninių elementų pleišėjimas, įlinkiai, standumas.

Kaunas, 2022. 100 p.

Santrauka

Šio magistro baigiamojo projekto pagrindinis tikslas yra sudaryti skaičiuojamąjį modelį supleišėjusių lenkiamųjų gelžbetoninių elementų standumui nustatyti. Šiam tikslui pasiekti iškelti 4 pagrindiniai uždaviniai:

1. literatūros apžvalga – apžvelgti lenkiamųjų supleišėjusių elementų įlinkio skaičiavimo metodiką pagal norminius dokumentus – *Eurokodą 2* ir *Statybos techninį reglamentą*;
2. elemento kreivio skaičiavimas, įvertinant supleišėjusios zonos standumo mažėjimą;
3. lenkiamo elemento įlinkio skaičiavimas, įvertinant supleišėjusius ruožus;
4. palyginti gautus teorinius rezultatus su kitų mokslininkų atliktais eksperimentais.

Atlikus literatūros analizę pastebėta, kad nėra pateiktos metodikos kaip apskaičiuoti vidutinius įtempius (yra pateiktas tik vidutinių kreivių skaičiavimas), todėl nuspręsta sudaryti skaičiuojamąjį modelį, kuris įvertintų skirtinguose elemento ruožuose tamprumo modulius bei vidutinius kreivius. Viso šio skaičiavimo esmė yra surasti tamprumo modulių kitimą nuo lenkimo momento ir pleišėjimo momento santykio.

Šiame magistro baigiamajame projekte aprašytas skaičiuojamasis modelis, išvesta pagrindinė formulė tamprumo moduliui apskaičiuoti kiekviename nagrinėjamame ruože. Siūloma nagrinėjamą elementą suskirstyti į kuo daugiau ruožų skaičiavimo metu, nes tokiu būdu galima pamatyti tikrąją tamprumo modulių ir lenkimo momentų priklausomybę (E/M). Taip pat, apsiskaičiavus ir žinant elemento deformacijas, galima jas pritaikyti elemento plyšio pločio skaičiavimui.

Lentelių skaičius (42 vnt.), paveikslų skaičius (41 vnt.), literatūros šaltinių skaičius (27 vnt.).

Švilpauskaitė, Aistė. Analysis of the Stiffness of Flexural Cracked Reinforced Concrete Elements. Master's Final Degree Project / supervisor doc. Mindaugas Augonis; Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Engineering Sciences, Civil Engineering (E05).

Keywords: reinforced concrete cracking, deflection, stiffness.

Kaunas, 2022. 100 pages.

Summary

The main purpose of this master's thesis is to create a computational model for determining the stiffness of cracked bent reinforced concrete elements. To achieve this goal four main tasks have been set:

1. literature review - to review the methodology for calculating the deflection of bending cracked elements in accordance with normative documents - *Eurocode 2* and *Statybos techninis reglamentas*;
2. calculation of the curve of the element, taking into account the decrease in stiffness of the cracked area;
3. calculation of the deflection of the bending element, taking into account the cracked sections;
4. to compare the obtained theoretical results with experiments performed by other scientists.

After the analysis of the literature, it was noticed that no methodology is provided to calculate the average stresses (only the calculation of the average curves is given), so it was decided to create a calculation model that would evaluate the modulus of elasticity and average curves in different sections of the element. The essence of all this calculation is to find the change in the modulus of elasticity from the ratio of the bending moment to the moment of cracking.

This master's thesis describes a calculation model, deriving the main formula for calculating the modulus of elasticity in each section under consideration. It is proposed to divide the element in question into as many sections as possible during the calculation, as this way the real dependence of the modulus of elasticity and the bending moments (E/M) can be seen. Also, after calculating and knowing the deformations of the element, they can be applied to the calculation of the crack width of the element.

Number of tables (42 units), number of pictures (41 units), number of literature sources (27 units).

Turinys

Lentelių sąrašas	8
Paveikslų sąrašas	10
Įvadas.....	12
1. Lenkiamųjų supleišėjusių elementų įlinkio skaičiavimo metodika.....	13
1.1. Lenkiamųjų elementų įlinkių skaičiavimas pagal EC2	13
1.2. Lenkiamųjų elementų įlinkių skaičiavimas pagal STR.....	16
1.3. Įlinkių skaičiavimo EC2 ir STR palyginimas.....	21
2. Elementų kreivio skaičiavimas įvertinant supleišėjusios zonos standumo mažėjimą.....	22
3. Lenkiamo elemento įlinkio skaičiavimas įvertinant supleišėjusius ruožus.....	27
3.1. Teorinių rezultatų palyginimas.....	43
4. Teorinių ir eksperimentinių rezultatų palyginimas	51
5. Elemento plyšio pločio apskaičiavimo metodas	66
Išvados	68
Literatūros sąrašas	69
Priedai.....	72
1 Priedas. Tarpiniai sijos tamprumo modulių skaičiavimai, sudalinus siją į 21 ruožą.....	72
2 priedas. Teorinis skaičiavimas keičiant sijos plotį	85
3 priedas. Teorinis skaičiavimas keičiant sijos aukštį.....	89
4 priedas. Teorinis skaičiavimas keičiant sijos armatūros kiekį.....	93
5 priedas. Teorinis skaičiavimas keičiant sijai naudojamą betono klasę.....	96
6 priedas. Teorinis skaičiavimas keičiant sijos plotį ir aukštį	98

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Koeficiento φc_2 reikšmės pagal <i>Statybos techninį reglamentą</i> [2]	18
2 lentelė. Koeficiento v reikšmės pagal <i>Statybos techninį reglamentą</i> [2].....	19
3 lentelė. Koeficiento $\varphi 1s$ reikšmės pagal <i>Statybos techninį reglamentą</i> [2]	20
4 lentelė. Koeficientų ads_1 ir ads_2 reikšmės pagal <i>Eurkodą 2</i> [1].....	25
5 lentelė. Koeficiento kh reikšmė pagal <i>Eurokodą 2</i> [1].....	25
6 lentelė. Gauti rezultatai nagrinėjant siją suskirsčius į 21 ruožą.	42
7 lentelė. Vidutinių įtempių skaičiavimas.....	43
8 lentelė. Sijos pločio, tamprumo modulių ir lenkimo momentų priklausomybės skaičiavimas pirmam, penktam ir dešimtam ruožams	44
9 lentelė. Sijos aukščio, tamprumo modulių ir lenkimo momentų priklausomybės skaičiavimas pirmam, penktam ir dešimtam ruožams	45
10 lentelė. Sijos armatūros kiekio, tamprumo modulių ir lenkimo momentų priklausomybės skaičiavimas pirmam, penktam ir dešimtam ruožams.....	46
11 lentelė. Sijos betono klasės (tamprumo modulio), apskaičiuotų tamprumo modulių ir lenkimo momentų priklausomybės skaičiavimas pirmam, penktam ir dešimtam ruožams	47
12 lentelė. Skaičiavimų rezultatai, pagrindžiantys prielaidą, kad pakeitus sijos plotį ir aukštį galime išsiskaičiuoti naują lenkimo momentą.....	49
13 lentelė. Mokslininkų atliktų eksperimentų duomenys	51
14 lentelė. Vidutinio įlinkio skaičiavimas pagal 2 skyriaus formules B1 sijai ir nustatytas eksperimentinis įlinkis pagal mokslininko Tinoco [4] diagramą	52
15 lentelė. MATLAB [22] programa gauti rezultatai pirmajam eksperimentui (B1 sija)	53
16 lentelė. Vidutinio įlinkio skaičiavimas pagal 2 skyriaus formules BS-0 sijai ir nustatytas eksperimentinis įlinkis pagal mokslininko Slaito [5] diagramą	54
17 lentelė. MATLAB [22] programa gauti rezultatai antrajam eksperimentui (BS-0 sija)	55
18 lentelė. Vidutinio kreivio ir įlinkio skaičiavimas pagal 2 skyriaus formules S3-2-3 sijai ir nustatytas eksperimentinis kreivis pagal mokslininko Kaklauskos [23] diagramą.....	56
19 lentelė. MATLAB [22] programa gauti rezultatai trečiajam eksperimentui (S3-2-3 sija).....	57
20 lentelė. Vidutinio kreivio ir įlinkio skaičiavimas pagal 2 skyriaus formules S3-PC2 sijai ir nustatytas eksperimentinis kreivis pagal mokslininko Meškėno [24] diagramą.....	59
21 lentelė. MATLAB [22] programa gauti rezultatai ketvirtajam eksperimentui (S3-PC2 sija).....	60
22 lentelė. Vidutinio kreivio ir įlinkio skaičiavimas pagal 2 skyriaus formules S1-4 sijai ir nustatytas eksperimentinis kreivis pagal mokslininko Gribniak [25] diagramą.....	61
23 lentelė. MATLAB [22] programa gauti rezultatai penktajam eksperimentui (S1-4 sija)	62
24 lentelė. Gauti rezultatai pakeitus sijos plotį į $b_1' = 0,20 m$	85
25 lentelė. Gauti rezultatai pakeitus sijos plotį į $b_2' = 0,25 m$	86
26 lentelė. Gauti rezultatai pakeitus sijos plotį į $b_3' = 0,30 m$	86
27 lentelė. Gauti rezultatai pakeitus sijos plotį į $b_4' = 0,40 m$	87
28 lentelė. Gauti rezultatai pakeitus sijos aukštį į $h_1' = 0,40 m$	89
29 lentelė. Gauti rezultatai pakeitus sijos aukštį į $h_2' = 0,50 m$	90
30 lentelė. Gauti rezultatai pakeitus sijos aukštį į $h_3' = 0,55 m$	91
31 lentelė. Gauti rezultatai pakeitus sijos aukštį į $h_4' = 0,65 m$	91
32 lentelė. Gauti rezultatai pakeitus sijos armatūros skerspjūvio plotą į $A_s, 1 = 7,63 cm^2$	93
33 lentelė. Gauti rezultatai pakeitus sijos armatūros skerspjūvio plotą į $A_s, 2 = 9,42 cm^2$	93
34 lentelė. Gauti rezultatai pakeitus sijos armatūros skerspjūvio plotą į $A_s, 3 = 10,18 cm^2$	94

35 lentelė. Gauti rezultatai pakeitus sijos armatūros skerspjūvio plotą į $A_s, 4 = 12,57 \text{ cm}^2$	95
36 lentelė. Gauti rezultatai pakeitus sijos betono klasę į C20/25.....	96
37 lentelė. Gauti rezultatai pakeitus sijos betono klasę į C25/30.....	96
38 lentelė. Gauti rezultatai pakeitus sijos betono klasę į C35/45.....	97
39 lentelė. Gauti rezultatai pakeitus sijos betono klasę į C40/50.....	97
40 lentelė. Gauti rezultatai pakeitus sijos plotį į $b1' = 0,40 \text{ m}$ ir sijos aukštį į $h1' = 0,50 \text{ m}$	98
41 lentelė. Gauti rezultatai pakeitus sijos plotį į $b2' = 0,30 \text{ m}$ ir sijos aukštį į $h2' = 0,40 \text{ m}$	99
42 lentelė. Gauti rezultatai pakeitus sijos plotį į $b3' = 0,25 \text{ m}$ ir sijos aukštį į $h3' = 0,55 \text{ m}$	100

Paveikslų sąrašas

1 pav. Nesupleišėjusio skerspjūvio deformacijų ir įtempių pasiskirstymas pagal Europos normas [11]	15
2 pav. Supleišėjusio skerspjūvio deformacijų ir įtempių pasiskirstymas pagal Europos normas [11]	15
3 pav. Pastovaus skerspjūvio gelžbetoninių elementų lenkimo momentų ir kreivių epiūros pagal STR [2]: a – apkrovų išdėstymo schema; b – lenkimo momentų epiūra; c – kreivių epiūra.....	21
4 pav. Skaičiavimuose naudojamų žymėjimai	22
5 pav. Skaičiavimuose naudojama skaičiuojamoji schema	27
6 pav. Tamprumų modulių pasiskirstymo schema, kai skaičiuojama, elementą padalijus į daugiau nei tris ruožus	27
7 pav. Skaičiavimo schema su sijos sudalinimu į zonas	29
8 pav. Pirmajame etape priimta skaičiavimo schema	29
9 pav. Antrajame etape priimta skaičiavimo schema.....	33
10 pav. Tamprumo modulių ir lenkimo momentų priklausomybės diagrama, kai siją sudaliname į 5 nagrinėjamus ruožus	35
11 pav. Pirmojo etapo skaičiavimo schema, kai siją suskirstyta į 21 nagrinėjamą ruožą.....	36
12 pav. Penktojo etapo skaičiavimo schema, kai siją suskirstyta į 21 nagrinėjamą ruožą	38
13 pav. Dešimtojo etapo skaičiavimo schema, kai siją suskirstyta į 21 nagrinėjamą ruožą.....	40
14 pav. Tamprumo modulių ir lenkimo momentų priklausomybės diagrama, kai ruožų skaičius lygus 21 vnt.	42
15 pav. Tamprumo modulio ir lenkimo momentų priklausomybė, kai keičiamas sijos plotis	44
16 pav. Tamprumo modulio ir lenkimo momentų priklausomybė, kai keičiamas sijos aukštis	45
17 pav. Tamprumo modulio ir lenkimo momentų priklausomybė, kai keičiamas sijos armatūros kiekis	46
18 pav. Tamprumo modulio ir lenkimo momentų priklausomybė, kai keičiama sijos betono klasė.....	47
19 pav. Tamprumo modulio ir lenkimo momentų priklausomybė, kai keičiamas sijos plotis ir aukštis	48
20 pav. Kairėje pusėje - įlinkio (x ašis) ir lenkimo momento (y ašis) diagrama pagal mokslininką Tinoco [4]. Nagrinėjamos sijos su žymenimis „Beam 11“, „Beam12“ ir „Beam13“. Dešinėje pusėje – pagal <i>Eurokodo 2</i> gautas teorines reikšmes ir gautas eksperimentiškai sudaryta M/d diagrama... ..	53
21 pav. Pagal pirmojo eksperimento duomenis gautos diagramos. Kairėje - lenkimo momentų ir tamprumo modulių priklausomybė (M/E), dešinėje – lenkimo momentų ir įlinkių priklausomybė (M/d).....	54
22 pav. Kairėje pusėje - įlinkio (x ašis) ir lenkimo momento (y ašis) diagrama pagal mokslininką Slaitą [5]. Nagrinėjama diagrama su žymeniu „Experimental“. Dešinėje pusėje – pagal <i>Eurokodo 2</i> gautas teorines reikšmes ir gautas eksperimentiškai sudaryta M/d diagrama	55
23 pav. Pagal antrojo eksperimento duomenis gautos diagramos. Kairėje - lenkimo momentų ir tamprumo modulių priklausomybė (M/E), dešinėje – lenkimo momentų ir įlinkių priklausomybė (M/d).....	56
24 pav. Kairėje pusėje – elemento kreivio (x ašis) ir lenkimo momento (y ašis) diagrama pagal mokslininką Kaklauską [23]. Nagrinėjama diagrama su žymeniu „S3-2-3“. Dešinėje pusėje – pagal <i>Eurokodo 2</i> gautas teorines reikšmes ir gautas eksperimentiškai sudaryta M/(1/r) diagrama	57

25 pav. Pagal trečiojo eksperimento duomenis gautos diagramos. Kairėje - lenkimo momentų ir tamprumo modulių priklausomybė (M/E), dešinėje – lenkimo momentų ir įlinkių priklausomybė (M/d).....	58
26 pav. Pagal mokslininko Kaklauskio [23] lenkimo momentų ir kreivių diagramos reikšmės sudaryta nauja lenkimo momentų ir įlinkių priklausomybė.....	58
27 pav. Kairėje pusėje – elemento kreivio (x ašis) ir lenkimo momento (y ašis) diagrama pagal mokslininką Meškėną [24]. Nagrinėjama diagrama su žymeniu „S3-PC2“. Dešinėje pusėje – pagal <i>Eurokodo 2</i> gautas teorines reikšmes ir gautas eksperimentiškai sudaryta $M/(1/r)$ diagrama	59
28 pav. Pagal ketvirtojo eksperimento duomenis gautos diagramos. Kairėje - lenkimo momentų ir tamprumo modulių priklausomybė (M/E), dešinėje – lenkimo momentų ir įlinkių priklausomybė (M/d).....	60
29 pav. Pagal mokslininko Meškėno [24] lenkimo momentų ir kreivių diagramos reikšmės sudaryta nauja lenkimo momentų ir įlinkių priklausomybė.....	61
30 pav. Elemento kreivio (x ašis) ir lenkimo momento (y ašis) diagrama pagal mokslininką Gribniak [25]. Nagrinėjama diagrama su žymeniu „S1-4“.....	62
31 pav. Penktajam eksperimentui pagal <i>Eurokodo 2</i> gautas teorines reikšmes ir gautas eksperimentiškai sudaryta $M/(1/r)$ diagrama.....	62
32 pav. Pagal penktojo eksperimento duomenis gautos diagramos. Kairėje - lenkimo momentų ir tamprumo modulių priklausomybė (M/E), dešinėje – lenkimo momentų ir įlinkių priklausomybė (M/d).....	63
33 pav. Pagal mokslininko Gribniak [25] lenkimo momentų ir kreivių diagramos reikšmės sudaryta nauja lenkimo momentų ir įlinkių priklausomybė.....	63
34 pav. Plyšio pločio skaičiavimo schema.....	66
35 pav. Antrojo etapo skaičiavimo schema, kai sija suskirstyta į 21 nagrinėjamą ruožą	72
36 pav. Trečiojo etapo skaičiavimo schema, kai sija suskirstyta į 21 nagrinėjamą ruožą	73
37 pav. Ketvirtojo etapo skaičiavimo schema, kai sija suskirstyta į 21 nagrinėjamą ruožą	75
38 pav. Šeštojo etapo skaičiavimo schema, kai sija suskirstyta į 21 nagrinėjamą ruožą.....	77
39 pav. Septintojo etapo skaičiavimo schema, kai sija suskirstyta į 21 nagrinėjamą ruožą	79
40 pav. Aštuntojo etapo skaičiavimo schema, kai sija suskirstyta į 21 nagrinėjamą ruožą	81
41 pav. Devintojo etapo skaičiavimo schema, kai $n=21$ vnt.....	83

Įvadas

Šio magistro baigiamojo projekto pagrindinis tikslas yra sudaryti skaičiuojamąjį modelį supleišėjusių lenkiamųjų gelžbetoninių elementų standumui nustatyti. Šiam tikslui įgyvendinti iškeliami keturi pagrindiniai uždaviniai:

1. literatūros apžvalga – apžvelgti lenkiamųjų supleišėjusių elementų įlinkio skaičiavimo metodiką pagal norminius dokumentus – *Eurokodą 2* [1] ir *Statybos techninį reglamentą* [2];
2. elemento kreivio skaičiavimas, įvertinant supleišėjusios zonos standumo mažėjimą;
3. lenkiamo elemento įlinkio skaičiavimas, įvertinant supleišėjusius ruožus;
4. palyginti gautus teorinius rezultatus su kitų mokslininkų atliktais eksperimentais.

Šiame projekte pagrindinis naujumas – naujos skaičiavimo metodikos sudarymas, kuri įvertintų supleišėjusių lenkiamųjų gelžbetoninių elementų standumą, nes iki šiol yra atliktų nemažai eksperimentų ir parašyta mokslinių straipsnių apie gelžbetoninių elementų elgseną bei įlinkių skaičiavimą naudojantis įvairiomis projektavimo normomis, tačiau nėra metodikos kaip apskaičiuoti vidutinius įtempius. Šiuo metu pateikiama tik kaip apskaičiuoti vidutinius kreivius. Šiam tikslui literatūros analizėje bus stengiamasi išnagrinėti dvi gelžbetoninių konstrukcijų projektavimo normas *Statybos techninį reglamentą* (toliau – STR) [2] bei visoje Europoje naudojamą *Eurokodą 2* (toliau – EC2) [1] ir apžvelgti juose pateiktą elemento įlinkio ir kreivio skaičiavimą, naudojamas formules ir metodikas. Bus nagrinėjamos pačios projektavimo normos bei kitų mokslininkų parašyti darbai.

Sprendžiant antrąjį iškeltą uždavinį, bus užsiduotas analizuojamas elementas – dviatramė sija su pasirinktomis charakteristikomis ir skaičiuojamas jos kreivis. Šiame skaičiavime bus atsižvelgiama į supleišėjusį ir nesupleišėjusį skerspjūvį, tačiau bus nevertinamas betono valkšnumas ir laisvoji traukumo deformacija (ji priklauso nuo savaiminio traukumo deformacijų bei džiūvimo traukumo deformacijos). Nors pagrindiniame skaičiavime nevertinami kai kurie veiksniai, bet metodika kaip juos įvertinti bus pateikiama.

Daugiausia dėmesio bus skirta trečiajam uždaviniui. Sprendžiant šį uždavinį bus sudaromas skaičiuojamasis modelis, kuris įvertintų skirtinguose sijos ruožuose betono tamprumo modulius bei vidutinius įtempius. Bus išvedamos integralinės išraiškos bei universali formulė, kurią taikant būtų galima apskaičiuoti nagrinėjamame ruože tamprumo modulį. Visas skaičiuojamasis modelis bus pateiktas su schemomis ir su pavyzdžiais. Šio uždavinio pagrindinė idėja – surasti tamprumo modulių kitimą priklausomai nuo lenkimo momentų ir pleišėjimo momento santykio (M/M_{cr}).

Apžvelgiant ketvirtąjį uždavinį, palyginimui bus naudojami duomenų bazėse pateikti moksliniai straipsniai ir literatūra, kurią pateikė mokslininkai, tokie kaip Hamrat [3], Tinoco [4], Slaitas [5] ar O'Flaherty [6] apie lenkiamųjų gelžbetoninių elementų elgseną bei juose ir panašiuose straipsniuose naudojami eksperimentiniai duomenys. Iš šių literatūros šaltinių bus naudojami medžiagų duomenys, tokie kaip betono ir armatūros charakteristikos, bandinių skerspjūvių duomenys, eksperimentų metu gautų įrašų diagramų reikšmės ir kita palyginimams reikalinga informacija.

Šio projekto didžiausias praktinis pritaikomumas, jog aprašytą skaičiavimo modelį galima panaudoti elementų plyšio pločio skaičiavimui. Turint apskaičiuotas elemento deformacijas galime apsiskaičiuoti ir elemento plyšio plotį.

1. Lenkiamųjų supleišėjusių elementų įlinkio skaičiavimo metodika

Šiame skyriuje bus nagrinėjama Lietuvoje labiausiai naudojamos gelžbetoninių konstrukcijų projektavimo normos – *Eurokodas 2* [1] ir *Statybos techninis reglamentas* [2]. Remiantis Marčiukaičiu [7], pasirinktas įlinkio skaičiavimo metodas turi atitikti tikrąją konstrukcijos elgseną nagrinėjamoje stadijoje, todėl svarbu tiksliai nustatyti konstrukciją veikiančias apkrovas ir poveikius. Jeigu manoma, kad nagrinėjamas elementas supleišės, tuomet reikia nustatyti plyšių įtaką tempiamosios ir gniuždomosios zonų deformacijoms. Dažniausiai skaičiuojant yra įvertinami šie veiksniai, kuriuos aprašė Marčiukaitis [7]:

- betono traukumas ir valkšnumas;
- tempiamojo betono tarp plyšių įtaka;
- supleišėjimas dėl anksčiau buvusių apkrovų;
- netiesioginių poveikių įtaka, tokia kaip temperatūros pokyčiai ar kita;
- apkrovos tipas (statinis ar dinaminis);
- betono tamprumo modulis ir jo priklausomybė nuo naudojamų užpildų ir betono kietėjimo sąlygų.

1.1. Lenkiamųjų elementų įlinkių skaičiavimas pagal EC2

Eurokodas 2 numato kelis būdus įvertinti lenkiamos konstrukcijos įlinkius [1]:

- Galima iš anksto numatyti ir suformuluoti taisykles, kuriomis bus nustatyti tam tikri apribojimai konstrukcijai, jog būtų išvengta leistinų įlinkių reikšmių viršijimo. Dažniausiai yra nustatomas konstrukcijos tarpatramio ir aukščio santykis bei įvertinami pataisos koeficientai, kurie aprašo naudojamos armatūros tipą bei kitus konstrukcijos ypatumus. Šiam apribojimui EC2 kartu pateikia ir išraiškas (1.1.1 ir 1.1.2) [1], [8]:

$$\frac{l}{d} = K \left[11 + 1,5\sqrt{f_{ck}} \frac{\rho_0}{\rho} + 3,2\sqrt{f_{ck}} \left(\frac{\rho_0}{\rho} - 1 \right)^{1,5} \right], \text{ jeigu } \rho \leq \rho_0; \quad (1.1.1)$$

$$\frac{l}{d} = K \left[11 + 1,5\sqrt{f_{ck}} \frac{\rho_0}{(\rho - \rho')} + \frac{1}{12} \sqrt{f_{ck}} \sqrt{\frac{\rho'}{\rho_0}} \right], \text{ jeigu } \rho > \rho_0; \quad (1.1.2)$$

čia $\frac{l}{d}$ – ribinis konstrukcijos tarpatramio ir aukščio santykis;

K – koeficientas, kurį taikant atsižvelgiama į konstrukcijų sistemų skirtumus;

f_{ck} – cilindrinis charakteristinis gniuždomasis 28 dienų betono stipris;

ρ_0 – santykinis armavimo koeficientas;

ρ – koeficientas, skirtas išlaikyti skaičiuojamųjų apkrovų sudaromą momentą tempiamajame armavime ties tarpatramio viduriu (jei skaičiuojama, kaip gembė, tuomet ties atrama);

ρ' – koeficientas, skirtas išlaikyti skaičiuojamųjų apkrovų sudaromą momentą gniuždomajame armavime ties tarpatramio viduriu (jei skaičiuojama, kaip gembė, tuomet ties atrama).

- Norint sužinoti tikrąją skaičiuojamos konstrukcijos elgseną reikia atlikti įlinkių tikrinimą skaičiavimu. Šiuo skaičiavimu galima įvertinti tikrąsias deformacijas. Tuomet nagrinėjami du

aspektai – kai elementas yra nesupleišėjęs ir kai supleišėjęs, o siekiant tai įvertinti naudojama išraiška (1.1.3) [1], [9]:

$$\alpha = \zeta \alpha_{II} + (1 - \zeta) \alpha_I; \quad (1.1.3)$$

čia α – deformacijos priežastį sukeliantis veiksnys, pavyzdžiui, elemento kreivis, posūkis ar jo deformacija;

ζ – koeficientas, kuris apibūdina pasiskirstymą ir lygus 0,5 – kai skerspjūvis yra nesupleišėjęs, o esant supleišėjusiam yra apskaičiuojamas.

α_I, α_{II} – tai supleišėjusio ir nesupleišėjusio būvio reikšmės.

Šiame projekte nagrinėsime būtent pastarąjį variantą – kai įlinkiai yra skaičiuojami, o ne ribojami. Naudojantis betono tempiamuoju stipriu ir efektyviuoju tamprumo modulių galima įvertinti elemento deformacijas, sukeltas jų veikiančių apkrovų. Taip pat, jeigu nuo šių apkrovų atsiranda ir valkšnumas, gauti bendrai deformacijai reikia apskaičiuoti efektyvųjį tamprumo modulį pagal (1.1.4) išraišką [1], [10]:

$$E_{c,eff} = \frac{E_{cm}}{1 + \varphi(\infty, t_0)}; \quad (1.1.4)$$

čia E_{cm} – kirstinis betono tamprumo modulis;

$\varphi(\infty, t_0)$ – betono valkšnumo koeficientas, atitinkantis apkrovą ir laiko intervalą ir gali būti parenkamas naudojantis EC2 grafikais esant įprastoms aplinkos sąlygoms [1].

Šiame skaičiavime reikia papildomai įvertinti elemento kreivį, susidarantį nuo traukumo džiūvimo metu. Šis kreivis gali būti įvertinamas naudojantis (1.1.5) išraiška [11]:

$$\frac{1}{r_{cs}} = \varepsilon_{cs} \alpha_e \frac{S}{I}; \quad (1.1.5)$$

čia ε_{cs} – laisvoji traukumo deformacija;

α_e – efektyvusis modulinis koeficientas, apskaičiuojamas iš armatūros tamprumo modulio E_s ir efektyviojo tamprumo modulio $E_{c,eff}$ santykio;

S – armatūros skerspjūvio ploto statinis momentas aplink skerspjūvio sunkio centrą;

I – elemento skerspjūvio ploto inercijos momentas.

Pats tiksliausias įlinkio skaičiavimas, taikant Europos normas, yra laikomas, kai nagrinėjamas ne vienas, o keli elemento skerspjūviai, esantys išilgai elemento, tuomet kiekviename jų yra nustatinėjami kreiviai, o galiausiai pritaikant skaitinį integravimą, apskaičiuoti vidutinį įlinkį. Taip pat, jog būtų skaičiavimai dar tikslesni, bus nagrinėjamas įlinkis esant nesupleišėjusiam elementui bei supleišėjusiam [1]. Vidutinio kreivio formulę galima išsivesti iš (1.1.3) formulės [11]:

$$\frac{1}{r} = \zeta \frac{1}{r_{cr}} + (1 - \zeta) \frac{1}{r_{uc}}; \quad (1.1.6)$$

čia $\frac{1}{r_{cr}}, \frac{1}{r_{uc}}$ – atitinkamai supleišėjusio ir nesupleišėjusio skerspjūvio kreiviai;

ζ – koeficientas, kuris apibūdina pasiskirstymą ir lygus 0,5 – kai skerspjūvis yra nesupleišjęs, o esant supleišėjusiam yra apskaičiuojamas [11], [12] pagal (1.1.7) formulę:

$$\zeta = 1 - \beta \left(\frac{\sigma_{sr}}{\sigma_s} \right)^2; \quad (1.1.7)$$

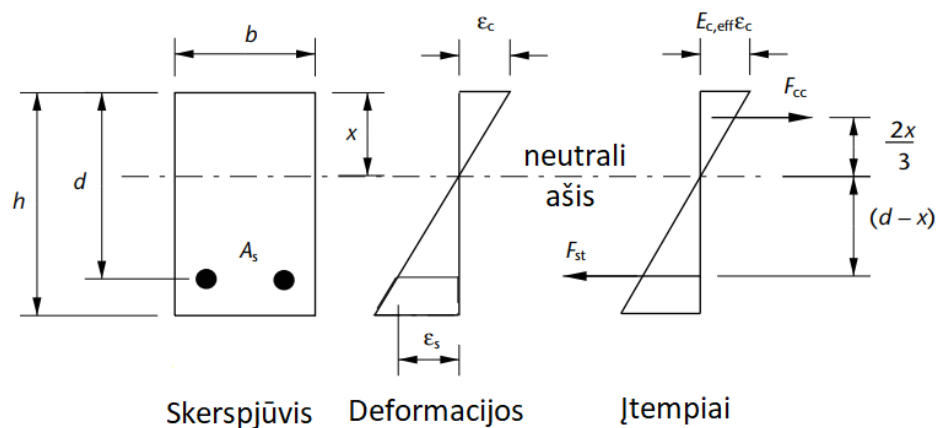
čia β – apkrovos trukmės koeficientas, lygus 1, kai veikia vieną kartą trumpalaikė apkrova ir 0,5, kai veikia ilgalaikės apkrovos arba daug kartotinių apkrovos ciklų;

σ_{sr} – supleišėjusio skerspjūvio apkrovimo sąlygomis gauti tempiamosios armatūros įtempiai, kurie sukėlė pirmuosius plyšius;

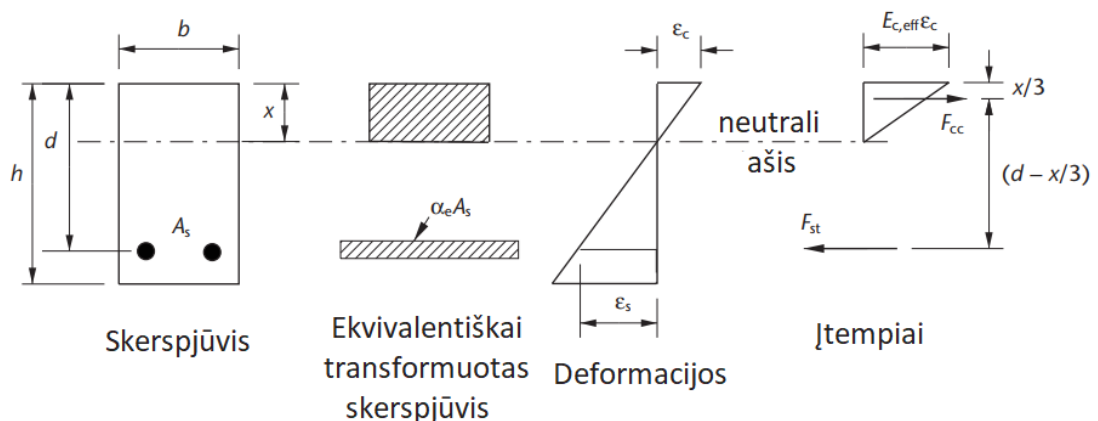
σ_s – supleišėjusio skerspjūvio tempiamosios armatūros įtempiai.

Pasiskirstymo koeficiento formulėje (1.1.7) $\frac{\sigma_{sr}}{\sigma_s}$ santykis gali būti pakeičiamas į lenkimo momentų santykį $\frac{M_{cr}}{M}$, esant lenkimui [9], bei į ašinių jėgų santykį $\frac{N_{cr}}{N}$, veikiant tempimui. Tuomet M_{cr} – atitinka momentą, kuris sukelia pleišėjimą skerspjūvyje, o N_{cr} – jėgą, kuri sukelia pleišėjimą [1].

Įtempių ir deformacijų pasiskirstymas nesupleišėjusiame skerspjūvyje pavaizduotas 1 paveiksle, o supleišėjusiame – 2 paveiksle.



1 pav. Nesupleišėjusio skerspjūvio deformacijų ir įtempių pasiskirstymas pagal Europos normas [11]



2 pav. Supleišėjusio skerspjūvio deformacijų ir įtempių pasiskirstymas pagal Europos normas [11]

Nagrinėjant nesupleišėjusį skerspjūvį ir jeigu jį veikia lenkimo momentas M , kreivį šiame skerspjūvyje galime apskaičiuoti [6] pagal (1.1.8) formulę. Tuo tarpu norint aprašyti supleišėjusio skerspjūvio – reikia naudotis (1.1.9) formule [1], [13].

$$\frac{1}{r_{uc}} = \frac{M}{E_{c,eff} \cdot I_{uc}}; \quad (1.1.8)$$

čia M – skerspjūvį veikiantis lenkimo momentas;

$E_{c,eff}$ – efektyvusis betono tamprumo modulis, kuriam esant atsiranda valkšnumas;

I_{uc} – nesupleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas.

$$\frac{1}{r_{cc}} = \frac{M}{E_{c,eff} \cdot I_{cc}}; \quad (1.1.9)$$

čia I_{cc} – supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas. 2 paveiksle pavaizduoto skerspjūvio gali būti apskaičiuotas pagal (1.1.10) formulę [8]:

$$I_{cc} = \frac{b \cdot x^3}{3} + \alpha_e \cdot A_s \cdot (d - x)^2; \quad (1.1.10)$$

čia b – elemento (skerspjūvio) plotis;

x – gniuždomos zonos aukštis;

α_e – tamprumo modulio redukcijos koeficientas, apskaičiuojamas pagal (1.1.11) formulę:

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_{c,eff}}; \quad (1.1.11)$$

čia E_s – armatūros tamprumo modulio skaičiuotinė reikšmė.

A_s – armatūros skerspjūvio plotas;

d – darbinis skerspjūvio aukštis.

1.2. Lenkiamųjų elementų įlinkių skaičiavimas pagal STR

Projektuojant konstrukcijas, galime remtis ne tik Europos normomis, bet ir Lietuvoje galiojančiais *Statybos techniniais reglamentais*. Vienas iš STR [2] aprašo gelžbetoninių konstrukcijų projektavimą, šių konstrukcijų deformacijų apskaičiavimą, tarp jų ir įlinkio. Pateiktame skaičiavime nagrinėjamas elementas vertinamas ruožais ir analizuojama ar viename iš ruožų tempiamojoje zonoje yra susidariusių normalinių plyšių, ar ne. Pirmuoju atveju elemento kreivis, skirtas įlinkiui skaičiuoti yra apskaičiuojamas kaip vientiso kūno ir naudojama (1.2.1) formulė, o kitu atveju – vidutinis kreivis yra apskaičiuojamas pagal tempiamosios armatūros bei gniuždomosios betono zonos deformacijas [2].

$$\frac{1}{r} = \left(\frac{1}{r}\right)_1 + \left(\frac{1}{r}\right)_2 - \left(\frac{1}{r}\right)_3 - \left(\frac{1}{r}\right)_4; \quad (1.2.1)$$

čia $\left(\frac{1}{r}\right)_1$ – kreivis nuo kintamų apkrovų (trumpalaikės dalies), apskaičiuojamas pagal (2.2) formulę:

$$\left(\frac{1}{r}\right)_1 = \frac{M}{\varphi_{c1} \cdot E_{cm} \cdot I_{eff}}; \quad (1.2.2)$$

čia M – momentas, atsiradęs apie ekvivalentinio skerspjūvio svorio centro ašį ir yra statmenas elementą veikiančio lenkimo momento plokštumai ir jis sukeltas dėl tinkamumo ribiniam būviui priimtų kintamų ir tariamai nuolatinių apkrovų;

φ_{c1} – betono trumpalaikio valkšnumo koeficientas. Jeigu elementas iš lengvojo su tankiu užpildu, smulkiagrūdžio arba sunkiojo betono koeficientas pasirenkamas 0,85, o jeigu iš lengvojo su poringu smulkiu užpildu, tuomet – 0,70;

E_{cm} – betono tamprumo modulis, nustatomas pagal betono klasę;

I_{eff} – efektyvusis elemento inercijos momentas.

$\left(\frac{1}{r}\right)_2$ – kreivis nuo nuolatinių ir tariamai nuolatinių apkrovų, kai nevertinamas išankstinis armatūros apspaudimas, apskaičiuojamas pagal (1.2.3) formulę:

$$\left(\frac{1}{r}\right)_2 = \frac{M \cdot \varphi_{c2}}{\varphi_{c1} \cdot E_{cm} \cdot I_{eff}}; \quad (1.2.3)$$

čia φ_{c2} – betono ilgalaikio valkšnumo koeficientas, parenkamas pagal 1 lentelę.

$\left(\frac{1}{r}\right)_3$ – kreivis dėl trumpalaikės skaičiuotinės situacijos, esant elemento išlinkiui nuo išankstinio apspaudimo jėgos, apskaičiuojamas pagal (1.2.4) formulę:

$$\left(\frac{1}{r}\right)_3 = \frac{P_d \cdot e_p}{\varphi_{c1} \cdot E_{cm} \cdot I_{eff}}; \quad (1.2.4)$$

čia P_d – skaičiuojamoji išankstinio įtempimo jėga;

e_p – ekscentricitetas.

$\left(\frac{1}{r}\right)_4$ – kreivis dėl betono susitraukimo ir valkšnumo nuo esančios išankstinės apspaudimo jėgos $P_{m,0}$, sukulto elemento išlinkio, apskaičiuojamas pagal (1.2.5) formulę:

$$\left(\frac{1}{r}\right)_4 = \frac{\varepsilon_{c1} - \varepsilon_{c2}}{d}; \quad (1.2.5)$$

čia $\varepsilon_{c1}, \varepsilon_{c2}$ – dėl betono susitraukimo ir valkšnumo nuo išankstinio apspaudimo jėgos $P_{m,0}$ sukeltos betono santykinės deformacijos. Deformacija išilginės tempiamosios armatūros masės centro lygyje apskaičiuojama pagal (1.2.6) formulę, o deformacija kraštiniame gniuždomo betono sluoksnyje pagal (1.2.7) formulę [2]:

$$\varepsilon_{c1} = \frac{\sigma_{c1}}{E_s}; \quad (1.2.6)$$

čia σ_{c1} – tempiamosios zonos iš anksto įtemptos armatūros įtempimo nuostoliai dėl betono valkšnumo ir susitraukimo.

$$\varepsilon_{c2} = \frac{\sigma_{c2}}{E_s}; \quad (1.2.7)$$

čia σ_{c2} – jeigu įtempta armatūra yra kraštiniame gniuždomajame sluoksnyje tuomet įtempimo nuostoliai apskaičiuojami kaip ir σ_{c1} .

d – skerspjūvio naudingasis aukštis.

1 lentelė. Koeficiento φ_{e2} reikšmės pagal *Statybos techninį reglamentą* [2]

Skaičiuotinė situacija	Koeficientas φ_{e2} , įvertinantis betono ilgalaikio vaikšnumo įtaką elemento be plyšių deformacijoms, kai konstrukcijų betonas		
	Sunkusis, lengvasis, porėtasis, akytasis (dvisluoksnėms įtemptosioms konstrukcijoms iš sunkiojo betono)	smulkiagrūdis	
		A	B
1. Trumpalaikė	1,0	1,0	1,0
2. Nuolatinė, kai aplinkos drėgmė %:			
a) 40-75	2,0	2,6	3,0
b) mažiau nei 40	3,0	3,9	4,5

Pastabos:

1. Betonui esant pakaitomis sauso ir vandens prisotinto būvio, koeficiento φ_{e2} reikšmės ilgalaikėms apkrovoms didinamos 1,2 karto.
2. Aplinkos drėgmei esant didesnei nei 75 % ir betonui apkrautam vandens prisotintame būvyje, koeficiento φ_{e2} reikšmės pagal šios lentelės 2a p. dauginamos iš koeficiento 0,8.

Lenkiamoje konstrukcijoje, kurioje tempiamojoje zonoje atsiranda plyšiai, įlinkiai apskaičiuojami pagal (1.2.8) formulę [14]:

$$\frac{1}{r} = \frac{M}{d \cdot z} \left[\frac{\psi_s}{E_s \cdot A_{s1}} + \frac{\psi_c}{(\varphi_f + \xi) \cdot b \cdot d \cdot E_{cm} \cdot v} \right] - \frac{N_{tot}}{d} \cdot \frac{\psi_s}{E_s \cdot A_{s1}}; \quad (1.2.8)$$

čia M – momentas apie ašį, statmeną lenkimo momento veikimo plokštumai, einančiai per tempiamosios armatūros skerspjūvio centrą, nuo visų elementą veikiančių išorinių jėgų, išdėstytų vienoje nagrinėjamojo skerspjūvio pusėje ir nuo išankstinio apspaudimo jėgos;

z – petys, apskaičiuojamas pagal (1.2.9) formulę. Aprašo atstumą nuo tempiamos armatūros skerspjūvio centro iki gniuždomosios zonos atstojamios virš plyšio;

ψ_s – koeficientas, įvertinantis tempiamojo betono darbą ruožuose, kuriose atsiradę plyšiai ir apskaičiuojamas pagal (1.2.10) formulę [15];

A_{s1} – tempiamos arba mažiau gniuždomos armatūros skerspjūvio plotas;

ψ_c – koeficientas, įvertinantis gniuždomo betono kraštinio sluoksnio deformacijų netolygumą. Jis lygus 0,9, kai betonas yra lengvasis, smulkiagrūdis arba sunkusis ir lygus – 0,7, kai naudojamas žemesnis nei LC12/13 lengvasis betonas. Tačiau, jeigu yra neatsižvelgiama į betono klasę ir rūšį, tuomet priimamas lygus – 1,0;

φ_f – koeficientas, apskaičiuojamas pagal (1.2.11) formulę;

ξ – sąlyginis gniuždomasis betono zonos aukštis, apskaičiuojamas pagal (1.2.12) formulę;

v – elastingai tamprią betono gniuždomosios zonos savybę apibūdinantis koeficientas, parenkamas pagal 2 lentelę.

N_{tot} – išilginės jėgos N ir apspaudimo jėgos $P_{m,0}$ atstojamoji.

2 lentelė. Koeficiento v reikšmės pagal *Statybos techninį reglamentą* [2]

Skaičiuotinė situacija	Koeficientas v , apibūdinantis elastingai tamprią betono gniuždomosios zonos savybę betoninėms konstrukcijoms		
	Sunkiojo, lengvojo	smulkiagrūdžio	
		A	B
1. Trumpalaikė	0,45	0,45	0,45
2. Nuolatinė, kai aplinkos drėgmė %:			
a) 40-75	0,15	0,10	0,08
b) mažiau nei 40	0,10	0,07	0,05

Pastabos:

1. Betonui esant pakaitomis sausame ir vandens prisotintame būvyje, koeficiento v reikšmės tariamai ilgalaikėms apkrovoms didinamos 1,2 karto.
2. Aplinkos drėgmei esant didesnei nei 75 % ir betonui, apkrautam vandens prisotintame būvyje, koeficiento v reikšmės pagal šios lentelės 2 a p. dalijamos iš koeficiento 0,8.

$$z = d \left[1 - \frac{\frac{h_f}{d} \cdot \varphi_f + \xi^2}{2(\varphi_f + \xi)} \right]; \quad (1.2.9)$$

čia h_f – elemento sienutės (lentynos) aukštis.

$$\varphi_s = 1,25 - \varphi_{1s} \cdot \varphi_m - \frac{1 - \varphi_m^2}{(3,5 - 1,8 \cdot \varphi_m) \cdot e_{s,tot}/d}; \quad (1.2.10)$$

čia φ_{1s} – ilgalaikių apkrovų veikimą lemiantis koeficientas ir imamas pagal 3 lentelę;

φ_m – koeficientas, apskaičiuojamas pagal (1.2.13) formulę [15];

$e_{s,tot}$ – ašinės jėgos N_{tot} ekscentricitetas apie tempiamos armatūros masės centrą. Apskaičiuojamas pagal (1.2.14) formulę.

$$\varphi_f = \frac{(b_{eff} - b) \cdot h_f + \frac{\alpha_e}{2v} A_{s2}}{b \cdot d}; \quad (1.2.11)$$

čia b_{eff} – efektyvusis skerspjūvio plotis;

α_e – armatūros E_s ir betono E_{cm} tamprumo modulių santykis [15];

A_{s2} – gniuždomos arba mažiau tempiamos armatūros skerspjūvio plotas.

$$\xi = \frac{1}{\beta + \frac{1+5(\delta+\lambda)}{10\rho \cdot \alpha_e}} \pm \frac{1,5 + \varphi_f}{11,5 \frac{e_{s,tot}}{d} + 5} \leq 1,0; \quad (1.2.12)$$

čia β – koeficientas, kai betonas smulkiagrūdis lygus 1,6, o kai sunkusis arba lengvasis – 1,8;

δ – dydis, apskaičiuojamas pagal (1.2.15) formulę;

λ – elemento liaunumas, apskaičiuojamas pagal (1.2.16) formulę.

$$\varphi_m = \frac{f_{ctk} \cdot W_{pl}}{|\pm M_r \mp M_{rp}|} \leq 1,0; \quad (1.2.13)$$

čia f_{ctk} – charakteristinis betono tempiamasis stipris;

W_{pl} – plastinis betoninio skerspjūvio atsparumo momentas;

M_r, M_{rp} – lenkimo momentai, jeigu sukelia tempiamosios armatūros tempimą imami su teigiamais ženklais.

$$e_{s,tot} = \frac{M}{N_{tot}}; \quad (1.2.14)$$

$$\delta = \frac{M}{b \cdot d^2 \cdot f_{ck}}; \quad (1.2.15)$$

čia f_{ck} – charakteristinis betono gniuždomasis stipris.

$$\lambda = \varphi_f \left(1 - \frac{h_f}{2d}\right); \quad (1.2.16)$$

Jeigu nagrinėjamas elementas yra stačiakampio arba tėjinio skerspjūvio su tempiamojoje zonoje lentyna, tuomet (1.2.9) ir (1.2.16) formulėse h_f turi būti vertinamas kaip $2a_2$, jeigu yra gniuždoma A_{s2} armatūra ir laikomas lygus 0 jeigu nėra gniuždomosios armatūros. Taip pat, petys z neturi viršyti $0,98 \cdot e_{s,tot}$ [2].

3 lentelė. Koeficiento φ_{1s} reikšmės pagal *Statybos techninį reglamentą* [2]

Skaičiuotinė situacija	Betono klasė	
	aukštesnė kaip C8/10	C8/10 ir žemesnė
1. Trumpalaikė, kai armatūra:		
a) strypinė:		
lygi	1,0	0,7
periodinio profilio	1,1	0,8
b) viela	1,0	0,7
2. Nuolatinė, nepaisant armatūros rūšies	0,8	0,6

Pagrindinė užduotis projektuojant konstrukciją ir vertinant jos įlinkį, kad jis neviršytų leistinų reikšmių, kaip nurodyta reglamente [16], jame pateikta ir (1.2.17) išraiška. Taip pat, reikia įvertinti visus veiksnius, kurie veikia konstrukciją – tai gali būti medžiagų plastinės deformacijos, visos deformacijų schemas vertinimas, plyšių susidarymas, greta esančių konstrukcijų įtaka, jungimo mazgų poslinkiai arba pagrindo deformavimas. Reikia atsižvelgti ir į tai, kad betone pasireiškia valkšnumas, todėl papildomai vertinami fiziologiniai reikalavimai – technologiniai, konstrukciniai bei estetiniai-psichologiniai veiksniai.

$$d \leq d_{lim}; \quad (1.2.17)$$

čia d – konstrukcijos arba jos elemento išlinkis, nustatytas įvertinant konstrukciją veikiančius veiksnius;

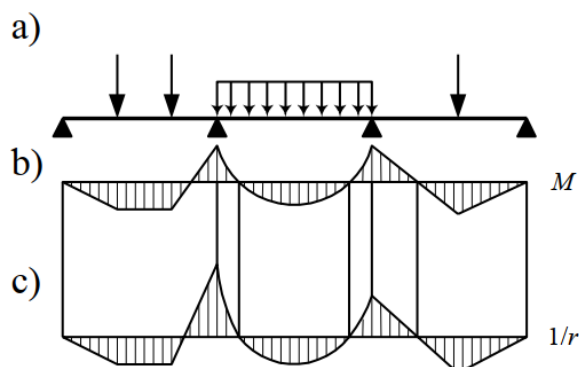
d_{lim} – ribinis konstrukcijos įlinkis, kuris nustatytas reglamente [8].

Dėl lenkimo deformacijų atsiradęs įlinkis gali būti apskaičiuojamas pagal (1.2.18) formulę [17]:

$$d_m = \int_0^l \bar{M} x \left(\frac{1}{r}\right)_x dx; \quad (1.2.18)$$

čia $\bar{M}x$ – vienetinės jėgos sukeltas lenkimo momentas nagrinėjamam pjūvyje, kuriame apskaičiuojamas įlinkis, atstumu x ;

$\left(\frac{1}{r}\right)_x$ – Nuo apkrovų, sukeliančių lenkimą, apskaičiuotas pilnutinis elemento kreivis nagrinėjamame pjūvyje x . Šis kreivis atitinka ruožuose be plyšių ir su plyšiais, o ženklas parenkamas pagal kreivio epiūrą.



3 pav. Pastovaus skerspjūvio gelžbetoninių elementų lenkimo momentų ir kreivių epiūros pagal STR [2]: a – apkrovų išdėstymo schema; b – lenkimo momentų epiūra; c – kreivių epiūra

1.3. Įlinkių skaičiavimo EC2 ir STR palyginimas

Apibendrinant 1.1 ir 1.2 skyrius galime teigti, kad tiek *Eurokode 2*, tiek *Statybos techniniame reglamente* įlinkiai yra įvertinami, kai elemente nėra atsivėrę normalinių plyšių ir jiems atsiradus. Atsižvelgiant į tai, kad šios projektavimo normos buvo sudarytos skirtingais metais, pagal skirtingus duomenų analizavimus, todėl nenuostabu, kad jose pateikti skaičiavimai visgi skiriasi savo formulėmis ir pateiktais koeficientų dydžiais. Galime padaryti išvadą, kad projektuojant gelžbetoninį elementą pagal kiekvieną iš šių projektavimo normų, bus gaunami šiek tiek skirtingos elemento kreivių ir įlinkių reikšmės bei gauta skirtinga rezultatų atsarga.

Projektavimo normose pateiktuose skaičiavimuose vyrauja svarbus įlinkiui apskaičiuoti dydžiai – betono tamprumo modulis E , armatūrą aprašantys dydžiai ir koeficientai, lenkimo momentas M bei apkrovų pobūdį ir trukmę įvertinantys koeficientai. Taip pat, atsižvelgiama į betono valkšnumą ir traukumą.

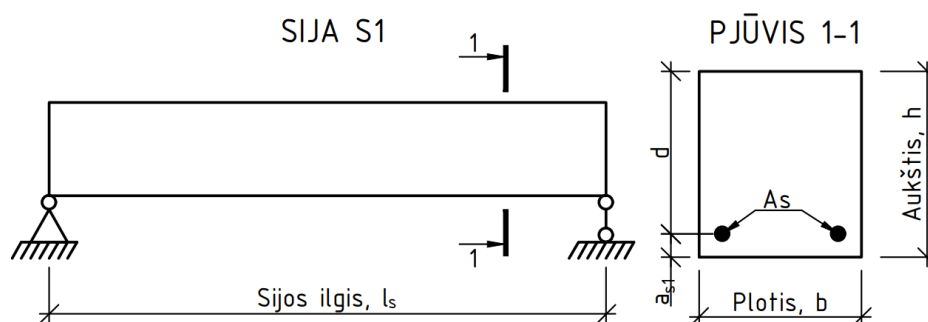
2. Elementų kreivio skaičiavimas įvertinant supleišėjusios zonos standumo mažėjimą

Kreivio skaičiavimui pasirinktas elementas – stačiakampio skerspjūvio vienpusiai armuota sija. Sijos eskizas pavaizduotas 4 paveiksle. Skaičiavimuose priimsime šiuos dydžius:

- sijos ilgis $l_s = 6,0 \text{ m}$;
- aukštis $h = 0,45 \text{ m}$;
- plotis $b = 0,35 \text{ m}$;
- apsauginis betono sluoksnis $a_{s1} = 0,05 \text{ m}$;
- darbo aukštis $d = 0,45 - 0,05 = 0,40 \text{ m}$.

Priimame, kad siją veikia išskirstyta apkrova, lygi $q = 9 \text{ kN/m}$, ji bus pastato viduje, pagaminta iš C30/37 betono klasės, kuris kietėjo 28 dienas normaliomis sąlygomis. Sijai suarmuoti naudojama $2 \times \emptyset 20 \text{ mm}$ armatūra, kurios skerspjūvio plotas lygus $A_s = 6,28 \text{ cm}^2$ ir tamprumo modulis lygus $E_s = 200 \text{ GPa}$. Betono C30/37 klasės charakteristikos:

- charakteristinis betono gniuždomasis stipris $f_{ck} = 30 \text{ MPa}$;
- betono tamprumo modulis (kirstinis) $E_{cm} = 33 \text{ GPa}$;
- vidutinis betono ašinis tempiamasis stipris $f_{ctm} = 2,9 \text{ MPa}$.



4 pav. Skaičiavimuose naudojamų žymėjimai

Siją veikiantis lenkimo momentas tarpatramio viduryje apskaičiuojamas pagal 2.1 formulę [7]:

$$M = \frac{q \cdot l_s^2}{8} = \frac{9 \cdot 6^2}{8} = 40,5 \text{ kNm}; \quad (2.1)$$

čia q – siją veikianti išskirstyta apkrova;

l_s – skaičiuojamasis sijos ilgis arba kitaip – tarpatramis.

Šiame skyriuje pagal pasirinktus nagrinėjamo elemento parametrus apskaičiuosime literatūros analizės metu surastais, elemento vidutinių kreivių ir įlinkio jo viduryje, skaičiavimo metodais ir surasime reikiamus dydžius. Skaičiavimuose vertinsime trumpalaikes apkrovas, kad atsižvelgtume į tai, jog elementas eksperimentuose yra bandomas trumpai (ne ilgiau nei valandą) po 28 dienų kietėjimo.

Dėl didesnės pritaikymo srities tolimesni skaičiavimai bus atliekami naudojant *Eurokodą 2*. Norint įvertinti trumpalaikes apkrovas, valkšnumo koeficiento nevertiname, nes priimame, kad per bandomąjį laikotarpį valkšnumas nespės pasireikšti. Tuomet, efektyvusis betono tamprumo modulis, pagal 1.1.4 lygtį, lygus:

$$E_{c,eff} = \frac{E_{cm}}{1+\varphi(\infty, t_0)} \cdot 1,05 = \frac{33}{1+0} \cdot 1,05 = 34,65 \text{ GPa};$$

Nesupleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas apskaičiuojamas pagal 2.2 formulę:

$$I_{uc} = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{350 \cdot 450^3}{12} = 26,578 \cdot 10^8 \text{ mm}^4; \quad (2.2)$$

čia b – sijos plotis;

h – sijos aukštis.

Nesupleišėjusio skerspjūvio kreivis, pagal 1.1.8 lygtį, lygus:

$$\frac{1}{r_{uc}} = \frac{M}{E_{c,eff} \cdot I_{uc}} = \frac{40,5 \cdot 10^6}{34,65 \cdot 10^3 \cdot 26,578 \cdot 10^8} = 4,398 \cdot 10^{-7} \frac{1}{\text{mm}};$$

Tamprumo modulio redukcijos koeficientas, pagal 1.1.11 lygtį, lygus:

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_{c,eff}} = \frac{200}{34,65} = 5,77;$$

Gniuždomos zonos aukštis apie neutralią ašį apskaičiuojamas iš išraiškos:

$$\frac{1}{2} \cdot \varepsilon_c \cdot E_c \cdot b \cdot x = \frac{\varepsilon_c \cdot (d-x)}{x} \cdot E_s \cdot A_s;$$

$$\frac{1}{2} \cdot E_c \cdot b \cdot x^2 = E_s \cdot A_s \cdot d - E_s \cdot A_s \cdot x;$$

$$\frac{1}{2} \cdot E_c \cdot b \cdot x^2 + E_s \cdot A_s \cdot x - E_s \cdot A_s \cdot d = 0;$$

$$\frac{1}{2} \cdot b \cdot x^2 + \alpha_e \cdot A_s \cdot x - \alpha_e \cdot A_s \cdot d = 0;$$

$$D = \alpha_e^2 \cdot A_s^2 + 2 \cdot \alpha_e \cdot A_s \cdot b;$$

$$x = \frac{-\alpha_e \cdot A_s + \sqrt{\alpha_e^2 \cdot A_s^2 + 2 \cdot \alpha_e \cdot A_s \cdot b \cdot d}}{b} = \frac{-5,77 \cdot 628 + \sqrt{5,77^2 \cdot 628^2 + 2 \cdot 5,77 \cdot 628 \cdot 350 \cdot 400}}{350} = 81,254 \text{ mm}; \quad (2.3)$$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas, pagal 1.1.10 lygtį, lygus:

$$I_{cc} = \frac{b \cdot x^3}{3} + \alpha_e \cdot A_s \cdot (d-x)^2 = \frac{350 \cdot 81,254^3}{3} + 5,77 \cdot 628 \cdot (400 - 81,254)^2 = 4,309 \cdot 10^8 \text{ mm}^4;$$

Supleišėjusio skerspjūvio kreivis, pagal 1.1.9 lygtį, lygus:

$$\frac{1}{r_{cc}} = \frac{M}{E_{c,eff} \cdot I_{cc}} = \frac{40,5 \cdot 10^6}{34,65 \cdot 10^3 \cdot 4,309 \cdot 10^8} = 2,712 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{mm}};$$

Pleišėjimo momentas apskaičiuojamas pagal 2.4 formulę [3]:

$$M_{cr} = \frac{b \cdot h^2}{6} \cdot f_{ctm} = \frac{350 \cdot 450^2}{6} \cdot 2,9 = 34,256 \cdot 10^6 \text{ Nmm} = 34,256 \text{ kNm}; \quad (2.4)$$

Pasiskirstymo koeficientas, pagal 1.1.7 lygtį, lygus:

$$\zeta = 1 - \beta \left(\frac{\sigma_{sr}}{\sigma_s} \right)^2 = 1 - \beta \left(\frac{M_{cr}}{M} \right)^2 = 1 - 1 \left(\frac{34,256 \cdot 10^6}{40,5 \cdot 10^6} \right)^2 = 0,285;$$

Vidutinis sijos kreivis, pagal 1.1.6 lygtį, lygus:

$$\frac{1}{r_1} = \zeta \frac{1}{r_{cc}} + (1 - \zeta) \frac{1}{r_{uc}} = 0,285 \cdot 2,712 \cdot 10^{-6} + (1 - 0,285) \cdot 4,398 \cdot 10^{-7} = 1,086 \cdot 10^{-6} \frac{1}{mm};$$

Elemento įlinkis jo viduryje, apskaičiuojamas pagal 2.5 formulę:

$$d_{avg} = \frac{5}{48} \cdot l_s^2 \cdot \frac{1}{r_1} = \frac{5}{48} \cdot 6000^2 \cdot 1,086 \cdot 10^{-6} = 4,074 \text{ mm}; \quad (2.5)$$

Tolimesniuose skaičiavimuose mums gali reikėti ne tik vidutinio įlinkio, bet ir atskirai supleišėjusios ir nesupleišėjusios dalies įlinkio. Juos taip pat apskaičiuojame pagal 2.5 formulę, tik pakeičiame $\frac{1}{r_1}$ dydį į $\frac{1}{r_{uc}}$ ir $\frac{1}{r_{cc}}$:

$$d_{un} = \frac{5}{48} \cdot l_s^2 \cdot \frac{1}{r_{un}} = \frac{5}{48} \cdot 6000^2 \cdot 4,398 \cdot 10^{-7} = 1,649 \text{ mm};$$

$$d_{cr} = \frac{5}{48} \cdot l_s^2 \cdot \frac{1}{r_{cc}} = \frac{5}{48} \cdot 6000^2 \cdot 2,712 \cdot 10^{-6} = 10,170 \text{ mm};$$

Papildomai galime patikrinti ar gauta vidutinė reikšmė yra tinkama:

$$d_{un} = 1,649 \text{ mm} < d_{avg} = 4,074 \text{ mm} < d_{cr} = 10,170 \text{ mm};$$

Gauname, kad sąlyga tenkinama. Skaičiavimuose nevertinome ilgalaikių veiksmų, kurie veiktų siją. Jeigu norėtume juos įvertinti turėtumėme įvertinti betono valkšnumą bei laisvąją traukumo deformaciją. Laisvoji (bendroji) traukumo deformacija priklauso nuo dviejų dedamųjų – dėl savaiminio traukumo deformacijos bei džiūvimo traukumo deformacijos ir apskaičiuojama pagal 2.6 formulę [18]:

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca}; \quad (2.6)$$

čia ε_{cd} – traukioji santykinė deformacija dėl džiūvimo;

ε_{ca} – savaiminio traukumo deformacija.

Pagrindinė traukioji santykinė deformacija dėl džiūvimo galime apskaičiuoti pagal 2.7 formulę [18]:

$$\varepsilon_{cd,0} = 0,85 \left[(220 + 110 \cdot \alpha_{ds1}) \exp \left(-\alpha_{ds2} \cdot \frac{f_{cm}}{f_{cm0}} \right) \right] \cdot 10^{-6} \cdot \beta_{RH}; \quad (2.7)$$

čia α_{ds1} , α_{ds2} – koeficientai, priklausantys nuo cemento rūšies, parenkami pagal 4 lentelę;

f_{cm} – vidutinis gniuždomasis stipris, C30/37 klasei lygus $f_{cm} = 38 \text{ MPa}$;

f_{cm0} – gniuždomasis stipris lygus $f_{cm0} = 10 \text{ MPa}$;

β_{RH} – koeficientas, priklausantis nuo aplinkos drėgmės ir apskaičiuojamas pagal 2.8 formulę [19]:

$$\beta_{RH} = 1,55 \left[1 - \left(\frac{RH}{RH_0} \right)^3 \right]; \quad (2.8)$$

čia RH – esamas aplinkos drėgnis (mūsų atveju – 50 proc.);

RH_0 – 100 proc. aplinkos drėgmė.

4 lentelė. Koeficientų α_{ds1} ir α_{ds2} reikšmės pagal *Eurkodą 2* [1]

Koeficiento žymuo	S klasė	N klasė	R klasė
α_{ds1}	3	4	6
α_{ds2}	0,13	0,12	0,11

Traukioji santykinė deformacija dėl džiūvimo apskaičiuojama pagal 2.9 formulę:

$$\varepsilon_{cd} = k_h \cdot \varepsilon_{cd,0}; \quad (2.9)$$

čia k_h – koeficientas, priklausantis nuo tariamojo dydžio h_0 ir parenkamas pagal 5 lentelę. Mūsų atveju būtų $k_h \approx 0,85$.

5 lentelė. Koeficiento k_h reikšmė pagal *Eurokodą 2* [1]

Tariamasis dydis h_0 , mm	Koeficientas k_h
100	1,0
200	0,85
300	0,75
≥ 500	0,70

Savaiminio traukumo deformacija apskaičiuojama pagal 2.10 formulę [1], [20]:

$$\varepsilon_{ca} = \beta_{as}(t) \cdot \varepsilon_{ca}(\infty); \quad (2.10)$$

čia $\beta_{as}(t)$ – koeficientas, apskaičiuojamas pagal 2.11 lygtį [1], [20]:

$$\beta_{as}(t) = 1 - \exp(-0,2 \cdot t^{0.5}); \quad (2.11)$$

čia t – laikas, matuojamas dienomis.

$\varepsilon_{ca}(\infty)$ – galutinė savaiminio traukumo deformacija, apskaičiuojama pagal 2.12 lygtį:

$$\varepsilon_{ca}(\infty) = 2,5 \cdot (f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6}; \quad (2.12)$$

Armatūros skerspjūvio ploto statinis momentas aplink skerspjūvio sunkio centrą (supleišėjusiam skerspjūviui), apskaičiuojamas pagal 2.13 formulę:

$$S_c = A_s \cdot (d - x); \quad (2.13)$$

Elemento kreivis, susidarantis nuo traukumo džiūvimo metu (supleišėjusiam skerspjūviui), apskaičiuojamas pagal 2.14 formulę:

$$\frac{1}{r_{cs,c}} = \varepsilon_{cs} \cdot \alpha_e \cdot \frac{S_c}{I_{cc}}; \quad (2.14)$$

Armatūros skerspjūvio ploto statinis momentas aplink skerspjūvio sunkio centrą (nesupleišėjusiam skerspjūviui), apskaičiuojamas pagal 2.15 formulę:

$$S_{un} = A_s \cdot (d - x) = A_s \cdot \left(d - \frac{h}{2}\right); \quad (2.15)$$

Elemento kreivis, susidarantis nuo traukumo džiūvimo metu (nesupleišėjusiam skerspjūviui), apskaičiuojamas pagal 2.16 formulę:

$$\frac{1}{r_{cs,un}} = \varepsilon_{cs} \cdot \alpha_e \cdot \frac{S_{un}}{I_{un}}; \quad (2.16)$$

Vidutinis sijos kreivis dėl traukumo džiūvimo metu, apskaičiuojamas pagal 1.1.6 lygtį:

$$\frac{1}{r_2} = \zeta \frac{1}{r_{cr,c}} + (1 - \zeta) \frac{1}{r_{uc,un}};$$

Suminis sijos kreivis, apskaičiuojamas pagal 2.17 formulę:

$$\frac{1}{r_{sum}} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}; \quad (2.17)$$

Elemento įlinkis jo viduryje, apskaičiuojamas pagal 2.18 formulę:

$$d = \frac{5}{48} \cdot l_s^2 \cdot \frac{1}{r_{sum}}; \quad (2.18)$$

Eurokodo 2 ir Statybos techninio reglamento palyginimui, galime pasiskaičiuoti pleišėjimo momentą, kai žinome sijos skerspjūvio atsparumo momentą ir pagal STR nustatytą betono stiprį, mūsų pasirinktai betono klasei. Pleišėjimo momentas, pagal STR apskaičiuojamas pagal 2.19 lygtį [2]:

$$M_{cr} = 1,75 \cdot W_{eff} \cdot f_{ctk,0.05} = 1,75 \cdot \frac{350 \cdot 450^2}{6} \cdot 2 = 41,344 \cdot 10^6 Nmm = 41,344 kNm; \quad (2.19)$$

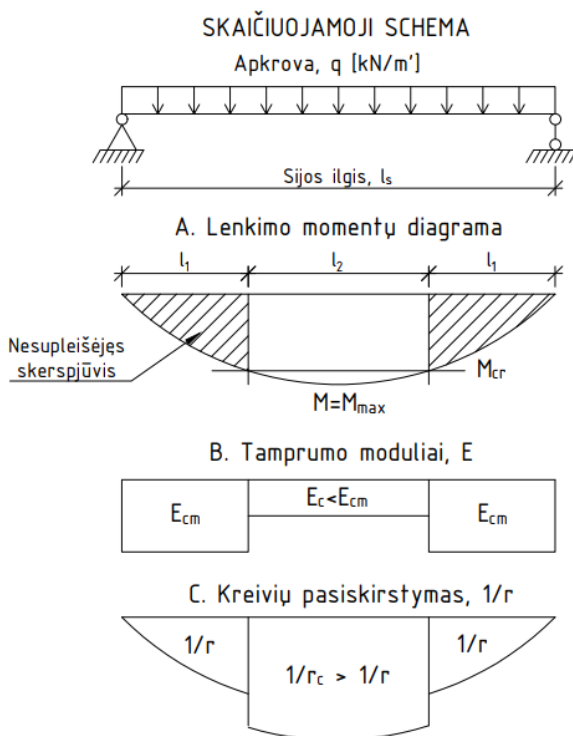
Palyginame gautus pleišėjimo momentus naudojant skirtingas normas:

$$M_{cr,EC2} = 34,256 kNm < M_{cr,STR} = 41,344 kNm$$

Gauname, kad skaičiuojant pagal STR yra didesnis teorinis pleišėjimo momentas.

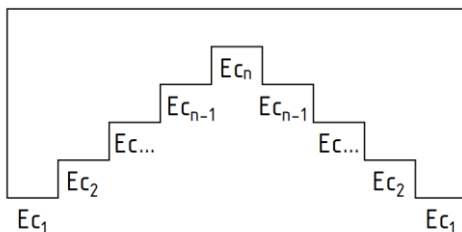
3. Lenkiamo elemento įlinkio skaičiavimas įvertinant supleišėjusius ruožus

Šiame skyriuje bus naudojami 2 skyriuje pateikti duomenys. Skaičiavimuose naudosime 5 paveiksle pateiktą skaičiuojamąją schemą. Lenkimo momentų diagramoje (5 pav., A) išskiriame tris zonas – dvi iš jų nuo atramų, kur skerspjūvis nesupleišėjęs, o per vidurį trečioji – supleišėjusi zona. Nesupleišėjusioms zonoms priskirsime $E_{c,eff} = E_{cm} = 33 \text{ MPa}$ esamą tamprumo modulį, o nagrinėdami supleišėjusią zoną priimsime, kad tamprumo momentas sumažėja - $E_c < E_{cm} = 33 \text{ MPa}$. Tuo tarpu, sijos įlinkius skaičiuojant nuo atramos link sijos vidurio priimsime (l_1 elemento ilgyje), kad atitiks apskaičiuotą nuo lenkimo momento, o l_2 elemento ilgyje (supleišėjusi zona) priimsime didesnius, dėl atsivėrusių plyšių. Viso šio skaičiavimo pagrindinis tikslas yra surasti tamprumo momentų kitimą priklausomai nuo lenkimo momento ir pleišėjimo momento santykio (M/M_{cr}).



5 pav. Skaičiavimuose naudojama skaičiuojamoji schema

Tamprumo modulių pasiskirstymas,
kai yra n ruožų



6 pav. Tamprumų modulių pasiskirstymo schema, kai skaičiuojama, elementą padalijus į daugiau nei tris ruožus

Šiame skyriuje bus siekiama įvertinti nesupleišėjusias ir supleišėjusias elemento zonas. Jog tai galėtume padaryti, pirmiausia užsiduodame, koks bus supleišėjusios zonos ilgis, vėliau šią zoną

didinsime, ir žiūrėsime, kaip keičiasi tamprumo modulis ir vidutiniai įtempiai. Taip pat, elemento įlinkis bus apskaičiuojamas pagal integralinę išraišką, sudaryta pagal 1.2.18 formulę:

$$d = 2 \cdot \left[\int_0^{l_1} \bar{M} \cdot \left(\frac{1}{r}\right)_x dx + \int_{l_1}^{l_s/2} \bar{M} \cdot \left(\frac{1}{r}\right)_x dx \right]; \quad (3.1)$$

čia \bar{M} – lenkimo momentas, veikiantis elementą nuo vienetinės jėgos;

$\left(\frac{1}{r}\right)_x$ – kreivis elemento ruože x, apskaičiuojamas pagal 3.2 formulę:

$$\left(\frac{1}{r}\right)_x = \frac{M_x}{E_c \cdot I}; \quad (3.2)$$

čia M_x – lenkimo momentas nagrinėjame ruože;

E_c – betono tamprumo modulis, kuris ruože nuo 0 iki l_1 priimamas lygus E_{cm} , kitu atveju – apskaičiuojamas naudojant priartėjimo metodą.

Naudojant 3.2 formulę, galima surasti išraišką, pagal kurią apskaičiuojamas lenkimo momentas:

$$M_x = \frac{q \cdot l_s}{2} \cdot l_1 - \frac{q \cdot l_1^2}{2} = \frac{q}{2} \cdot (l_s \cdot l_1 - l_1^2); \quad (3.3)$$

čia q – tolygiai išskirstyta apkrova, veikianti nagrinėjamą elementą;

l_s – nagrinėjamo elemento ilgis;

l_1 – nesupleišėjusios zonos ilgis pagal 3.6 formulę.

Tuomet sujungus 3.2 ir 3.3 išraiškas gauname naują kreivio formulę:

$$\left(\frac{1}{r}\right)_x = \frac{q}{2 \cdot E_c \cdot I} \cdot (l_s \cdot l_1 - l_1^2); \quad (3.4)$$

Tamprumo modulis gali būti apskaičiuojamas naudojant 3.5 formulę:

$$E_c = \frac{s \cdot M \cdot l_s^2}{(d - d_{un}) \cdot I_{un}}; \quad (3.5)$$

čia s – dydis, kai turime dviatramę siją su tolygiai išskirstyta apkrova lygus $s = \frac{5}{48}$;

d – suminis elemento įlinkis pagal 2.1.18 formulę;

d_{un} – nesupleišėjusios zonos įlinkis, apskaičiuojamas pagal 3.7 formulę;

I_{un} – nesupleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas pagal 2.2 formulę.

Nesupleišėjusios zonos ilgis apskaičiuojamas pagal 3.6 formulę:

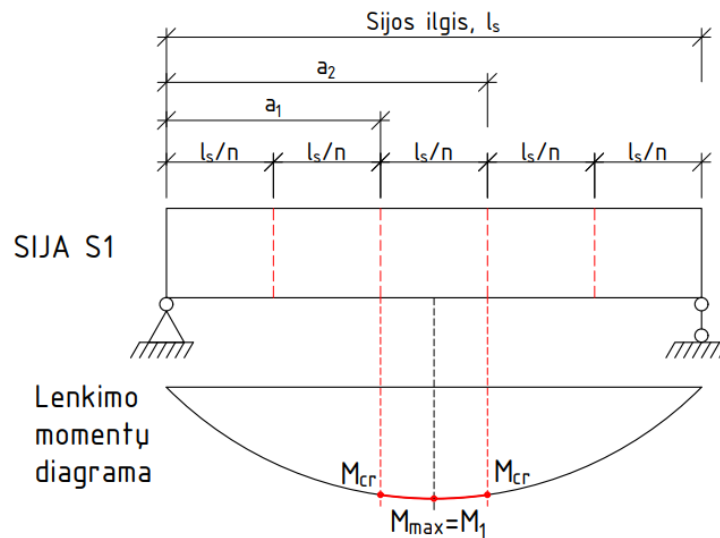
$$l_1 = \frac{l_s - l_2}{2}; \quad (3.6)$$

čia l_2 – užsiduotas nagrinėjamos supleišėjusios zonos ilgis.

Nesupleišėjusios zonos įlinkis gali būti apskaičiuojamas naudojant integralinę formulę:

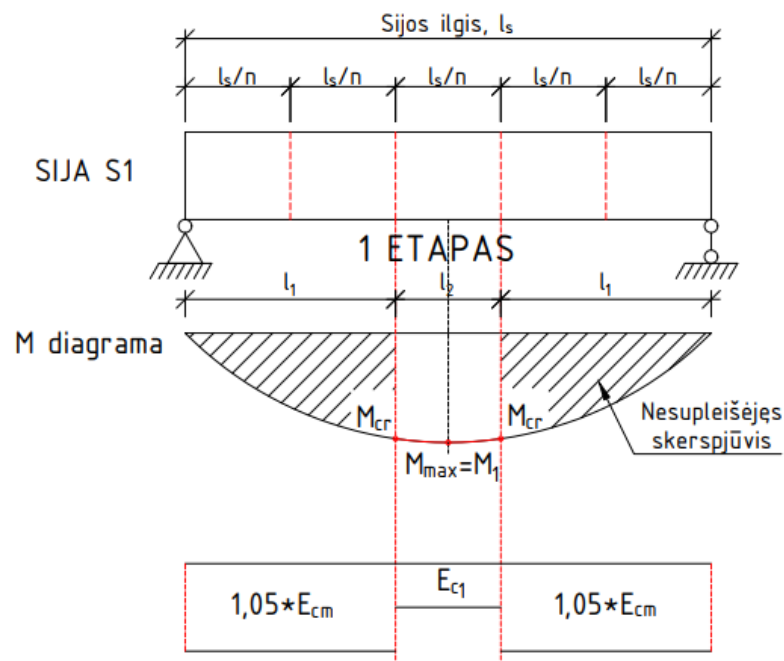
$$d_{un} = \int_0^{l_1} \bar{M} \cdot \left(\frac{1}{r}\right)_x dx; \quad (3.7)$$

Sudalinus siją į n dalių, gauname patikslinta skaičiavimo schemą, kuri pavaizduota 7 paveiksle.



7 pav. Skaičiavimo schema su sijos sudalinimu į zonas

Pirmame etape, kai jau turime pasiskaičiavę sijos pleišėjimo momentą (žr. 2 skyrių) pasirenkame, kad siją dalinsime į 5 dalis ($n = 5$). Pirmojo etapo schema pavaizduota 8 paveiksle.



8 pav. Pirmajame etape priimta skaičiavimo schema

Tamprumo modulį galime iš įlinkio formulės, nes esame apsiskaičiavę suminį sijos įlinkį 2 skyriuje. Tuomet liks tik vienas nežinomasis – mūsų ieškomas tamprumo modulis supleišėjusioje zonoje E_{c1} . Patogiausia naudotis 3.1 įlinkio formulę lygties sudarymui:

$$d = 2 \cdot \left[\int_0^{l_1} \left(\frac{1}{r}\right)_x \cdot \bar{M} \cdot dx + \int_{l_1}^{l_s/2} \left(\frac{1}{r}\right)_x \cdot \bar{M} \cdot dx \right];$$

Šią išraišką galime patobulinti vietoje kreivio įstatant 3.4 formulę:

$$d = 2 \cdot \left[\int_0^{l_1} \frac{q_i \cdot ((l_s \cdot x) - x^2)}{2 \cdot 1,05 \cdot E_{cm} \cdot l_{uc}} \cdot (0,5x) \cdot dx + \int_{l_1}^{l_s/2} \frac{q_i \cdot ((l_s \cdot x) - x^2)}{2 \cdot E_c \cdot l_{cc}} \cdot (0,5x) \cdot dx \right]; \quad (3.8)$$

Užsидуodame, kelias sąlygas, kad galėtume išsivesti tamprumo modulio formulę i-tojoje zonoje:

1. žinomą betono tamprumo modulį žymėsime $E_c = 1,05 \cdot E_{cm} = 1,05 \cdot 33 = 34,65 \text{ GPa}$;
2. ieškomą tamprumo modulį i-tojoje zonoje žymėsime E_i ;
3. įlinkį, prie kurio skaičiuojamas tamprumo modulis žymėsime d_i ;
4. išskirstyto krūvio apkrovą, prie kurios skaičiuojamas tamprumo modulis žymėsime q_i ;
5. skaičiuojamasis sijos ilgis (tarpatramis) bus žymimas $L = l_s$;
6. atstumas nuo atramos, kuriam esant skaičiuojamas tamprumo modulis bus žymimas l_i .

Tuomet suintegruojame 3.8 išraišką pagal užsидуotas sąlygas gauname:

$$d_i = \frac{q_i}{2 \cdot E_c \cdot l_{uc}} \cdot \int_0^{l_i} (L \cdot x^2 - x^3) dx + \frac{q_i}{2 \cdot E_i \cdot l_i} \cdot \int_{l_i}^{L/2} (L \cdot x^2 - x^3) dx = \frac{q_i}{2 \cdot E_c \cdot l_{uc}} \left(\frac{L \cdot x^3}{3} - \frac{x^4}{4} \right) \Big|_0^{l_i} +$$

$$\frac{q_i}{2 \cdot E_i \cdot l_i} \left(\frac{L \cdot x^3}{3} - \frac{x^4}{4} \right) \Big|_{l_i}^{L/2} = \frac{q_i}{2 \cdot E_c \cdot l_{uc}} \cdot \left(\frac{L \cdot l_i^3}{3} - \frac{l_i^4}{4} \right) + \frac{q_i}{2 \cdot E_i \cdot l_i} \left[\left(\frac{L^4}{24} - \frac{L^4}{64} \right) - \left(\frac{L \cdot l_i^3}{3} - \frac{l_i^4}{4} \right) \right];$$

$$\frac{q_i}{2 \cdot E_i \cdot l_i} \left(\frac{5L^4}{192} - \frac{L \cdot l_i^3}{3} + \frac{l_i^4}{4} \right) = d_i - \frac{q_i}{2 \cdot E_c \cdot l_{uc}} \cdot \left(\frac{L \cdot l_i^3}{3} - \frac{l_i^4}{4} \right);$$

$$E_i \cdot I_i = \frac{q_i \cdot \left(\frac{5L^4}{192} - \frac{L \cdot l_i^3}{3} + \frac{l_i^4}{4} \right)}{2 \cdot \left(d_i - \frac{q_i}{2 \cdot E_c \cdot l_{uc}} \cdot \left(\frac{L \cdot l_i^3}{3} - \frac{l_i^4}{4} \right) \right)};$$

Taip pat, susidarome naują integralą, kai siją yra suskirstyta į tris zonas:

$$d = 2 \cdot \left[\int_0^{l_1} \frac{q_i \cdot (Lx - x^2)}{2 \cdot E_c \cdot l_{uc}} \cdot 0,5x \cdot dx + \int_{l_1}^{l_2} \frac{q_i \cdot (Lx - x^2)}{2 \cdot E_{i-1} \cdot l_{cc}} \cdot 0,5x \cdot dx + \int_{l_2}^{L/2} \frac{q_i \cdot (Lx - x^2)}{2 \cdot E_i \cdot l_{cc}} \cdot 0,5x \cdot dx \right]; \quad (3.9)$$

Suintegruojame 3.9 išraišką pagal užsiduotas sąlygas gauname:

$$d_i = \frac{q_i}{2 \cdot E_c \cdot l_{uc}} \cdot \int_0^{l_1} (L \cdot x^2 - x^3) dx + \frac{q_i}{2 \cdot E_{i-1} \cdot l_1} \cdot \int_{l_1}^{l_2} (L \cdot x^2 - x^3) dx + \frac{q_i}{2 \cdot E_i \cdot l_2} \cdot \int_{l_2}^{L/2} (L \cdot x^2 - x^3) dx =$$

$$\frac{q_i}{2 \cdot E_c \cdot l_{uc}} \cdot \left[\frac{L \cdot l_1^3}{3} - \frac{l_1^4}{4} \right] + \frac{q_i}{2 \cdot E_{i-1} \cdot l_1} \cdot \left[\frac{L \cdot l_2^3}{3} - \frac{l_2^4}{4} - \frac{L \cdot l_1^3}{3} + \frac{l_1^4}{4} \right] + \frac{q_i}{2 \cdot E_i \cdot l_2} \cdot \left[\frac{L^3}{48} - \frac{L \cdot l_2^3}{3} + \frac{l_2^4}{4} \right];$$

$$E_i \cdot I_2 = \frac{q_i \cdot \left(\frac{5L^4}{192} - \frac{L \cdot l_2^3}{3} + \frac{l_2^4}{4} \right)}{2 \cdot \left(d_i - \frac{q_i}{2 \cdot E_c \cdot l_{uc}} \cdot \left(\frac{L \cdot l_1^3}{3} - \frac{l_1^4}{4} \right) - \frac{q_i}{2 \cdot E_{i-1} \cdot l_1} \cdot \left(\frac{L \cdot l_2^3}{3} - \frac{l_2^4}{4} - \frac{L \cdot l_1^3}{3} + \frac{l_1^4}{4} \right) \right)};$$

Pagal 3.8 ir 3.9 išraiškas galime išsivesti E_i formulę, kuri būtų universali skaičiuojant, kai siją sudalinta į n ruožų:

$$E_i = \frac{\frac{5 \cdot L^4}{192} - \frac{L \cdot l_1^3}{3} + \frac{l_1^4}{4}}{\frac{2 \cdot l \cdot d_i}{q_i} - \frac{1}{E_c} \left(\frac{L \cdot l_1^3}{3} - \frac{l_1^4}{4} \right) - \sum_{j=1}^{i-1} \left(\frac{L \cdot l_{j+1}^3}{3} - \frac{l_{j+1}^4}{4} - \frac{L \cdot l_j^3}{3} + \frac{l_j^4}{4} \right) \cdot \frac{1}{E_j}}; \quad (3.10)$$

Patikriname ar formulė veikia teisingai, kai skerspjūvis nesupleišėjęs ir kai $l_1 = L = 6 \text{ m}$. Gautas rezultatas turėtų sutapti su esamu tamprumo moduliu betone. Šiame skaičiavime naudosime 2 skyriuje apskaičiuotą nesupleišėjusios dalies įlinkį, kuris lygus $d_{un} = 1,649 \text{ mm}$.

Iš 3.10 formulės panaikiname supleišėjusią zoną nagrinėjančią dalį:

$$E_{cm}' = \frac{\frac{5 \cdot L^4}{192} - \frac{L \cdot l_1^3}{3} + \frac{l_1^4}{4}}{\frac{2 \cdot l_{un} \cdot d_{un}}{q_1} - \frac{1}{E_{cm}} \left(\frac{L \cdot l_1^3}{3} - \frac{l_1^4}{4} \right)} = \frac{\frac{5 \cdot 6^4}{192} - \frac{6 \cdot 6^3}{3} + \frac{6^4}{4}}{\frac{2 \cdot 26,578 \cdot 10^{-4} \cdot 1,649 \cdot 10^{-3}}{9 \cdot 10^3} - \frac{1}{34,65 \cdot 10^9} \left(\frac{6 \cdot 6^3}{3} - \frac{6^4}{4} \right)} = 34,65 \cdot 10^9 \text{ Pa}; \quad (3.11)$$

$$E_{cm} = 1,05 \cdot 33 \cdot 10^9 = 34,65 \text{ GPa} = E_{cm}' = 34,65 \text{ GPa};$$

Išvada: gauname apskaičiuotą betono tamprumo modulį lygų pasirinktam tamprumo moduliui E_{cm} , todėl galime teigti, jog formulė išvesta teisingai.

Pradėdami sijos tamprumo modulį skaičiavimą, kai jau nusistatome į kiek dalių ji bus dalinama, reikia apskaičiuoti nagrinėjamo ruožo ilgį:

$$a = \frac{L}{n} = \frac{6}{5} = 1,2 \text{ m}; \quad (3.12)$$

čia L – sijos ilgis;

n – priimtas sijos sudalinimo į zonas skaičius.

Apskaičiuojame, kiek skirtingų tamprumo modulį reikės nagrinėti:

$$i = \frac{n-1}{2} = \frac{5-1}{2} = 2; \quad (3.13)$$

čia n – priimtas sijos sudalinimo į zonas skaičius.

Pirmajame etape nesupleišėjusios zonos ilgis, kai $i = 1$ lygus:

$$l_1 = \frac{a \cdot (n-i)}{2} = \frac{1,2 \cdot (5-1)}{2} = 2,4 \text{ m}; \quad (3.14)$$

čia a – vieno nagrinėjamo ruožo ilgis, apskaičiuotas pagal 3.12 formulę;

n – priimtas sijos sudalinimo į zonas skaičius.

Skaičiavimai tampa paprastesni, kai iš anksto surandame sijoje nagrinėjamą zoną ir jai apskaičiuojame lenkimo momento dydį M , prie kurio nagrinėjamoje zonoje sutaptų pleišėjimo momento M_{cr} vieta. Ši vieta pavaizduota 8 paveiksle. Apskaičiuojame apkrovą pirmajai zonai:

$$q_1 = \frac{2 \cdot M_{cr}}{L \cdot l_1 - l_1^2} = \frac{2 \cdot 34,256}{6 \cdot 2,4 - 2,4^2} = 7,93 \text{ kN/m}; \quad (3.15)$$

čia M_{cr} – pleišėjimo momentas, apskaičiuotas pagal 2.4 formulę;

L – sijos ilgis tarp atramų;

l_1 – nesupleišėjusios zonos ilgis, apskaičiuotas pagal 3.14 formulę.

Apskaičiuojame naują lenkimo momentą pagal 2.1 formulę, tačiau naudosime 3.15 formulę apskaičiuotą apkrovos dydį:

$$M_1 = \frac{q_1 \cdot L^2}{8} = \frac{7,93 \cdot 6^2}{8} = 35,685 \text{ kNm};$$

Elemento įlinkis nuo naujai apskaičiuoto lenkimo momento:

$$d_{el,1} = \frac{5}{48} \cdot \frac{M_1 \cdot L^2}{E_{cm} \cdot I_{uc}} = \frac{5}{48} \cdot \frac{35,685 \cdot 10^3 \cdot 6^2}{34,65 \cdot 10^9 \cdot 26,578 \cdot 10^{-4}} = 1,459 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 1,459 \text{ mm}; \quad (3.16)$$

čia E_{cm} – betono tamprumo modulis;

I_{uc} – nesupleišėjusios dalies inercijos momentas.

Pirmajam ruožui apskaičiuojamas elemento kreivis nesupleišėjusiai zonai:

$$\frac{1}{r_{uc,1}} = \frac{M_1}{E_{cm} \cdot I_{uc}} = \frac{35,685 \cdot 10^3}{34,65 \cdot 10^9 \cdot 26,578 \cdot 10^{-4}} = 3,875 \cdot 10^{-4} \frac{1}{m}; \quad (3.17)$$

Apskaičiuojamas elemento kreivis supleišėjusiai zonai:

$$\frac{1}{r_{cr,1}} = \frac{M_1}{E_{cm} \cdot I_{cr}} = \frac{35,685 \cdot 10^3}{34,65 \cdot 10^9 \cdot 4,309 \cdot 10^{-4}} = 2,390 \cdot 10^{-3} \frac{1}{m}; \quad (3.18)$$

Apskaičiuojamas pasiskirstymo koeficientas:

$$\zeta_1 = 1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_1} \right)^2 = 1 - \left(\frac{34,256}{35,685} \right)^2 = 0,0785; \quad (3.19)$$

Apskaičiuojamas naujas elemento įlinkis nagrinėjamoje zonoje:

$$d_1 = \left(\zeta_1 \cdot \frac{1}{r_{cr,1}} + (1 - \zeta_1) \cdot \frac{1}{r_{uc,1}} \right) \cdot \frac{5 \cdot L^2}{48} = (0,0785 \cdot 2,390 \cdot 10^{-3} + (1 - 0,0785) \cdot 3,875 \cdot 10^{-4}) \cdot \frac{5 \cdot 6^2}{48} = 2,043 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 2,043 \text{ mm}; \quad (3.20)$$

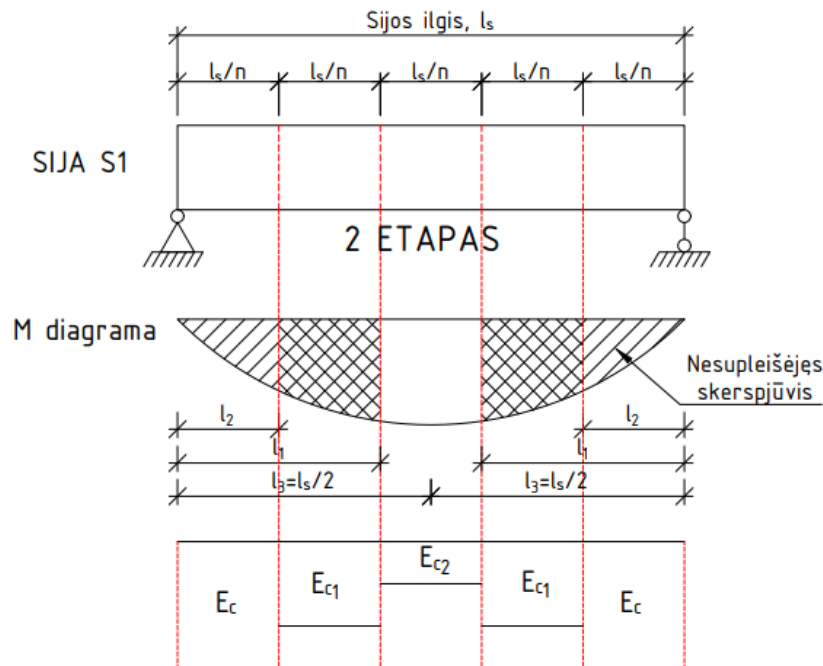
Pagal 3.10 formulę apskaičiuojamas pirmasis tamprumo modulis:

$$E_{c1} = \frac{\frac{5 \cdot L^4}{192} - \frac{L \cdot l_1^3}{3} + \frac{l_1^4}{4}}{\frac{2 \cdot I_{uc} \cdot d_1}{q_1} - \frac{1}{E_{cm}} \left(\frac{L \cdot l_1^3}{3} - \frac{l_1^4}{4} \right)} = \frac{\frac{5 \cdot 6^4}{192} - \frac{6 \cdot 2,4^3}{3} + \frac{2,4^4}{4}}{\frac{2 \cdot 26,578 \cdot 10^{-4} \cdot 2,043 \cdot 10^{-3}}{7,93 \cdot 10^3} - \frac{1}{34,65 \cdot 10^9} \left(\frac{6 \cdot 2,4^3}{3} - \frac{2,4^4}{4} \right)} = 17,77 \cdot 10^9 \text{ Pa};$$

Apibendrinus pirmąjį etapą gavome:

- tamprumo modulis lygus $E_{c1} = 17,77 \text{ GPa}$;
- lenkimo momentas lygus $M_1 = 35,685 \text{ kNm}$.

Gavus reikiamus dydžius galime pereiti prie antrojo etapo, kuriame ieškosime jau antrojo tamprumo modulio. Skaičiavimo schema pateikta 9 paveiksle.



9 pav. Antrajame etape priimta skaičiavimo schema

Antrajame etape nesupleišėjusios zonos ilgis pagal 3.14 formulę:

$$l_2 = \frac{a \cdot (n-i)}{2} = \frac{1,2 \cdot (5-2)}{2} = 1,8 \text{ m};$$

čia a – vieno nagrinėjamo ruožo ilgis, apskaičiuotas pagal 3.12 formulę.

n – priimtas sijos sudalinimo į zonas skaičius.

Apskaičiuojame apkrovą antrajai zonai, pagal 3.15 formulę:

$$q_2 = \frac{2 \cdot M_{cr}}{L \cdot l_2 - l_2^2} = \frac{2 \cdot 34,256}{6 \cdot 1,8 - 1,8^2} = 9,062 \text{ kN/m};$$

čia l_2 – nagrinėjamas zonos ilgis antrajame etape, apskaičiuotas pagal 3.14 formulę.

Apskaičiuojame naują lenkimo momentą, kuris atsiranda nuo q_2 apkrovos pagal 2.1 formulę:

$$M_2 = \frac{q_2 \cdot L^2}{8} = \frac{9,062 \cdot 6^2}{8} = 40,779 \text{ kNm};$$

Elemento įlinkis nuo M_2 lenkimo momento, pagal 3.16 formulę:

$$d_{el,2} = \frac{5}{48} \cdot \frac{M_2 \cdot L^2}{E_{cm} \cdot I_{uc}} = \frac{5}{48} \cdot \frac{40,779 \cdot 10^3 \cdot 6^2}{34,65 \cdot 10^9 \cdot 26,578 \cdot 10^{-4}} = 1,661 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 1,661 \text{ mm};$$

Antrajam ruožui apskaičiuojamas elemento kreivis nesupleišėjusiai zonai pagal 3.17 formulę:

$$\frac{1}{r_{uc,2}} = \frac{M_2}{E_{cm} \cdot I_{uc}} = \frac{40,779 \cdot 10^3}{34,65 \cdot 10^9 \cdot 26,578 \cdot 10^{-4}} = 4,428 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{m}};$$

Apskaičiuojamas elemento kreivis supleišėjusiai zonai pagal 3.18 formulę:

$$\frac{1}{r_{cr,2}} = \frac{M_2}{E_{cm} \cdot l_{cr}} = \frac{40,779 \cdot 10^3}{34,65 \cdot 10^9 \cdot 4,309 \cdot 10^{-4}} = 2,731 \cdot 10^{-3} \frac{1}{m};$$

Apskaičiuojamas pasiskirstymo koeficientas pagal 3.19 formulę:

$$\zeta_2 = 1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_2} \right)^2 = 1 - \left(\frac{34,256}{40,779} \right)^2 = 0,294;$$

Apskaičiuojamas naujas elemento įlinkis nagrinėjamoje zonoje pagal 3.20 formulę:

$$d_2 = \left(\zeta_2 \cdot \frac{1}{r_{cr,2}} + (1 - \zeta_2) \cdot \frac{1}{r_{uc,2}} \right) \cdot \frac{5 \cdot L^2}{48} = (0,294 \cdot 2,731 \cdot 10^{-3} + (1 - 0,294) \cdot 4,428 \cdot 10^{-4}) \cdot \frac{5 \cdot 6^2}{48} = 4,183 \cdot 10^{-3} m = 4,183 mm;$$

Pagal 3.10 formulę apskaičiuojamas antrasis tamprumo modulis:

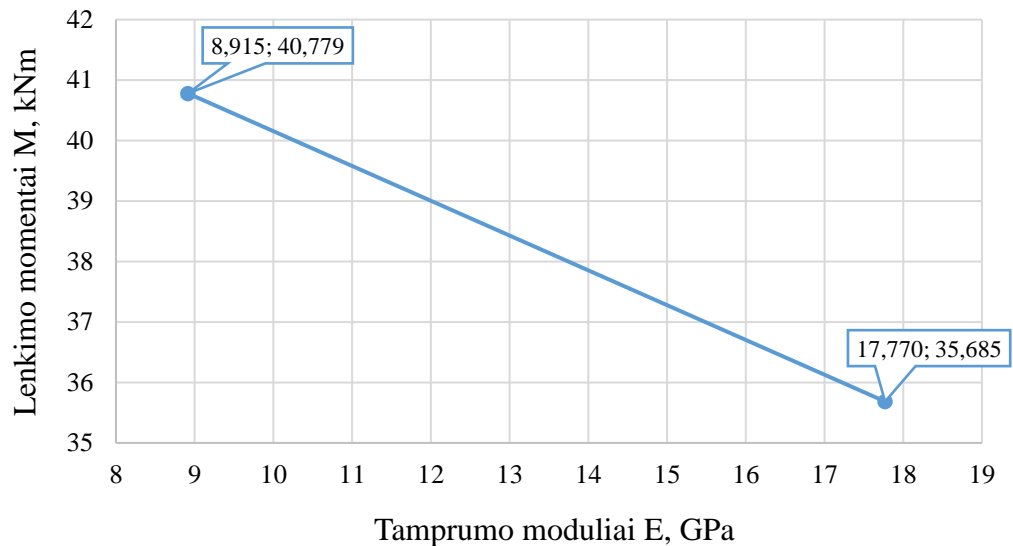
$$E_{c2} = \frac{\frac{5 \cdot L^4}{192} - \frac{L \cdot l_1^3}{3} + \frac{l_1^4}{4}}{\frac{2 \cdot l_{uc} \cdot d_2}{q_2} - \frac{1}{E_{cm}} \left(\frac{L \cdot l_2^3}{3} - \frac{l_2^4}{4} \right) - \sum_{j=1}^{i-1} \left(\frac{L \cdot l_{j+1}^3}{3} - \frac{l_{j+1}^4}{4} - \frac{L \cdot l_j^3}{3} + \frac{l_j^4}{4} \right) \cdot \frac{1}{E_{c1}}} =$$

$$= \frac{\frac{5 \cdot 6^4}{192} - \frac{6 \cdot 2,4^3}{3} + \frac{2,4^4}{4}}{\frac{2 \cdot 26,578 \cdot 10^{-4} \cdot 4,183 \cdot 10^{-3}}{9,062 \cdot 10^3} - \frac{1}{34,65 \cdot 10^9} \left(\frac{6 \cdot 1,8^3}{3} - \frac{1,8^4}{4} \right) - \left(\frac{6 \cdot 2,4^3}{3} - \frac{2,4^4}{4} - \frac{6 \cdot 1,8^3}{3} + \frac{1,8^4}{4} \right) \cdot \frac{1}{17,77 \cdot 10^9}} = 8,915 \cdot 10^9 Pa;$$

Apibendrinus abu etapus gauname:

- atkarpoje l_1 tamprumo modulis lygus $E_{c1} = 17,77 GPa$;
- atkarpoje l_1 lenkimo momentas lygus $M_1 = 35,685 kNm$;
- atkarpoje l_2 tamprumo modulis lygus $E_{c2} = 8,915 GPa$;
- atkarpoje l_2 lenkimo momentas lygus $M_2 = 40,779 kNm$.

Šiems rezultatams nebrėžiame diagramą, jog galėtume vizualiai pamatyti tamprumo modulių kitimą. Diagrama pavaizduota 10 paveiksle. Diagramoje matome, kad didėjant lenkimo momentui, tamprumo modulis mažėja, tačiau negalime pasakyti, kaip tiksliai pasiskirsto tamprumo modulio reikšmės dėl pasirinkto per mažo sijos sudalinimo.



10 pav. Tamprumo modulių ir lenkimo momentų priklausomybės diagrama, kai siją sudaliname į 5 nagrinėjamus ruožus

Turint tamprumo modulių ir lenkimo momentų reikšmes galime apskaičiuoti vidutinius įtempius, tik reikia išsireikšti formulę. Naudojantis elemento kreivio formule, galima sudaryti išraišką, pagal kurią nesunkiai apskaičiuosime norimas deformacijas. Iš Huko dėsnio [21] žinome proporcingumo sąlygą:

$$\sigma = \varepsilon \cdot E; \quad (3.20)$$

čia ε – elemento vidutinės deformacijos;

E – nagrinėjamame ruože apskaičiuotas tamprumo modulis.

Tačiau šiuos įtempius galime išreikšti ir pagal atsparumo momentą:

$$\sigma = \frac{M}{W}; \quad (3.21)$$

čia M – lenkimo momentas;

W – atsparumo momentas.

Galime šias dvi (3.20 ir 3.21) formules suvesti į vieną ir gautume formulę deformacijoms apskaičiuoti:

$$\varepsilon = \frac{M}{E \cdot W}; \quad (3.22)$$

Pagal 1.1.8 lygtį ir 3.20 formulę galime išreikšti naują įtempių skaičiavimui formulę:

$$\frac{1}{r} = \frac{M}{E \cdot I} = \frac{M}{E \cdot (W \cdot 0,5 \cdot h)} = \frac{M}{E \cdot W} \cdot \frac{h}{2} = \varepsilon \cdot \frac{h}{2};$$

$$\sigma = \frac{1}{r} \cdot \frac{h}{2} \cdot E;$$

$$\sigma = \frac{1}{r_{un,i}} \cdot x_i \cdot E_{ci}; \quad (3.23)$$

čia x – gniuždomos zonos aukštis, apskaičiuotas pagal 2.3 formulę;

$\frac{1}{r_{un,i}}$ – nesupleišėjusio skerspjūvio elemento kreivis i -tajame nagrinėjamame ruože;

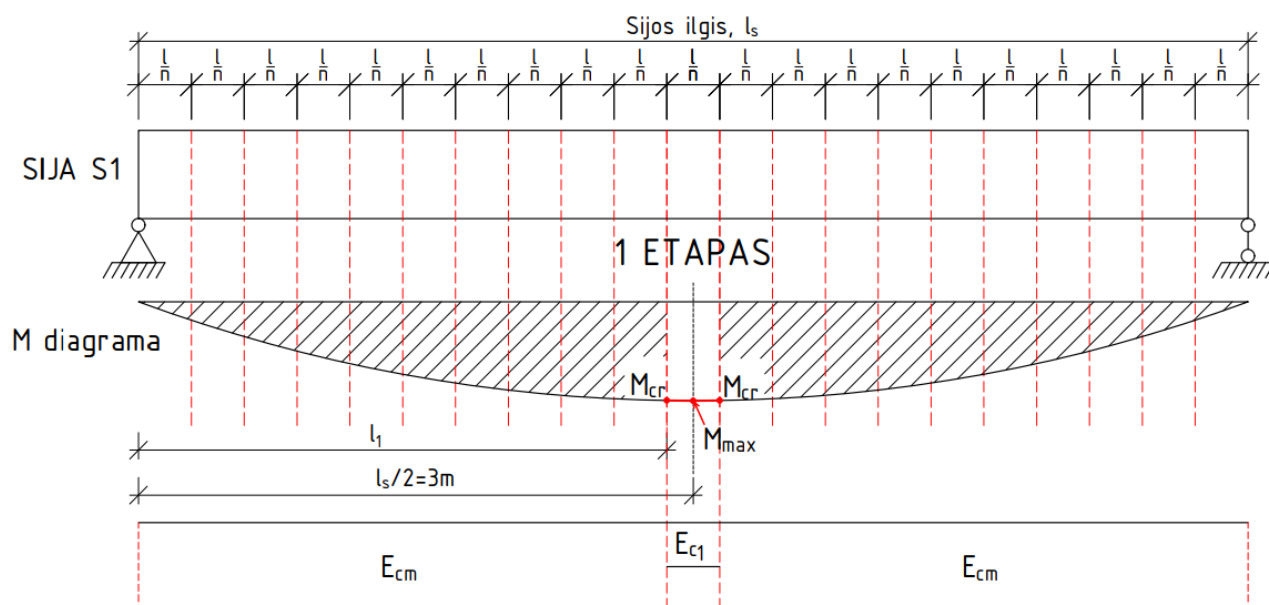
E_{ci} – redukuotas deformacijų modulis nagrinėjamame ruože.

Apskaičiuojame elemento vidutinius įtempius kiekviename ruože pagal 3.23 formulę:

$$\sigma_1 = \frac{1}{r_{un,1}} \cdot x_1 \cdot E_{c1} = 3,875 \cdot 10^{-4} \cdot 0,0951 \cdot 17,770 \cdot 10^9 = 0,655 \cdot 10^6 \text{ Pa} = 0,655 \text{ MPa}$$

$$\sigma_2 = \frac{1}{r_{un,2}} \cdot x_2 \cdot E_{c2} = 4,428 \cdot 10^{-4} \cdot 0,126 \cdot 8,915 \cdot 10^9 = 0,497 \cdot 10^6 \text{ Pa} = 0,497 \text{ MPa}$$

Norint sužinoti tikslesnį tamprumo modulio pasiskirstymą mūsų nagrinėjamoje sijoje, turime ją suskirstyti į daugiau ruožų. Pasirenkame, kad siją daliname į $n = 21$ vnt. ruožų. Nubrėžiame schemą, kaip pavaizduota 11 paveiksle, jog būtų paprasčiau suprasti skaičiavimo schemą pirmuoju etapu.



11 pav. Pirmojo etapo skaičiavimo schema, kai sija suskirstyta į 21 nagrinėjamą ruožą

Prieš pradėdant skaičiavimą, pagal 3.12 formulę apskaičiuojame kiekvieno nagrinėjamo ruožo ilgį:

$$a = \frac{L}{n} = \frac{6}{21} \approx 0,2857 \text{ m};$$

Apskaičiuojame, kiek skirtingų tamprumo modulių reikės nagrinėti pagal 3.13 formulę:

$$i = \frac{n-1}{2} = \frac{21-1}{2} = 10;$$

Pirmajame etape nesupleišėjusios zonos ilgis, kai $i = 1$, apskaičiuojamas pagal 3.14 formulę:

$$l_1 = \frac{a \cdot (n-i)}{2} = \frac{0,2857 \cdot (21-1)}{2} = 2,857 \text{ m};$$

Apskaičiuojame išskirstyto krūvio apkrovos dydį pagal 3.15 formulę, kuriam esant skaičiuosime tamprumo modulį:

$$q_1 = \frac{2 \cdot M_{cr}}{L \cdot l_1 - l_1^2} = \frac{2 \cdot 34,256}{6 \cdot 2,857 - 2,857^2} = 7,630 \text{ kN/m};$$

Apskaičiuojame naują lenkimo momentą pagal 2.1 formulę, tačiau naudosime 3.15 formulę apskaičiuotą apkrovos dydį:

$$M_1 = \frac{q_1 \cdot L^2}{8} = \frac{7,630 \cdot 6^2}{8} = 34,334 \text{ kNm};$$

Elemento įlinkis nuo naujai apskaičiuoto lenkimo momento pagal 3.16 formulę:

$$d_{el,1} = \frac{5}{48} \cdot \frac{M_1 \cdot L^2}{E_{cm} \cdot I_{uc}} = \frac{5}{48} \cdot \frac{34,334 \cdot 10^3 \cdot 6^2}{34,65 \cdot 10^9 \cdot 26,578 \cdot 10^{-4}} = 1,398 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 1,398 \text{ mm};$$

Pirmajam ruožui apskaičiuojamas elemento kreivis nesupleišėjusiai zonai pagal 3.17 formulę:

$$\frac{1}{r_{uc,1}} = \frac{M_1}{E_{cm} \cdot I_{uc}} = \frac{34,334 \cdot 10^3}{34,65 \cdot 10^9 \cdot 26,578 \cdot 10^{-4}} = 3,728 \cdot 10^{-4} \frac{1}{m};$$

Apskaičiuojamas elemento kreivis supleišėjusiai zonai pagal 3.18 formulę:

$$\frac{1}{r_{cr,1}} = \frac{M_1}{E_{cm} \cdot I_{cr}} = \frac{34,334 \cdot 10^3}{34,65 \cdot 10^9 \cdot 4,309 \cdot 10^{-4}} = 2,300 \cdot 10^{-3} \frac{1}{m};$$

Apskaičiuojamas pasiskirstymo koeficientas pagal 3.19 formulę:

$$\zeta_1 = 1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_1} \right)^2 = 1 - \left(\frac{34,256}{34,334} \right)^2 = 0,00453;$$

Apskaičiuojamas naujas elemento įlinkis nagrinėjamoje zonoje pagal 3.20 formulę:

$$d_1 = \left(\zeta_1 \cdot \frac{1}{r_{cr,1}} + (1 - \zeta_1) \cdot \frac{1}{r_{uc,1}} \right) \cdot \frac{5 \cdot L^2}{48} = (0,00453 \cdot 2,300 \cdot 10^{-3} + (1 - 0,00453) \cdot 3,728 \cdot 10^{-4}) \cdot \frac{5 \cdot 6^2}{48} = 1,431 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 1,431 \text{ mm};$$

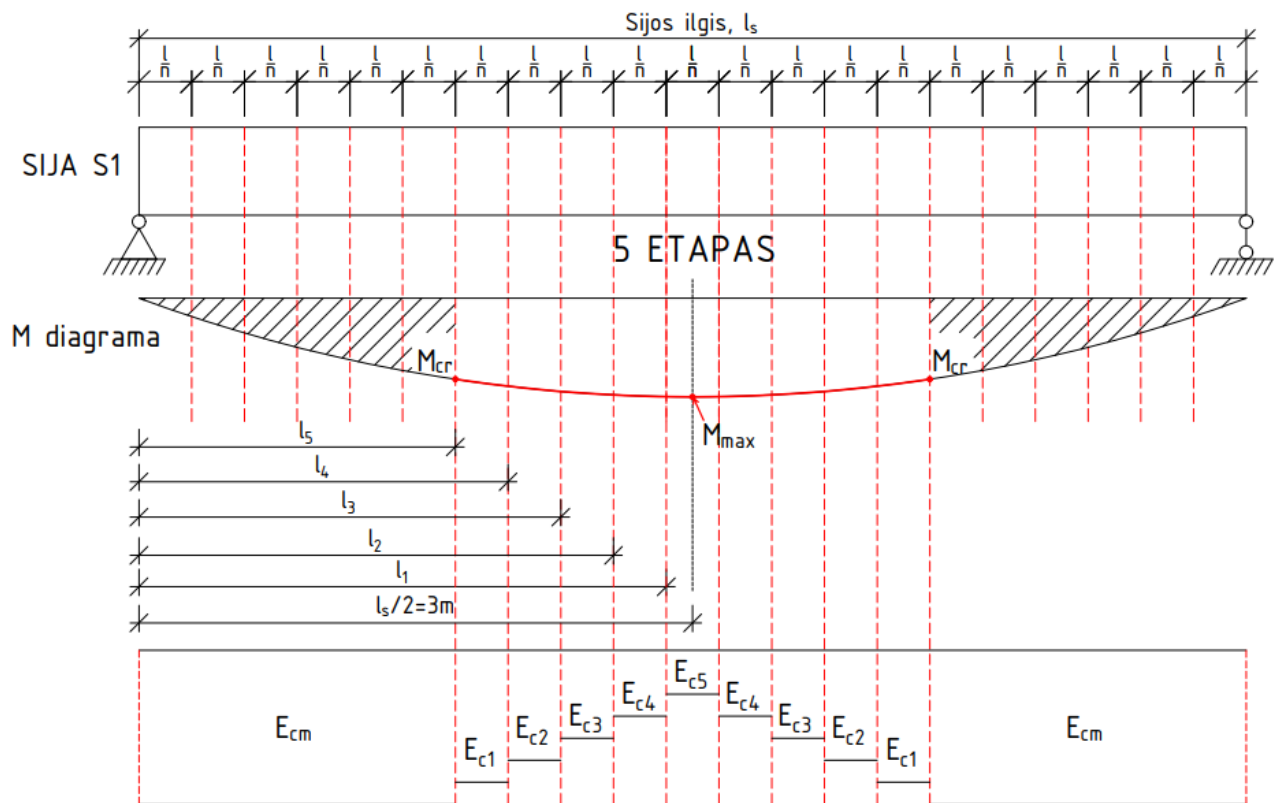
Pagal 3.10 formulę apskaičiuojamas pirmasis tamprumo modulis:

$$E_{c1} = \frac{\frac{5 \cdot L^4}{192} \cdot \frac{L \cdot l_1^3}{3} + \frac{l_1^4}{4}}{\frac{2 \cdot I_{uc} \cdot d_1}{q_1} \cdot \frac{1}{E_{cm}} \cdot \left(\frac{L \cdot l_1^3}{3} - \frac{l_1^4}{4} \right)} = \frac{\frac{5 \cdot 6^4}{192} \cdot \frac{6 \cdot 2,857^3}{3} + \frac{2,857^4}{4}}{\frac{2 \cdot 26,578 \cdot 10^{-4} \cdot 1,431 \cdot 10^{-3}}{7,630 \cdot 10^3} - \frac{1}{34,65 \cdot 10^9} \cdot \left(\frac{6 \cdot 2,857^3}{3} - \frac{2,857^4}{4} \right)} = 28,636 \cdot 10^9 \text{ Pa};$$

Apibendrinus pirmąjį etapą gavome:

- tamprumo modulis lygus $E_{c1} = 28,636 \text{ GPa}$;
- lenkimo momentas lygus $M_1 = 34,334 \text{ kNm}$.

Tarpiniai skaičiavimai nuo antrojo iki ketvirtojo ruožo pateikti 1 priede. Nauja skaičiavimo schema, kai nagrinėjamas penktasis tamprumo modulis, pavaizduota 12 paveiksle.



12 pav. Penktojo etapo skaičiavimo schema, kai sija suskirstyta į 21 nagrinėjamą ruožą

Penktajame etape nesupleišėjusios zonos ilgis pagal 3.14 formulę:

$$l_5 = \frac{a \cdot (n-i)}{2} = \frac{0,2857 \cdot (21-5)}{2} = 2,286 \text{ m};$$

Apskaičiuojame apkrovą penktajai zonai, pagal 3.15 formulę:

$$q_5 = \frac{2 \cdot M_{cr}}{L \cdot l_5 - l_5^2} = \frac{2 \cdot 34,256}{6 \cdot 2,286 - 2,286^2} = 8,070 \text{ kN/m};$$

čia l_5 – nagrinėjamos zonos ilgis penktajame etape, apskaičiuotas pagal 3.14 formulę.

Apskaičiuojame naują lenkimo momentą, kuris atsiranda nuo q_5 apkrovos pagal 2.1 formulę:

$$M_5 = \frac{q_5 \cdot L^2}{8} = \frac{8,070 \cdot 6^2}{8} = 36,315 \text{ kNm};$$

Elemento įlinkis nuo M_5 lenkimo momento, pagal 3.16 formulę:

$$d_{el,5} = \frac{5}{48} \cdot \frac{M_5 \cdot L^2}{E_{cm} \cdot I_{uc}} = \frac{5}{48} \cdot \frac{36,315 \cdot 10^3 \cdot 6^2}{34,65 \cdot 10^9 \cdot 26,578 \cdot 10^{-4}} = 1,479 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 1,479 \text{ mm};$$

Penktajam ruožui apskaičiuojamas elemento kreivis nesupleišėjusiai zonai pagal 3.17 formulę:

$$\frac{1}{r_{uc,5}} = \frac{M_5}{E_{cm} \cdot I_{uc}} = \frac{36,315 \cdot 10^3}{34,65 \cdot 10^9 \cdot 26,578 \cdot 10^{-4}} = 3,943 \cdot 10^{-4} \frac{1}{m};$$

Apskaičiuojamas elemento kreivis supleišėjusiai zonai pagal 3.18 formulę:

$$\frac{1}{r_{cr,5}} = \frac{M_5}{E_{cm} \cdot I_{cr}} = \frac{36,315 \cdot 10^3}{34,65 \cdot 10^9 \cdot 4,309 \cdot 10^{-4}} = 2,432 \cdot 10^{-3} \frac{1}{m};$$

Apskaičiuojamas pasiskirstymo koeficientas pagal 3.19 formulę:

$$\zeta_5 = 1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_5}\right)^2 = 1 - \left(\frac{34,256}{36,315}\right)^2 = 0,1102;$$

Apskaičiuojamas naujas elemento įlinkis nagrinėjamoje zonoje pagal 3.20 formulę:

$$d_5 = \left(\zeta_5 \cdot \frac{1}{r_{cr,5}} + (1 - \zeta_5) \cdot \frac{1}{r_{uc,5}}\right) \cdot \frac{5 \cdot L^2}{48} = (0,1102 \cdot 2,432 \cdot 10^{-3} + (1 - 0,1102) \cdot 3,943 \cdot 10^{-4}) \cdot \frac{5 \cdot 6^2}{48} = 2,321 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 2,321 \text{ mm};$$

Pagal 3.10 formulę apskaičiuojamas penktasis tamprumo modulis:

$$E_{c5} = \frac{\frac{5 \cdot L^4}{192} - \frac{L \cdot l_1^3}{3} + \frac{l_1^4}{4}}{\frac{2 \cdot l_{uc} \cdot d_5}{q_5} - \frac{1}{E_{cm}} \left(\frac{L \cdot l_5^3}{3} - \frac{l_5^4}{4}\right) - \sum_{j=1}^{i-1} \left(\frac{L \cdot l_{j+1}^3}{3} - \frac{l_{j+1}^4}{4} - \frac{L \cdot l_j^3}{3} + \frac{l_j^4}{4}\right) \cdot \frac{1}{E_{i-1}}};$$

Kad būtų paprasčiau skaičiuoti išskaidome šią formulę į kelias:

$$\alpha_{c5} = \frac{5 \cdot L^4}{192} - \frac{L \cdot l_1^3}{3} + \frac{l_1^4}{4} = \frac{5 \cdot 6^4}{192} - \frac{6 \cdot 2,857^3}{3} + \frac{2,857^4}{4} = 3,7625;$$

$$\beta_{c5} = \frac{2 \cdot l_{uc} \cdot d_5}{q_5} - \frac{1}{E_{cm}} \cdot \left(\frac{L \cdot l_5^3}{3} - \frac{l_5^4}{4}\right) = \frac{2 \cdot 26,578 \cdot 10^{-4} \cdot 2,321 \cdot 10^{-3}}{8,070 \cdot 10^3} - \frac{1}{34,65 \cdot 10^9} \cdot \left(\frac{6 \cdot 2,286^3}{3} - \frac{2,286^4}{4}\right) = 1,036 \cdot 10^{-9};$$

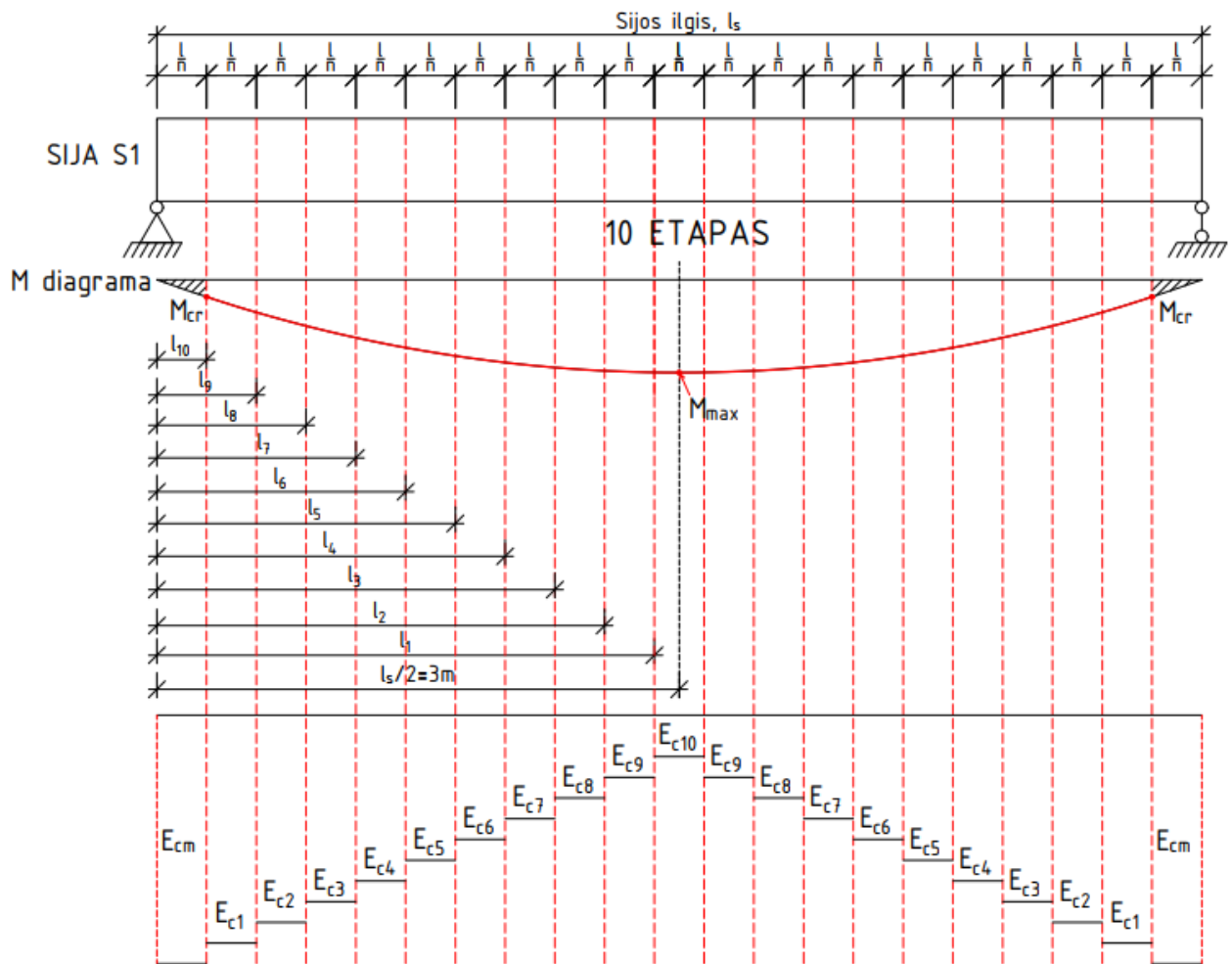
$$\gamma_{c5} = \sum_{j=1}^{i-1} \left(\frac{L \cdot l_{j+1}^3}{3} - \frac{l_{j+1}^4}{4} - \frac{L \cdot l_j^3}{3} + \frac{l_j^4}{4}\right) \cdot \frac{1}{E_{i-1}} = \left(\frac{6 \cdot 2,857}{3} - \frac{2,857^4}{4} - \frac{6 \cdot 2,714^3}{3} + \frac{2,714^4}{4}\right) \cdot \frac{1}{13,662 \cdot 10^9} + \left(\frac{6 \cdot 2,714^3}{3} - \frac{2,714^4}{4} - \frac{6 \cdot 2,571^3}{3} + \frac{2,571^4}{4}\right) \cdot \frac{1}{16,646 \cdot 10^9} + \left(\frac{6 \cdot 2,571^3}{3} - \frac{2,571^4}{4} - \frac{6 \cdot 2,429^3}{3} + \frac{2,429^4}{4}\right) \cdot \frac{1}{21,149 \cdot 10^9} + \left(\frac{6 \cdot 2,429^3}{3} - \frac{2,429^4}{4} - \frac{6 \cdot 2,286^3}{3} + \frac{2,286^4}{4}\right) \cdot \frac{1}{28,636 \cdot 10^9} = 7,107 \cdot 10^{-10};$$

$$E_{c5} = \frac{\alpha_{c5}}{\beta_{c5} - \gamma_{c5}} = \frac{3,7625}{1,036 \cdot 10^{-9} - 7,107 \cdot 10^{-10}} = 11,556 \cdot 10^9 \text{ Pa};$$

Apibendrinus penktąjį etapą gavome:

- tamprumo modulis lygus $E_{c5} = 11,556 \text{ GPa}$;
- lenkimo momentas lygus $M_5 = 36,315 \text{ kNm}$.

Tarpiniai skaičiavimai nuo antrojo iki ketvirtojo ruožo pateikti 1 priede. Nauja skaičiavimo schema, kai nagrinėjamas penktasis tamprumo modulis, pavaizduota 13 paveiksle.



13 pav. Dešimtojo etapo skaičiavimo schema, kai sija suskirstyta į 21 nagrinėjamą ruožą

Dešimtame etape nesupleišėjusios zonos ilgis pagal 3.14 formulę:

$$l_{10} = \frac{a \cdot (n-i)}{2} = \frac{0,2857 \cdot (21-10)}{2} = 1,571 \text{ m};$$

Apskaičiuojame apkrovą dešimtajai zonai, pagal 3.15 formulę:

$$q_{10} = \frac{2 \cdot M_{cr}}{L \cdot l_{10} - l_{10}^2} = \frac{2 \cdot 34,256}{6 \cdot 1,571 - 1,571^2} = 9,845 \text{ kN/m};$$

čia l_{10} – nagrinėjamas zonos ilgis dešimtame etape, apskaičiuotas pagal 3.14 formulę.

Apskaičiuojame naują lenkimo momentą, kuris atsiranda nuo q_{10} apkrovos pagal 2.1 formulę:

$$M_{10} = \frac{q_{10} \cdot L^2}{8} = \frac{9,845 \cdot 6^2}{8} = 44,302 \text{ kNm};$$

Elemento įlinkis nuo M_{10} lenkimo momento, pagal 3.16 formulę:

$$d_{el,10} = \frac{5}{48} \cdot \frac{M_{10} \cdot L^2}{E_{cm} \cdot I_{uc}} = \frac{5}{48} \cdot \frac{44,302 \cdot 10^3 \cdot 6^2}{34,65 \cdot 10^9 \cdot 26,578 \cdot 10^{-4}} = 1,804 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 1,804 \text{ mm};$$

Dešimtajam ruožui apskaičiuojamas elemento kreivis nesupleišėjusiai zonai pagal 3.17 formulę:

$$\frac{1}{r_{uc,10}} = \frac{M_{10}}{E_{cm} \cdot l_{uc}} = \frac{44,302 \cdot 10^3}{34,65 \cdot 10^9 \cdot 26,578 \cdot 10^{-4}} = 4,811 \cdot 10^{-4} \frac{1}{m};$$

Apskaičiuojamas elemento kreivis supleišėjusiai zonai pagal 3.18 formulę:

$$\frac{1}{r_{cr,10}} = \frac{M_{10}}{E_{cm} \cdot l_{cr}} = \frac{44,302 \cdot 10^3}{34,65 \cdot 10^9 \cdot 4,309 \cdot 10^{-4}} = 2,967 \cdot 10^{-3} \frac{1}{m};$$

Apskaičiuojamas pasiskirstymo koeficientas pagal 3.19 formulę:

$$\zeta_{10} = 1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_{10}} \right)^2 = 1 - \left(\frac{34,256}{44,302} \right)^2 = 0,4021;$$

Apskaičiuojamas naujas elemento įlinkis nagrinėjamoje zonoje pagal 3.20 formulę:

$$d_{10} = \left(\zeta_{10} \cdot \frac{1}{r_{cr,10}} + (1 - \zeta_{10}) \cdot \frac{1}{r_{uc,10}} \right) \cdot \frac{5 \cdot L^2}{48} = (0,4021 \cdot 2,967 \cdot 10^{-3} + (1 - 0,4021) \cdot 4,811 \cdot 10^{-4}) \cdot \frac{5 \cdot 6^2}{48} = 5,553 \cdot 10^{-3} m = 5,553 mm;$$

Pagal 3.10 formulę apskaičiuojamas dešimtas tamprumo modulis:

$$E_{c10} = \frac{\frac{5 \cdot L^4}{192} - \frac{L \cdot l_1^3}{3} + \frac{l_1^4}{4}}{\frac{2 \cdot l_{uc} \cdot d_{10}}{q_{10}} - \frac{1}{E_{cm}} \left(\frac{L \cdot l_{10}^3}{3} - \frac{l_{10}^4}{4} \right) - \sum_{j=1}^{i-1} \left(\frac{L \cdot l_{j+1}^3}{3} - \frac{l_{j+1}^4}{4} - \frac{L \cdot l_j^3}{3} + \frac{l_j^4}{4} \right) \cdot \frac{1}{E_{i-1}}};$$

Kad būtų paprasčiau skaičiuoti išskaidome šią formulę į kelias:

$$\alpha_{c10} = \frac{5 \cdot L^4}{192} - \frac{L \cdot l_1^3}{3} + \frac{l_1^4}{4} = \frac{5 \cdot 6^4}{192} - \frac{6 \cdot 2,857^3}{3} + \frac{2,857^4}{4} = 3,7625;$$

$$\beta_{c10} = \frac{2 \cdot l_{uc} \cdot d_{10}}{q_{10}} - \frac{1}{E_{cm}} \cdot \left(\frac{L \cdot l_{10}^3}{3} - \frac{l_{10}^4}{4} \right) = \frac{2 \cdot 26,578 \cdot 10^{-4} \cdot 5,553 \cdot 10^{-3}}{9,845 \cdot 10^3} - \frac{1}{34,65 \cdot 10^9} \cdot \left(\frac{6 \cdot 1,571^3}{3} - \frac{1,571^4}{4} \right) = 2,818 \cdot 10^{-9};$$

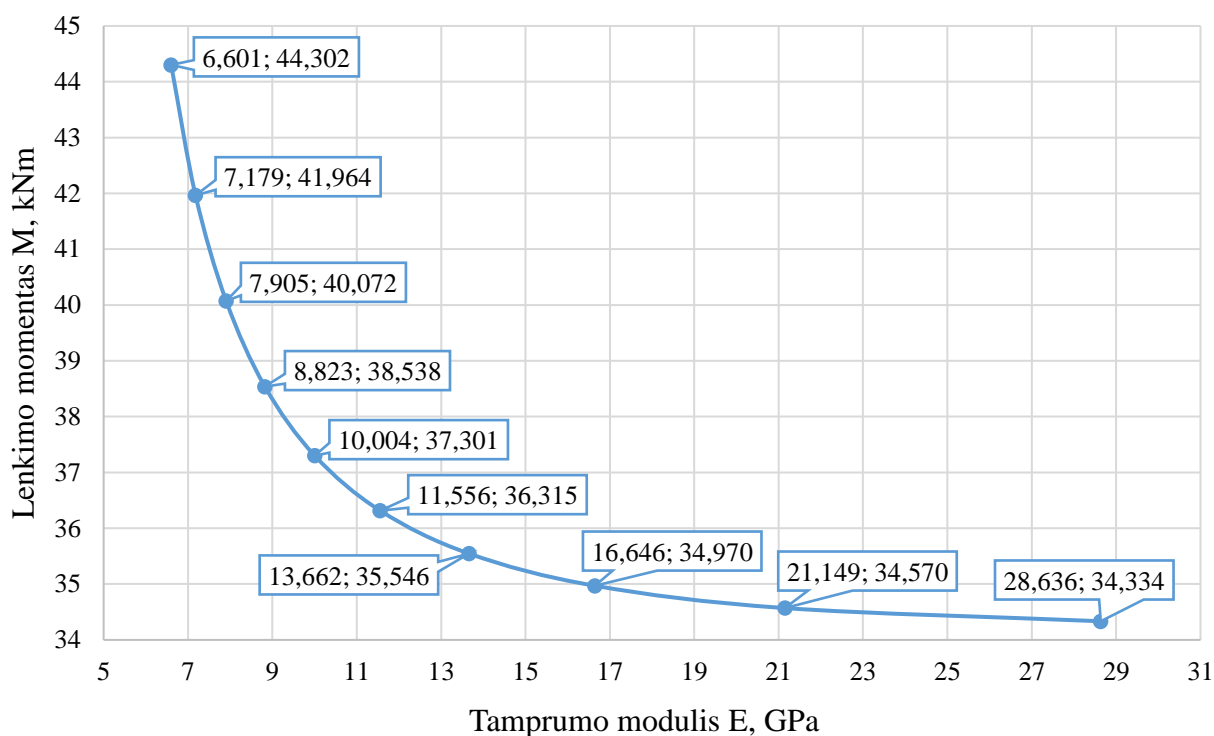
$$\begin{aligned} \gamma_{c10} = & \sum_{j=1}^{i-1} \left(\frac{L \cdot l_{j+1}^3}{3} - \frac{l_{j+1}^4}{4} - \frac{L \cdot l_j^3}{3} + \frac{l_j^4}{4} \right) \cdot \frac{1}{E_{i-1}} = \left(\frac{6 \cdot 2,857}{3} - \frac{2,857^4}{4} - \frac{6 \cdot 2,714^3}{3} + \frac{2,714^4}{4} \right) \cdot \frac{1}{7,179 \cdot 10^9} + \\ & \left(\frac{6 \cdot 2,714^3}{3} - \frac{2,714^4}{4} - \frac{6 \cdot 2,571^3}{3} + \frac{2,571^4}{4} \right) \cdot \frac{1}{7,905 \cdot 10^9} + \left(\frac{6 \cdot 2,571^3}{3} - \frac{2,571^4}{4} - \frac{6 \cdot 2,429^3}{3} + \frac{2,429^4}{4} \right) \cdot \frac{1}{8,823 \cdot 10^9} + \\ & \left(\frac{6 \cdot 2,429^3}{3} - \frac{2,429^4}{4} - \frac{6 \cdot 2,286^3}{3} + \frac{2,286^4}{4} \right) \cdot \frac{1}{10,004 \cdot 10^9} + \left(\frac{6 \cdot 2,286^3}{3} - \frac{2,286^4}{4} - \frac{6 \cdot 2,143^3}{3} + \frac{2,143^4}{4} \right) \cdot \frac{1}{11,556 \cdot 10^9} + \\ & \left(\frac{6 \cdot 2,143^3}{3} - \frac{2,143^4}{4} - \frac{6 \cdot 2,0^3}{3} + \frac{2,0^4}{4} \right) \cdot \frac{1}{13,662 \cdot 10^9} + \left(\frac{6 \cdot 2,0^3}{3} - \frac{2,0^4}{4} - \frac{6 \cdot 1,857^3}{3} + \frac{1,857^4}{4} \right) \cdot \frac{1}{16,646 \cdot 10^9} + \\ & \left(\frac{6 \cdot 1,857^3}{3} - \frac{1,857^4}{4} - \frac{6 \cdot 1,714^3}{3} + \frac{1,714^4}{4} \right) \cdot \frac{1}{21,149 \cdot 10^9} + \left(\frac{6 \cdot 1,714^3}{3} - \frac{1,714^4}{4} - \frac{6 \cdot 1,571^3}{3} + \frac{1,571^4}{4} \right) \cdot \frac{1}{28,636 \cdot 10^9} = \\ & 2,248 \cdot 10^{-9}; \end{aligned}$$

$$E_{c10} = \frac{\alpha_{c10}}{\beta_{c10} - \gamma_{c10}} = \frac{3,7625}{2,818 \cdot 10^{-9} - 2,248 \cdot 10^{-9}} = 6,601 \cdot 10^9 Pa;$$

Apibendrinus dešimtąjį etapą gavome:

- tamprumo modulis lygus $E_{c10} = 6,601 GPa$;
- lenkimo momentas lygus $M_{10} = 44,302 kNm$.

Kai turime visus tamprumo modulius ir lenkimo momentus (papildomai žiūrėti 1 priedą), galime nubrėžti diagramą, kuri apibrėžtų šių dydžių priklausomybę (14 paveikslas).



14 pav. Tamprumo modulių ir lenkimo momentų priklausomybės diagrama, kai ruožų skaičius lygus 21 vnt.

Lyginant 10 ir 14 paveiksluose pavaizduotas diagramas, matome, kad abejose diagramose kreivė yra mažėjanti, t.y. lenkimo momentui didėjant, mažėja tamprumo modulis. Tačiau 10 paveiksle ją gavome kaip tiesę, o 14 paveiksle kaip eksponentinę funkciją. Pagal tai galima padaryti išvadą, kad šiame skaičiavime yra svarbu suskirstyti siją į kuo daugiau ruožų, kad pasimatytų tikroji E/M diagrama.

6 lentelė. Gauti rezultatai nagrinėjant siją suskirsčius į 21 ruožą.

Ruožo žymuo (nr.)	Ruožo ilgis, m	Apkrova $q, kN/m$	Lenkimo momentas M, kNm	Nesupleišėjusios dalies kreivis $\frac{1}{r_{un}}, 10^{-4} \frac{1}{m}$	Supleišėjusios dalies kreivis $\frac{1}{r_{cr}}, 10^{-3} \frac{1}{m}$	Įlinkis, $d, 10^{-3}m$	Tamprumo modulis E, GPa
1.	2,857	7,630	34,334	3,728	2,300	1,431	28,636
2.	2,714	7,682	34,570	3,754	2,316	1,539	21,149
3.	2,571	7,771	34,970	3,797	2,342	1,721	16,646
4.	2,429	7,899	35,546	3,860	2,381	1,980	13,662
5.	2,286	8,070	36,315	3,943	2,432	2,321	11,556
6.	2,143	8,289	37,301	4,050	2,498	2,748	10,004
7.	2,000	8,564	38,538	4,185	2,581	3,272	8,823
8.	1,857	8,905	40,072	4,351	2,684	3,902	7,905
9.	1,714	9,325	41,964	4,557	2,811	4,655	7,179
10.	1,571	9,845	44,302	4,811	2,967	5,553	6,601

Gauti galutiniai rezultatai pateikti 6 lentelėje. Joje galime matyti, kad mažėjant nesupleišėjusio ruožo ilgiui nuo sijos atramos iki jos vidurio išskirstyta apkrova ir lenkimo momentai didėja, to pasekoje didėja ir elemento įlinkis. Tačiau tamprumo modulių kitimas priešingas – jis mažėja, t.y. ties sijos atrama gauname didžiausią, sijos viduryje – mažiausią tamprumo modulį. Taip pat, šiems ruožams galime pasiskaičiuoti vidutinius įtempius pagal 3.23 formulę. Vidutinių įtempių rezultatai pateikti 7 lentelėje.

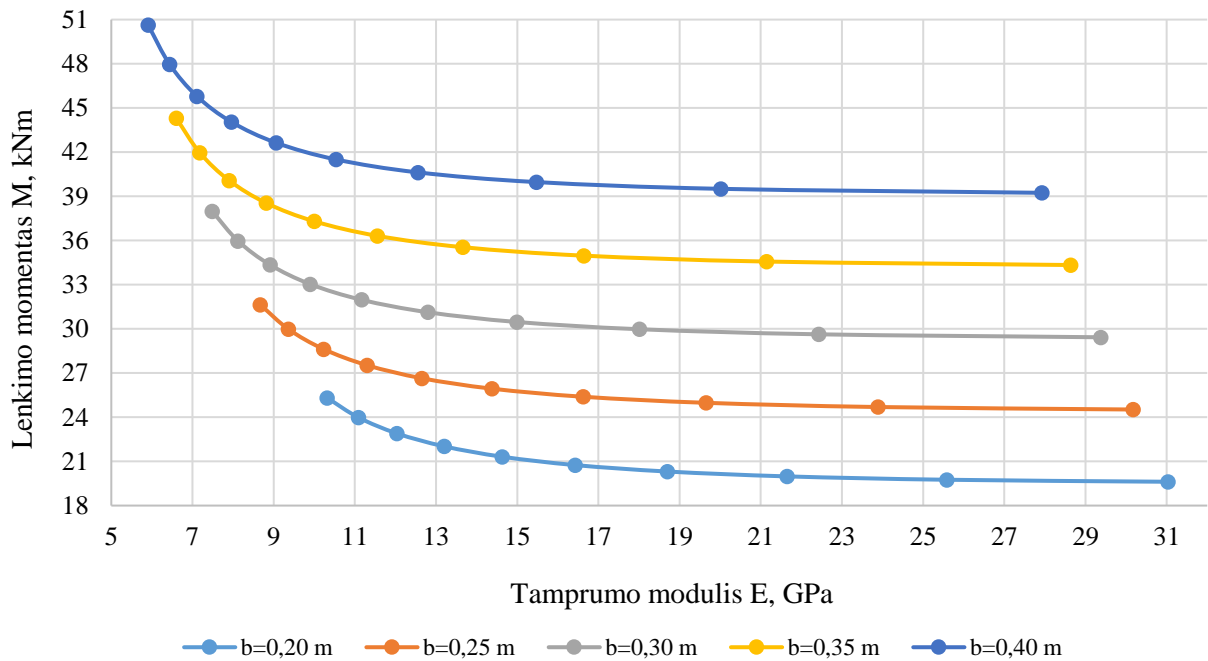
7 lentelė. Vidutinių įtempių skaičiavimas

Ruožo žymuo (nr.)	Gniuždomos zonos aukštis, x, m	Nesupleišėjusios zonos kreivis, $\frac{1}{r_{un}}, \cdot 10^{-4} \frac{1}{m}$	Red. deformacijų modulis, E, GPa	Vidutiniai įtempiai, σ, MPa
1.	0,0884	3,728	28,636	0,944
2.	0,101	3,754	21,149	0,800
3.	0,112	3,797	16,646	0,705
4.	0,121	3,860	13,662	0,638
5.	0,130	3,943	11,556	0,591
6.	0,137	4,050	10,004	0,556
7.	0,144	4,185	8,823	0,533
8.	0,151	4,351	7,905	0,518
9.	0,156	4,557	7,179	0,511
10.	0,161	4,811	6,601	0,518

3.1. Teorinių rezultatų palyginimas

Norint padaryti išvadas, kaip keičiasi galutiniai teoriniai rezultatai (elemento tamprumo moduliai priklausomai nuo lenkimo momento) keičiant nagrinėjamo elemento skerspjūvio bei armavimo parametrus, atliksime 2 ir 3 skyriuose pateiktus skaičiavimus po keletą kartų kiekvienam parametru. Šie skaičiavimai bus atlikti su programa MATLAB [22], o rezultatai pateikti atskiruose prieduose, lentelių pavidalu. Pirmiausia, keičiamas bus sijos plotis iš 0,35 m į 0,20 m, 0,25 m, 0,30 m ir 0,40 m. Po šio skaičiavimo, keisime sijos aukštį, o tai įtakos ir darbo aukštį, keisime armatūros kiekį bei naudojamą betono klasę. Sijos ilgio nekeisime, nes jį pakeitus pasikeičia tik lenkimo momentas, kuris veikia siją, o nagrinėjant ruožus jie skaičiuojamiems lenkimo momentas, tamprumo moduliui bei kreiviams įtakos nedaro.

Nagrinėjant sijos pločio įtaką lenkimo momentams, tamprumo moduliams ir įlinkiams, skaičiavimų rezultatai pateikti 2 priede. Iš gautų rezultatų, kai yra keičiamas sijos plotis sudarome bendrą rezultatų diagramą, kuri pavaizduota 15 paveiksle. Iš šios diagramos matome, kad didėjant sijos pločiui pasikeičia lenkimo momentai ir tamprumo moduliai.



15 pav. Tamprumo modulio ir lenkimo momentų priklausomybė, kai keičiamas sijos plotis

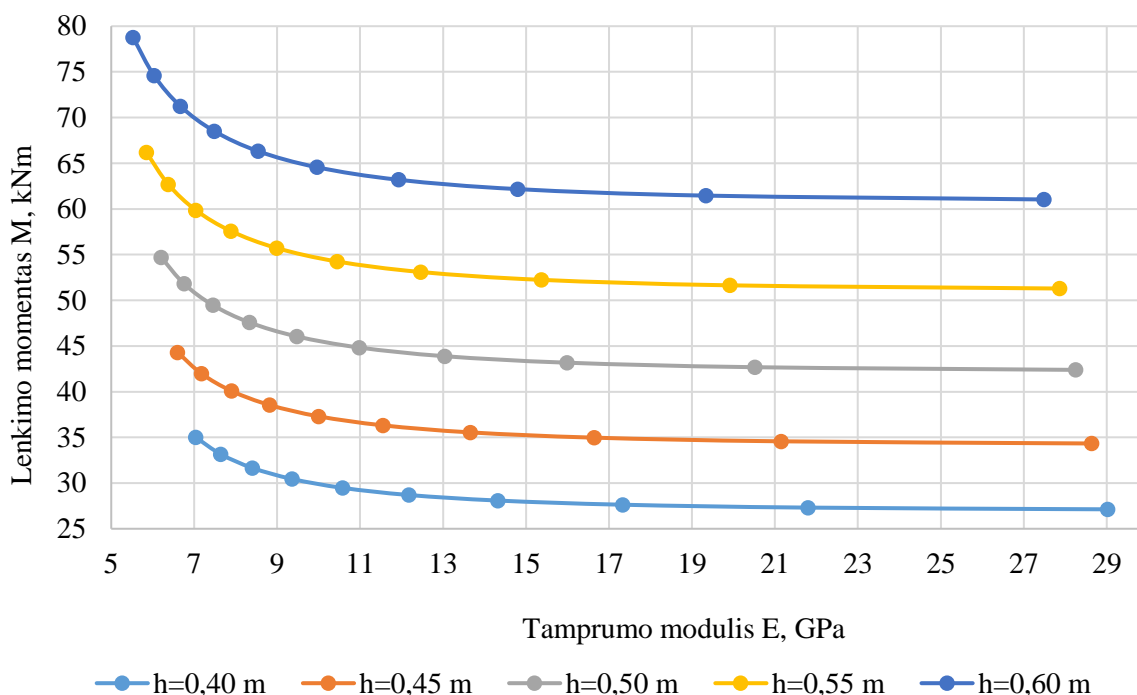
8 lentelė. Sijos pločio, tamprumo modulių ir lenkimo momentų priklausomybės skaičiavimas pirmam, penktam ir dešimtam ruožams

Plotis b, m		$\frac{b_2}{b_1}$	Plotis b, m		$\frac{b_3}{b_2}$	Plotis b, m		$\frac{b_4}{b_3}$	Plotis b, m		$\frac{b_5}{b_4}$
0,20	0,25	1,250	0,25	0,30	1,200	0,30	0,35	1,167	0,35	0,40	1,143
E, GPa		$\frac{E_2}{E_1}$	E, GPa		$\frac{E_3}{E_2}$	E, GPa		$\frac{E_4}{E_3}$	E, GPa		$\frac{E_5}{E_4}$
31,033	30,179	0,973	30,179	29,383	0,974	29,383	28,636	0,975	28,636	27,932	0,975
16,428	14,379	0,875	14,379	12,806	0,891	12,806	11,556	0,902	11,556	10,537	0,912
10,317	8,668	0,840	8,668	7,488	0,864	7,488	6,601	0,882	6,601	5,907	0,895
M, kNm		$\frac{M_2}{M_1}$	M, kNm		$\frac{M_3}{M_2}$	M, kNm		$\frac{M_4}{M_3}$	M, kNm		$\frac{M_5}{M_4}$
19,619	24,524	1,250	24,542	29,429	1,200	29,429	34,334	1,167	34,334	39,239	1,143
20,751	25,939	1,250	25,939	31,127	1,200	31,127	36,315	1,167	36,315	41,503	1,143
25,315	31,644	1,250	31,644	37,973	1,200	37,973	44,302	1,167	44,302	50,631	1,143

Taigi, tiek iš diagramų, tiek iš 8 lentelės, galime padaryti išvadą – kiek kartų padidėjo sijos plotis, tiek kartų padidės lenkimo momentai, t.y. jeigu $\frac{b_2}{b_1} = s_b$, tai momentas bus lygus $M_2 = M_1 \cdot s_b$. Tačiau šios prielaidos negalime taikyti tamprumo modulio skaičiavimui, nes padidinus sijos plotį, jis mažėja neproporcingai pasikeitusių pločių santykiui.

Toliau nagrinėjame, kokią įtaką skaičiavimams turi pasirinktas sijos aukštis. Pakeisime sijos aukštį iš 0,45m į 0,40 m, 0,50 m, 0,55 m ir 0,60 m. Pakeitus sijos aukštį h , pasikeičia ir darbo aukštis d . Skaičiavimo metu gauti rezultatai pateikti 3 priedo lentelėse. Iš šių rezultatų, kai yra keičiamas sijos aukštis sudarome bendrą rezultatų diagramą, kuri pavaizduota 16 paveiksle. Iš šios diagramos

matome, kad didėjant sijos aukščiui ir darbo aukščiui lenkimo momentai padidės, o tamprumo moduliai sumažės.



16 pav. Tamprumo modulio ir lenkimo momentų priklausomybė, kai keičiamas sijos aukštis

9 lentelė. Sijos aukščio, tamprumo modulių ir lenkimo momentų priklausomybės skaičiavimas pirmam, penktam ir dešimtam ruožams

Aukštis h, m		$\frac{h_2}{h_1}$	Aukštis h, m		$\frac{h_3}{h_2}$	Aukštis h, m		$\frac{h_4}{h_3}$	Aukštis h, m		$\frac{h_5}{h_4}$
0,40	0,45	1,125	0,45	0,50	1,111	0,50	0,55	1,100	0,55	0,60	1,091
E, GPa		$\frac{E_2}{E_1}$	E, GPa		$\frac{E_3}{E_2}$	E, GPa		$\frac{E_4}{E_3}$	E, GPa		$\frac{E_5}{E_4}$
29,021	28,636	0,987	28,636	28,250	0,987	28,250	27,867	0,986	27,867	27,491	0,987
12,177	11,556	0,949	11,556	10,980	0,950	10,980	10,450	0,952	10,450	9,963	0,953
7,0360	6,601	0,938	6,601	6,205	0,940	6,205	5,848	0,942	5,848	5,527	0,945
M, kNm		$\frac{M_2}{M_1}$	M, kNm		$\frac{M_3}{M_2}$	M, kNm		$\frac{M_4}{M_3}$	M, kNm		$\frac{M_5}{M_4}$
27,128	34,334	1,266	34,334	42,388	1,235	42,388	51,289	1,210	51,289	61,038	1,190
28,693	36,315	1,266	36,315	44,833	1,235	44,833	54,248	1,210	54,248	64,560	1,190
35,004	44,302	1,266	44,302	54,694	1,235	54,694	66,180	1,210	66,180	78,759	1,190

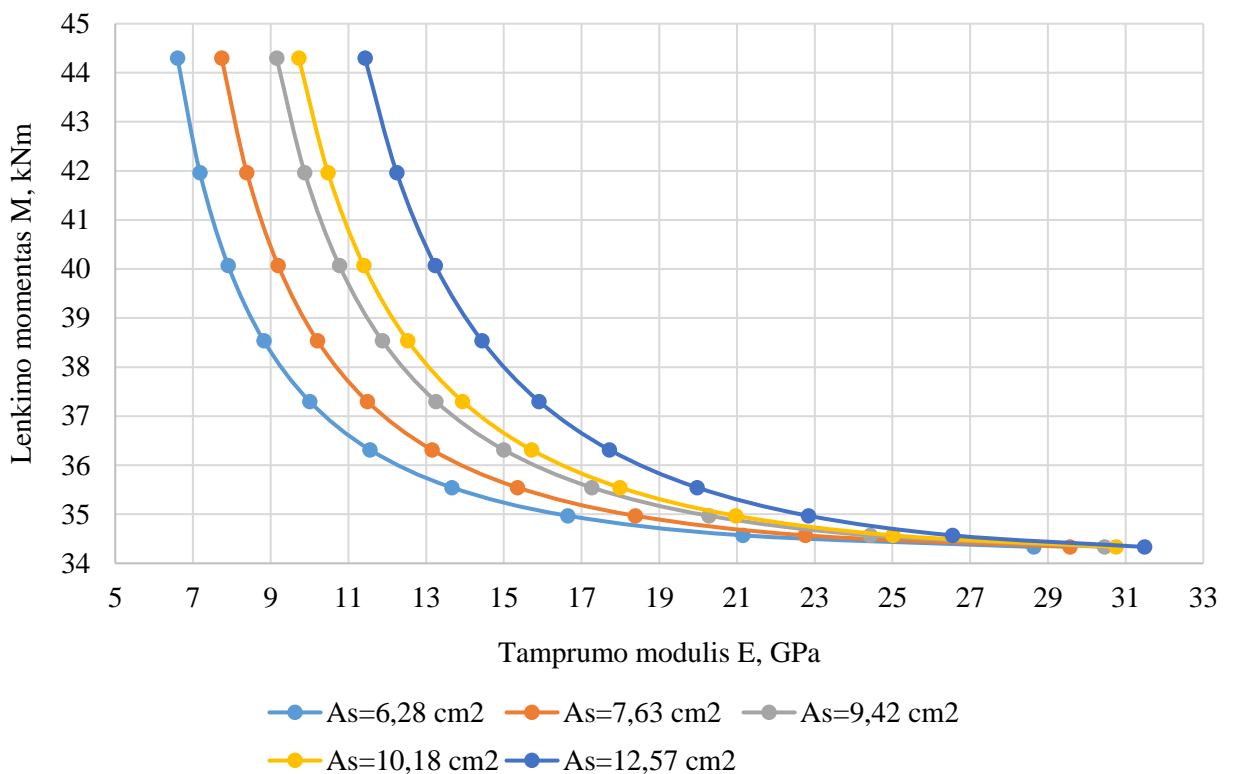
Iš 9 lentelės matome, kad $\left(\frac{h_2}{h_1}\right)^2 = 1,125^2 = 1,266 = \frac{M_2}{M_1}$. Taigi, galime priimti, kad jeigu s kartų padidės sijos aukštis, tai lenkimo momentai padidės $M \cdot s_h^2$ kartų. Patikriname šią prielaidą:

$$s_h = \frac{h_2}{h_1} = \frac{0,45^2}{0,40} = 1,125; \quad (3.24)$$

$$M_2 = M_1 \cdot s_h^2 = 27,128 \cdot 1,125^2 = 34,334 \text{ kNm}; \quad (3.25)$$

Gauname, kad prielaida teisinga, tačiau ją taikyti galime tik lenkimo momentui, nes tamprumo modulis mažėja (neproporcingai), o ne didėja.

Nagrinėjame, kokią įtaką turi pasirinktas sijos armatūros kiekis. Esamą armatūrą $2x\emptyset 20$ mm, keisime į $3x\emptyset 18$ mm, $3x\emptyset 20$ mm, $4x\emptyset 18$ mm ir $4x\emptyset 20$ mm. Skaičiavimuose gauti rezultatai, kai yra keičiamas sijos armatūros skerspjūvio plotas pateikiami 4 priede, o pagal juos sudarome bendrą rezultatų diagramą, kuri pavaizduota 17 paveiksle. Iš šios diagramos matome, kad didėjant sijos armatūros kiekiui lenkimo momento reikšmės nesikeičia, bet dėl pasikeitusių suplesišėjusios dalies parametru padidėjus armatūros kiekiui padidėja ir tamprumo modulio reikšmės.



17 pav. Tamprumo modulio ir lenkimo momentų priklausomybė, kai keičiamas sijos armatūros kiekis

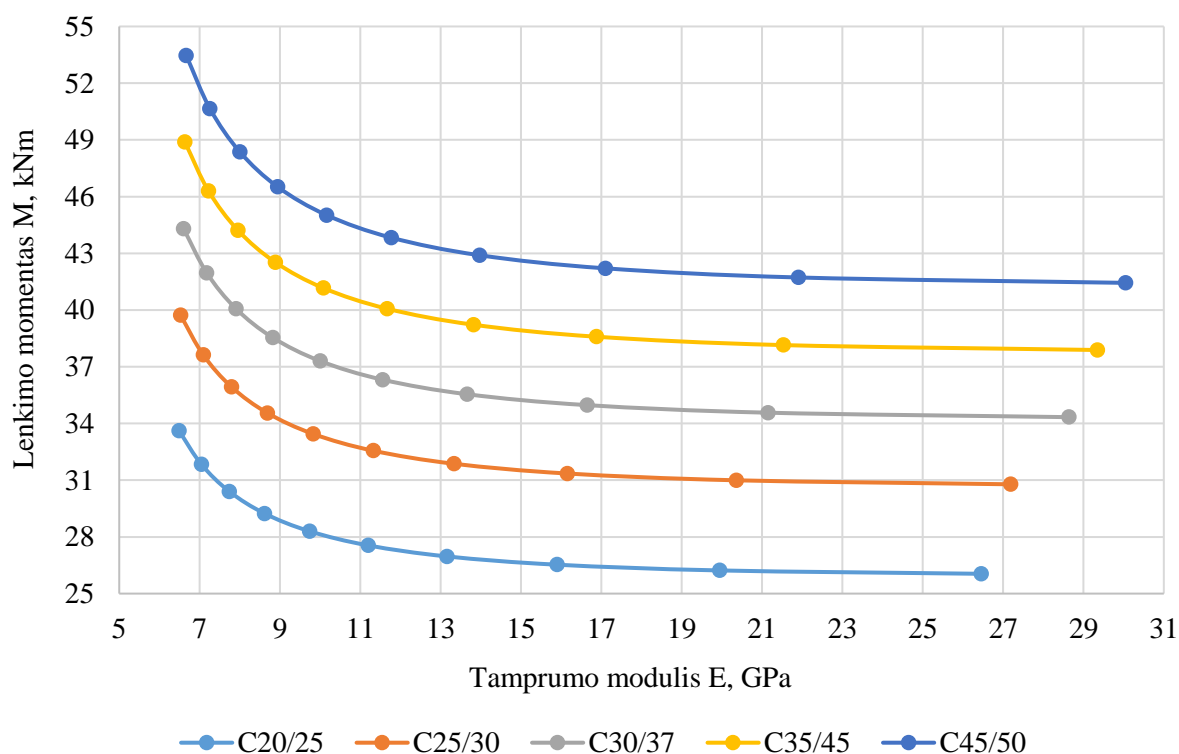
10 lentelė. Sijos armatūros kiekio, tamprumo modulių ir lenkimo momentų priklausomybės skaičiavimas pirmam, penktam ir dešimtam ruožams

Armat. skersp. A_s, cm^2		$\frac{A_{s2}}{A_{s1}}$	Armat. skersp. A_s, cm^2		$\frac{A_{s3}}{A_{s2}}$	Armat. skersp. A_s, cm^2		$\frac{A_{s4}}{A_{s3}}$	Armat. skersp. A_s, cm^2		$\frac{A_{s5}}{A_{s4}}$
6,28	7,63	1,215	7,63	9,42	1,235	9,42	10,18	1,081	10,18	12,57	1,235
E, GPa		$\frac{E_2}{E_1}$	E, GPa		$\frac{E_3}{E_2}$	E, GPa		$\frac{E_4}{E_3}$	E, GPa		$\frac{E_5}{E_4}$
28,636	29,568	1,033	29,568	30,457	1,030	30,457	30,754	1,010	30,754	31,487	1,024
11,556	13,148	1,138	13,148	14,999	1,141	14,999	15,712	1,048	15,712	17,716	1,128
6,601	7,738	1,172	7,738	9,153	1,183	9,153	9,724	1,062	9,724	11,426	1,175
M, kNm		$\frac{M_2}{M_1}$	M, kNm		$\frac{M_3}{M_2}$	M, kNm		$\frac{M_4}{M_3}$	M, kNm		$\frac{M_5}{M_4}$

34,334	34,334	1,000	34,334	34,334	1,000	34,334	34,334	1,000	34,334	34,334	1,000
36,315	36,315	1,000	36,315	36,315	1,000	36,315	36,315	1,000	36,315	36,315	1,000
44,302	44,302	1,000	44,302	44,302	1,000	44,302	44,302	1,000	44,302	44,302	1,000

Taigi, iš 17 diagramos ir 10 lentelės skaičiavimų galime padaryti išvadą, kad keičiant armatūros kiekį lenkimo momentai išlieka tokie patys, o tamprumo moduliai padidėja neproporcingai. Tai galime matyti, kai tarp vienodų armatūros skerspjūvių santykių $\frac{A_{s3}}{A_{s2}} = \frac{A_{s5}}{A_{s4}} = 1,235$, tamprumo moduliai pakinta skirtingai.

Galutinis palyginimas atliekamas, kai yra keičiama sijai naudojama betono klasė. Pakeisime betono klasę C30/37 į C20/25, C25/30, C35/45 ir C40/50 klasės betonus. Skaičiavimų metu gauti rezultatai pateikti 5 priede, o pagal juos sudarome bendrą rezultatų diagramą, kuri pavaizduota 18 paveiksle. Iš šios diagramos matome, kad didėjant betono klasei, didėja lenkimo momentų ir tamprumo modulių reikšmės.



18 pav. Tamprumo modulio ir lenkimo momentų priklausomybė, kai keičiama sijos betono klasė

11 lentelė. Sijos betono klasės (tamprumo modulio), apskaičiuotų tamprumo modulių ir lenkimo momentų priklausomybės skaičiavimas pirmam, penktam ir dešimtam ruožams

Pagal betoną E_c, GPa		$\frac{E_{c2}}{E_{c1}}$	Pagal betoną E_c, GPa		$\frac{E_{c3}}{E_{c2}}$	Pagal betoną E_c, GPa		$\frac{E_{c4}}{E_{c3}}$	Pagal betoną E_c, GPa		$\frac{E_{c5}}{E_{c4}}$
31,50	32,55	1,033	32,55	34,65	1,065	34,65	35,70	1,030	35,70	36,75	1,029
E, GPa		$\frac{E_2}{E_1}$	E, GPa		$\frac{E_3}{E_2}$	E, GPa		$\frac{E_4}{E_3}$	E, GPa		$\frac{E_5}{E_4}$
26,460	27,193	1,02	27,193	28,636	1,053	28,636	29,346	1,025	29,346	30,049	1,024

11,200	11,323	1,011	11,323	11,556	1,021	11,556	11,666	1,010	11,666	11,772	1,009
6,489	6,528	1,006	6,528	6,601	1,011	6,601	6,635	1,005	6,635	6,668	1,005
M, kNm		$\frac{M_2}{M_1}$	M, kNm		$\frac{M_3}{M_2}$	M, kNm		$\frac{M_4}{M_3}$	M, kNm		$\frac{M_5}{M_4}$
26,047	30,782	1,182	30,782	34,334	1,115	34,334	37,886	1,103	37,886	41,438	1,094
27,549	32,558	1,182	32,558	36,315	1,115	36,315	40,072	1,103	40,072	43,828	1,094
33,608	39,719	1,182	39,719	44,302	1,115	44,302	48,885	1,103	48,885	53,468	1,094

Pagal 18 paveikslėlį ir 11 lentelę matome, kad lenkimo momentai didėja visuose ruožuose, o tamprumo modulis labiausiai padidėja pirmame ruože, o dešimtame išlieka panašus keičiant betono klases.

Papildomai tikrinsime prielaidą, kad jeigu pakeitus sijos plotį, lenkimo momentas pakinta $M \cdot s_b$, o pakeitus sijos aukštį, lenkimo momentas pakinta $M \cdot s_h^2$, tai pakeitus juos abu gautume išraišką:

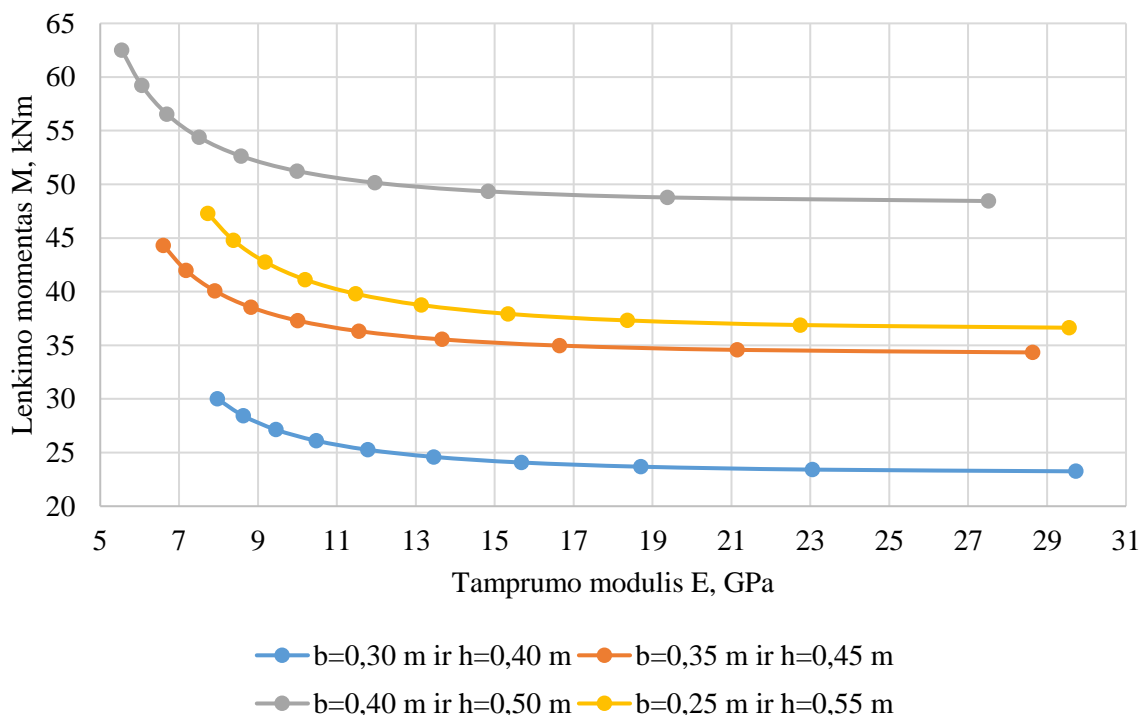
$$M_{bh} = M_1 \cdot s_b \cdot s_h^2; \quad (3.26)$$

čia M_1 – pirmuoju atveju apskaičiuotas lenkimo momentas;

s_b – sijos pločių santykis b_2/b_1 ;

s_h – sijos aukščių santykis h_2/h_1 .

Skaičiavimų metu gauti rezultatai pateikti 6 priede, o pagal juos sudaryta bendra diagrama pavaizduota 19 paveiksle. Visi skaičiavimai atlikti parenkant skirtingą kitimą. Pirmuoju atveju buvo padidintas tiek sijos plotis, tiek aukštis, antruoju atveju buvo abu parametrai pamažinti, o trečiuoju sijos plotis pamažintas, o aukštis padidintas. Tokiu būdu galima išanalizuoti visas galimas situacijas.



19 pav. Tamprumo modulio ir lenkimo momentų priklausomybė, kai keičiamas sijos plotis ir aukštis

12 lentelė. Skaičiavimų rezultatai, pagrindžiantys prielaidą, kad pakeitus sijos plotį ir aukštį galime išsiskaičiuoti naują lenkimo momentą.

Plotis b_1, m	Plotis b_2, m	$s_b = \frac{b_2}{b_1}$	Aukštis h_1, m	Aukštis h_2, m	$s_h = \frac{h_2}{h_1}$	Ruožo žymuo (nr.)	Esamas M_1, GPa	Apskaič. pagal santykį M_{bh}, GPa	Pagal 5 priedą M, GPa
0,35	0,30	0,857	0,45	0,40	0,889	1	34,334	25,253	25,253
						5	36,315	24,594	24,594
						10	44,302	30,003	30,003
0,35	0,40	1,143	0,45	0,50	1,111	1	34,334	48,443	48,443
						5	36,315	51,238	51,238
						10	44,302	62,507	62,507
0,35	0,25	0,714	0,45	0,55	1,222	1	34,334	36,635	36,635
						5	36,315	38,749	38,749
						10	44,302	47,271	47,271

Iš 12 lentelės matome, kad mūsų prielaida teisinga. Nepriklausomai ar abu dydžius didinsime ar mažinsime, ar vieną didinsime, o kitą mažinsime, 3.24 priklausomybė galios visiems šiems atvejams.

Apibendrinant diagramas pateiktas 15÷19 paveiksluose ir pagal jas padarytus skaičiavimus ir prielaidas, galime padaryti kelias išvadas:

1. padidinus sijos *plotį*, lenkimo momentai padidėja $M \cdot s_b$, kai s_b yra pločio pasikeitimo santykis, o tamprumo moduliai pamažėja neproporcingai;
2. padidinus sijos *aukštį*, lenkimo momentai padidėja $M \cdot s_h^2$, kai s_h yra aukščio pasikeitimo santykis, o tamprumo moduliai pamažėja neproporcingai;
3. padidinus sijoje *armatūros kiekį*, lenkimo momentai nesikeičia, o tamprumo moduliai padidėja neproporcingai;
4. padidinus sijoje *betono klasę*, padidėja lenkimo momentai ir tamprumo moduliai neproporcingai;
5. pakeitus sijos *plotį* ir/arba *aukštį*, naują lenkimo momentą galima apskaičiuoti pagal 3.26 išraišką.

Analitiškai išnagrinėjus deformacijų modulių kitimą, buvo pastebėta, kad dėl elemento kreivio jie kinta tendencingai. Galima naudoti universalią išraišką (3.27) deformacijų moduliui rasti, priklausomai nuo elemento kreivio:

$$E'_c = \frac{E_c}{1,63 \cdot a^{(1+2a^{-2,6})}}; \quad (3.27)$$

čia E_c – elemento tamprumo modulis;

a – koeficientas, apskaičiuojamas pagal 3.28 išraišką. Jeigu apskaičiuotas $a > 1$, tai perskaičiuoti nebereikia, o jeigu $a < 1$, tuomet šis koeficientas perskaičiuojamas pagal 3.29 išraišką:

$$a = \frac{(1/r)}{5,34 \cdot (1/r)_{el}}; \quad (3.28)$$

čia $\frac{1}{r}$ – vidutinis kreivis, apskaičiuotas supleišėjusiam elementui nuo lenkimo momento M ;

$\frac{1}{r_{el}}$ – kreivis, apskaičiuotas nuo pleišėjimo momento M_{cr} nesupleišėjusiam skerspjūviui.

$$a = \frac{d}{5,34 \cdot (1/r)_{el}}; \quad (3.29)$$

čia d – elemento įlinkis nuo lenkimo momento M ;

$\frac{1}{r_{el}}$ – kreivis, apskaičiuotas nuo pleišėjimo momento M_{cr} nesupleišėjusiam skerspjūviui.

Patikriname šią priklausomybę su 3 skyriuje aprašytais rezultatais. Pasirenkame apskaičiuoti deformacijų modulį, kai sija buvo suskirstyta į 21 zoną, naudojant dešimto etapo kreivių rezultatus. Pagal 1.1.8 lygtį apskaičiuojame kreivį, kuris atsiranda nesupleišėjusiam skerspjūvyje nuo pleišėjimo momento:

$$\frac{1}{r_{el}} = \frac{M_{cr}}{E_c \cdot I_{uc}} = \frac{34,256 \cdot 10^3}{34,65 \cdot 10^9 \cdot 26,578 \cdot 10^{-4}} = 3,720 \cdot 10^{-4} \frac{1}{m};$$

Pasiskirstymo koeficientas, pagal 1.1.7 lygtį, lygus:

$$\zeta = 1 - \beta \left(\frac{M_{cr}}{M_{10}} \right)^2 = 1 - 1 \left(\frac{34,256 \cdot 10^6}{44,302 \cdot 10^6} \right)^2 = 0,402;$$

Vidutinis sijos kreivis, pagal 1.1.6 lygtį, lygus:

$$\frac{1}{r} = \zeta \frac{1}{r_{cr,10}} + (1 - \zeta) \frac{1}{r_{un,10}} = 0,402 \cdot 2,967 \cdot 10^{-3} + (1 - 0,402) \cdot 4,811 \cdot 10^{-4} = 1,481 \cdot 10^{-3} \frac{1}{m};$$

Apskaičiuojame koeficientą a pagal 3.28 formulę:

$$a = \frac{(1/r)}{5,34 \cdot (1/r)_{el}} = a = \frac{1,481 \cdot 10^{-3}}{5,34 \cdot 3,720 \cdot 10^{-4}} = 0,745 < 1;$$

Perskaičiuojame su 3.29 formule:

$$a = \frac{d}{5,34 \cdot (1/r)_{el}} = \frac{5,553 \cdot 10^{-3}}{5,34 \cdot 3,720 \cdot 10^{-4}} = 2,796$$

Gauname, kad $a < 1$, todėl nereikia perskaičiuoti su 3.29 formule. Apskaičiuojamas deformacijų modulis penktame etape pagal 3.27 formulę:

$$E'_{c,10} = \frac{E_c}{1,63 \cdot a^{(1+2a^{-2,6})}} = \frac{34,65 \cdot 10^9}{1,24 \cdot 2,796^{(1+2 \cdot 2,796^{-2,6})}} = 6,598 \cdot 10^9 \text{ Pa} \approx E_{c,10} = 6,601 \cdot 10^9 \text{ Pa};$$

Gauname beveik lygų rezultatą, todėl galime teigti, jog ši išraiška tinkama. Tiksliausiai gaunamas rezultatas, kai nagrinėjamas ruožas su mažiausia nesupleišėjusia zona, mūsų atveju – dešimtą ruožą.

4. Teorinių ir eksperimentinių rezultatų palyginimas

Šiame skyriuje bus lyginami kitų mokslininkų atliktų eksperimentų rezultatai su pateiktu 3 skyriuje skaičiavimo metodo gautomis reikšmėmis. Šios naujos teorinės reikšmės bus skaičiuojamos naudojant MATLAB [22] programinę įrangą ir bus pateikiami tik rezultatai. Pasirinkti penkių mokslininkų straipsniai ir juose atlikti eksperimentai. Pagal mokslininkų Tinoco [4] ir Slaito [5] darbus bus nagrinėjamos lenkimo momentų ir įlinkio priklausomybės, o Kaklauskas [23], Meškėnas [24] bei Gribniak [25] darbuose – lenkimo momento ir kreivių priklausomybės. Šių mokslininkų naudojami bandiniai ir jų charakteristikos pateiktos 13 lentelėje.

13 lentelė. Mokslininkų atliktų eksperimentų duomenys

Eil. Nr.	Mokslininko Pavardė	Bandinio žymuo	Bandinio b x h, mm	Ilgis L, m	Apsauginis sl.		Armatūra		Betono klasė	Dydis f_c , MPa
					a_{s1} , mm	a_{s2} , mm	A_{s1} , cm ²	A_{s2} , cm ²		
1.	Tinoco [4]	B1	150x220	1,50	35	25	1,57	0,57	C45/55	45
2.	Slaitas [5]	BS-0	180x300	2,81	37	41	3,08	1,57	C50/60	50
3.	Kaklauskas [23]	S3-2-3	284x298	3,00	27	32	2,32	0,57	N/D	50,9
4.	Meškėnas [24]	S3-PC2	280x300	3,00	23	23	2,26	0,56	N/D	64,47
5.	Gribniak [25]	S1-4	280x300	3,00	33	24	7,60	0,57	N/D	49,4

PASTABA. N/D – nėra duomenų.

Pirmiausia, pagal *Eurokodą 2* apskaičiuosime eksperimentuose naudojamų bandinių teorinius įlinkius ir tuomet juos lyginsime su gautais pagal 3 skyriuje aprašyto metodo formules ir galiausiai lyginsime su kitų mokslininkų gautais eksperimentiniais duomenimis. Pagal 2 skyriuje pateiktas formules galime apskaičiuoti vidutinį įlinkį vis didinant lenkimo momentą lyginant nuo pleišėjimo momento reikšmės (M_{cr}), tačiau eksperimentuose bandomos sijos yra su dvipusiu armavimu, todėl papildomai reikia formulių, kai yra nebe vienpusis, o dvipusis armavimas. Dvipusiam sijos armavimui efektyvusis skerspjūvio plotas gali būti apskaičiuojamas pagal 4.1 formulę:

$$A_{eff} = b \cdot h + (\alpha_e - 1) \cdot A_{s1} + \alpha_e \cdot A_{s2}; \quad (4.1)$$

čia α_e – tamprumo modulio redukcijos koeficientas apskaičiuotas pagal 1.1.11 formulę;

A_{s1} – apatinės armatūros skerspjūvio plotas;

A_{s2} – viršutinės armatūros skerspjūvio plotas.

Efektyvusis statinis momentas apskaičiuojamas pagal 4.2 formulę:

$$S_{eff} = \frac{b \cdot h^2}{2} + \alpha_e \cdot A_{s1} \cdot a_{s1} + \alpha_e \cdot A_{s2} \cdot (h - a_{s2})^2; \quad (4.2)$$

čia a_{s1} – apatinės armatūros apsauginis sluoksnis;

a_{s2} – viršutinės armatūros apsauginis sluoksnis.

Apskaičiuojamas atstumas iki svorio centro pagal 4.3 formulę:

$$y_{eff} = \frac{S_{eff}}{A_{eff}}; \quad (4.3)$$

Apskaičiuojamas efektyvusis inercijos momentas nesupleišėjusiam skerspjūviui pagal 4.4 formulę:

$$I_{eff} = \frac{b \cdot h^3}{12} + b \cdot h \cdot \left(\frac{h}{2} - y_{eff}\right)^2 + \alpha_e \cdot A_{s1} \cdot (y_{eff} - a_{s1})^2 + \alpha_e \cdot A_{s2} \cdot (h - y_{eff} - a_{s2})^2; \quad (4.4)$$

Apskaičiuojamas pleišėjimo momentas, kai yra dvipusis armavimas pagal 4.5 formulę:

$$M_{cr} = \frac{I_{eff}}{y_{eff}} \cdot f_{ctm}; \quad (4.5)$$

Apskaičiuojamas gniuždomos zonos aukštis dvipusiam armavimui pagal 4.6 formulę:

$$x = \frac{\sqrt{((\alpha_e - 1) \cdot A_{s2} + \alpha_e \cdot A_{s1})^2 + 2 \cdot b \cdot (\alpha_e \cdot (A_{s2} \cdot a_{s2} + A_{s1} \cdot d) - A_{s2} \cdot a_{s2}) - (\alpha_e - 1) \cdot A_{s2} + \alpha_e \cdot A_{s2}}}{b}}; \quad (4.6)$$

Galiausiai apskaičiuojamas supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas dvipusiai armuotai sijai pagal Shamass [26] pateiktą formulę:

$$I_{eff,cr} = \frac{b \cdot x^3}{3} + \alpha_e \cdot A_{s1} \cdot (d - x)^2 + (\alpha_e - 1) \cdot A_{s2} \cdot (x - a_{s2})^2; \quad (4.7)$$

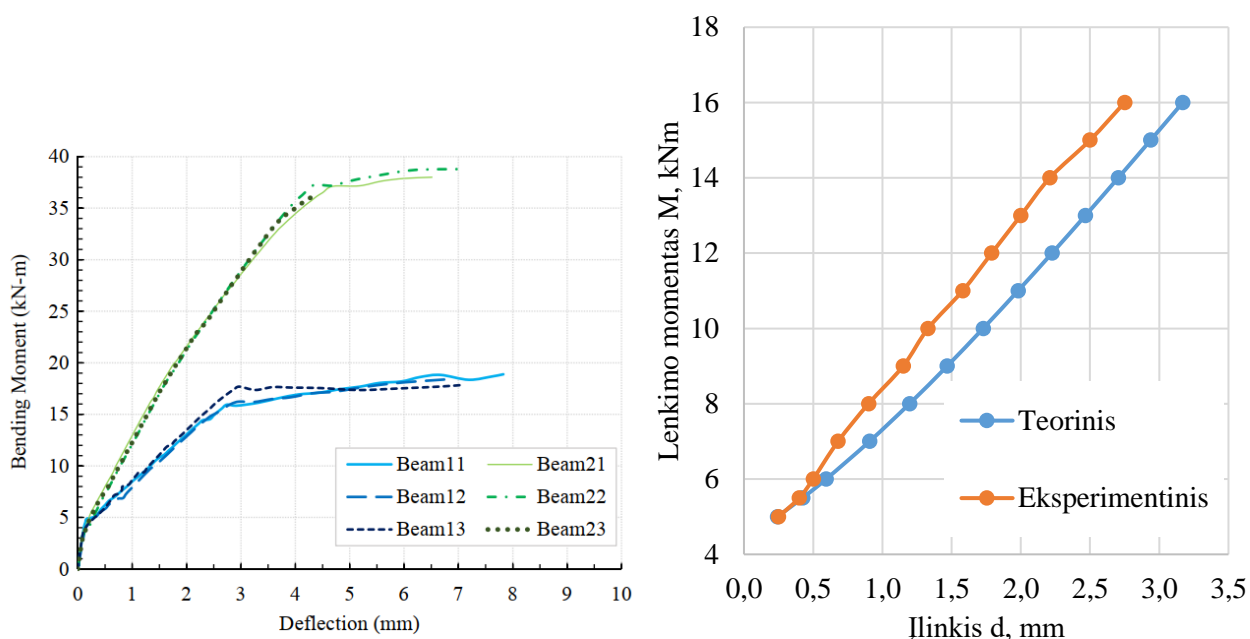
Skaiciavimo rezultatai ir iš diagramos nustatytos eksperimentinės reikšmės pirmajam eksperimentui pateiktos 14 lentelėje, o pagal jas sudaryta M/d diagrama pavaizduota 20 paveiksle. Tiek iš lentelės, tiek iš diagramų galime pastebėti, kad apskaičiuotos teorinės reikšmės yra šiek tiek didesnės nei gautos eksperimento metu dėl *Eurokodo 2* skaičiavimų atsargos.

14 lentelė. Vidutinio įlinkio skaičiavimas pagal 2 skyriaus formules B1 sijai ir nustatytas eksperimentinis įlinkis pagal mokslininko Tinoco [4] diagramą

Eil. Nr.	Lenkimo momentas M, kNm	Nesupleišėjusios dalies kreivis $\frac{1}{r_{un}}, 10^{-3} \frac{1}{m}$	Supleišėjusios dalies kreivis $\frac{1}{r_{cr}}, 10^{-3} \frac{1}{m}$	Vidutinis kreivis $\frac{1}{r_{avg}}, 10^{-3} \frac{1}{m}$	Vidutinis įlinkis, d, $10^{-3} m$	Eksperimentinis įlinkis d, $10^{-3} m^*$
	$M_{cr} = 4,940 kNm$					
1.	5,00	0,943	4,573	1,030	0,241	0,250
2.	5,50	1,037	5,030	1,809	0,424	0,400
3.	6,00	1,132	5,487	2,535	0,594	0,500
4.	7,00	1,320	6,402	3,871	0,907	0,680
5.	8,00	1,509	7,316	5,102	1,196	0,900
6.	9,00	1,697	8,231	6,263	1,468	1,150
7.	10,00	1,886	9,145	7,374	1,728	1,330
8.	11,00	2,074	10,060	8,450	1,980	1,580
9.	12,00	2,263	10,974	9,498	2,226	1,790
10.	13,00	2,452	11,889	10,526	2,467	2,000
11.	14,00	2,640	12,803	11,538	2,704	2,210
12.	15,00	2,829	13,718	12,537	2,938	2,500

13.	16,00	3,017	14,633	13,525	3,170	2,750
-----	-------	-------	--------	--------	-------	-------

PASTABA. * Nustatyta tik apytikslė reikšmė naudojantis mokslininko pateikta diagrama.

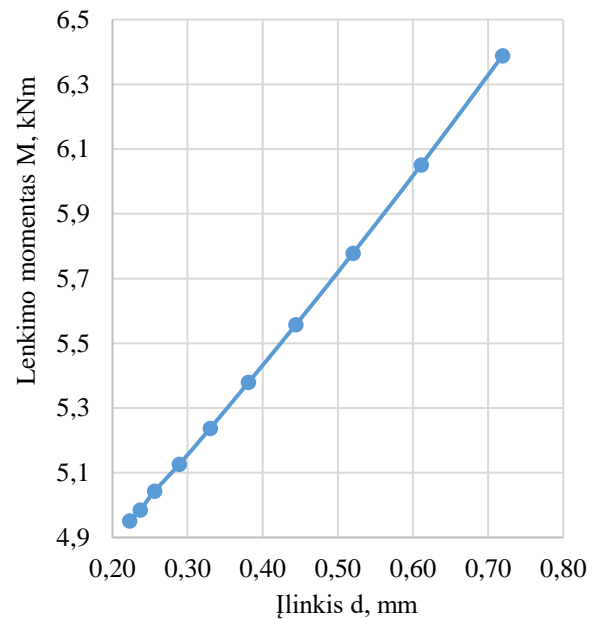
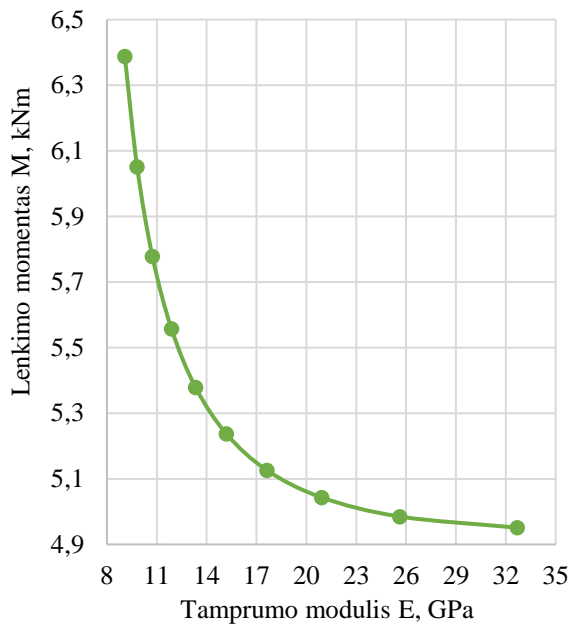


20 pav. Kairėje pusėje - įlinkio (x ašis) ir lenkimo momento (y ašis) diagrama pagal mokslininką Tinoco [4]. Nagrinėjamos sijos su žymenimis „Beam 11“, „Beam12“ ir „Beam13“. Dešinėje pusėje – pagal *Eurokodo 2* gautas teorines reikšmes ir gautas eksperimentiškai sudaryta M/d diagrama

Toliau bus atliekamas skaičiavimas pagal 3 skyriuje aprašytą metodą tamprumo moduliams apskaičiuoti, rezultatai pateikti 15 lentelėje, o pagal juos sudarytos M/E ir M/d diagramos pavaizduotos 21 paveiksle.

15 lentelė. MATLAB [22] programa gauti rezultatai pirmajam eksperimentui (B1 sija)

Ruožo žymuo (nr.)	Ruožo ilgis, m	Lenkimo momentas M, kNm	Nesupleišėjusios dalies kreivis $\frac{1}{r_{un}}, 10^{-4} \frac{1}{m}$	Supleišėjusios dalies kreivis $\frac{1}{r_{cr}}, 10^{-3} \frac{1}{m}$	Įlinkis, d, $10^{-3}m$	Tamprumo modulis E, GPa
1.	0,714	4,951	9,337	4,528	0,223	32,687
2.	0,679	4,985	9,401	4,559	0,237	25,620
3.	0,643	5,043	9,510	4,612	0,256	20,935
4.	0,607	5,126	9,666	4,688	0,289	17,629
5.	0,571	5,237	9,875	4,789	0,330	15,190
6.	0,536	5,379	10,144	4,919	0,381	13,334
7.	0,500	5,557	10,480	5,082	0,444	11,886
8.	0,464	5,778	10,897	5,284	0,520	10,739
9.	0,429	6,051	11,412	5,534	0,611	9,818
10.	0,393	6,388	12,047	5,842	0,719	9,076



21 pav. Pagal pirmojo eksperimento duomenis gautos diagramos. Kairėje - lenkimo momentų ir tamprumo modulių priklausomybė (M/E), dešinėje – lenkimo momentų ir įlinkių priklausomybė (M/d)

Iš eksperimentinės įlinkių diagramos (20 pav.) matome, kad įlinkiai pasiskirsto pagal funkciją $f(y) = 0,2221y - 0,8585$, o lenkimo momentai pagal $f(x) = 4,4977x + 3,874$. Pagal 3 skyriuje aprašytą metodą gauti įlinkiai (21 pav.) kinta pagal funkciją $f(y) = 0,3471y - 1,4907$, o lenkimo momentai pagal $f(x) = 2,8786x + 4,2952$.

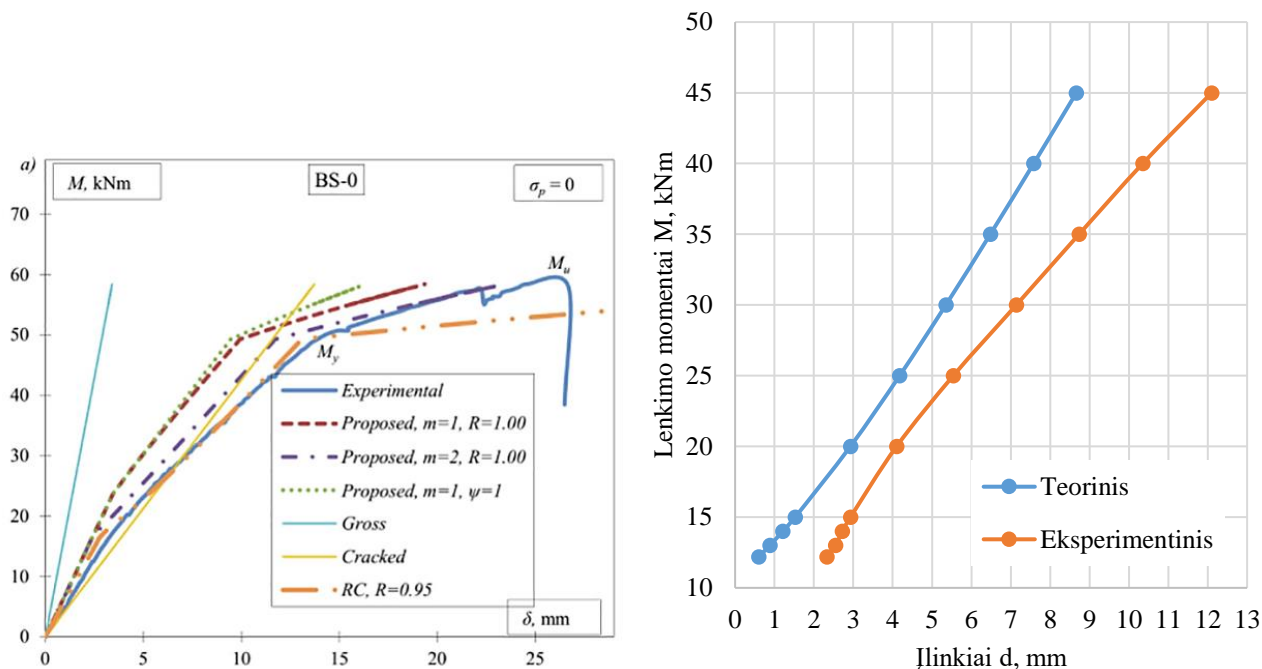
Skaičiavimo rezultatai antrajam eksperimentui ir iš jame pateiktos diagramos nustatytos eksperimentinės reikšmės pateiktos 16 lentelėje, o pagal jas sudaryta M/d diagrama pavaizduota 22 paveiksle. Iš gautų rezultatų matome, kad eksperimento metu buvo gautos didesnės reikšmės nei teoriniu būdu apskaičiuotos vidutinės, naudojant *Eurokodą 2*. Galima priimti, kad buvo nustatytos netikslios eksperimentinės reikšmės, eksperimento metu atsirado deformacijos atramose arba rezultatus įtakojo kiti veiksniai.

16 lentelė. Vidutinio įlinkio skaičiavimas pagal 2 skyriaus formules BS-0 sijai ir nustatytas eksperimentinis įlinkis pagal mokslininko Slaito [5] diagramą

Eil. Nr.	Lenkimo momentas M, kNm	Nesupleišėjusios dalies kreivis $\frac{1}{r_{un}}, 10^{-3} \frac{1}{m}$	Supleišėjusios dalies kreivis $\frac{1}{r_{cr}}, 10^{-3} \frac{1}{m}$	Vidutinis kreivis $\frac{1}{r_{avg}}, 10^{-3} \frac{1}{m}$	Vidutinis įlinkis, d, $10^{-3} m$	Eksperimentinis įlinkis d, $10^{-3} m$ *
$M_{cr} = 12,176 kNm$						
1.	12,20	0,722	3,025	0,731	0,601	2,330
2.	13,00	0,769	3,223	1,071	0,881	2,550
3.	14,00	0,829	3,471	1,472	1,211	2,720
4.	15,00	0,888	3,719	1,854	1,525	2,930
5.	20,00	1,184	4,959	3,560	2,928	4,100
6.	25,00	1,480	6,198	5,079	4,178	5,540
7.	30,00	1,776	7,438	6,505	5,351	7,140
8.	35,00	2,072	8,678	7,878	6,480	8,733

9.	40,00	2,368	9,917	9,218	7,582	10,350
10.	45,00	2,664	11,157	10,535	8,665	12,100

PASTABA. * Nustatyta tik apytikslė reikšmė naudojantis mokslininko pateikta diagrama.

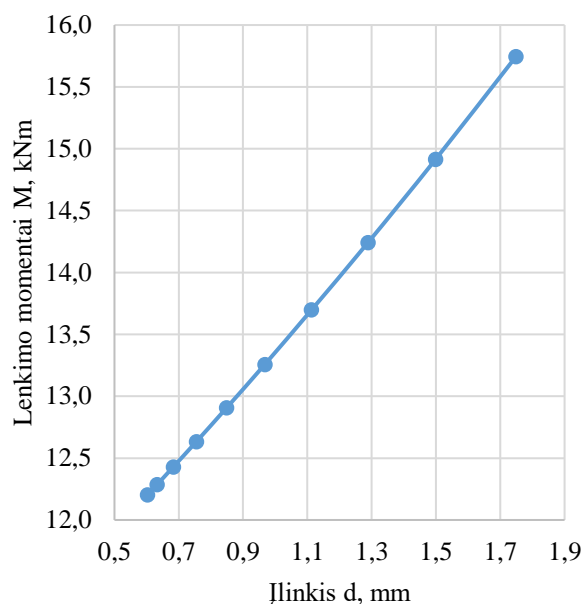
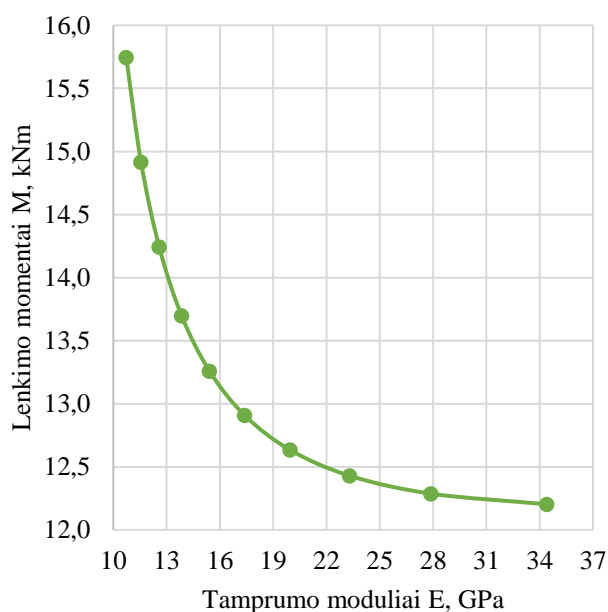


22 pav. Kairėje pusėje - įlinkio (x ašis) ir lenkimo momento (y ašis) diagrama pagal mokslininką Slaitą [5]. Nagrinėjama diagrama su žymeniu „Experimental“. Dešinėje pusėje – pagal *Eurokodo 2* gautas teorines reikšmes ir gautas eksperimentiškai sudaryta M/d diagrama

Toliau bus atliekamas skaičiavimas pagal 3 skyriuje aprašytą metodą tamprumo moduliams apskaičiuoti, rezultatai pateikti 17 lentelėje, o pagal juos sudarytos M/E ir M/d diagramos pavaizduotos 23 paveiksle.

17 lentelė. MATLAB [22] programa gauti rezultatai antrajam eksperimentui (BS-0 sija)

Ruožo žymuo (nr.)	Ruožo ilgis, m	Lenkimo momentas M, kNm	Nesupleišėjusios dalies kreivis $\frac{1}{r_{un}}, 10^{-4} \frac{1}{m}$	Supleišėjusios dalies kreivis $\frac{1}{r_{cr}}, 10^{-3} \frac{1}{m}$	Įlinkis, $d, 10^{-3}m$	Tamprumo modulis E, GPa
1.	1,338	12,203	7,223	3,026	0,603	34,393
2.	1,271	12,287	7,273	3,046	0,633	27,873
3.	1,204	12,429	7,357	3,082	0,683	23,301
4.	1,137	12,634	7,478	3,132	0,755	19,945
5.	1,071	12,907	7,640	3,200	0,849	17,399
6.	1,004	13,258	7,847	3,287	0,968	15,417
7.	0,937	13,698	8,108	3,396	1,113	13,845
8.	0,870	14,243	8,430	3,531	1,289	12,583
9.	0,803	14,915	8,828	3,698	1,499	11,560
10.	0,736	15,746	9,320	3,904	1,749	10,727



23 pav. Pagal antrojo eksperimento duomenis gautos diagramos. Kairėje - lenkimo momentų ir tamprumo modulių priklausomybė (M/E), dešinėje – lenkimo momentų ir įlinkių priklausomybė (M/d)

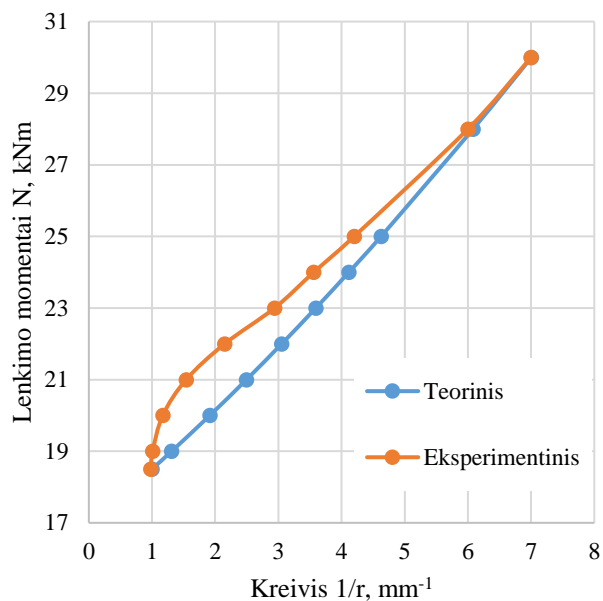
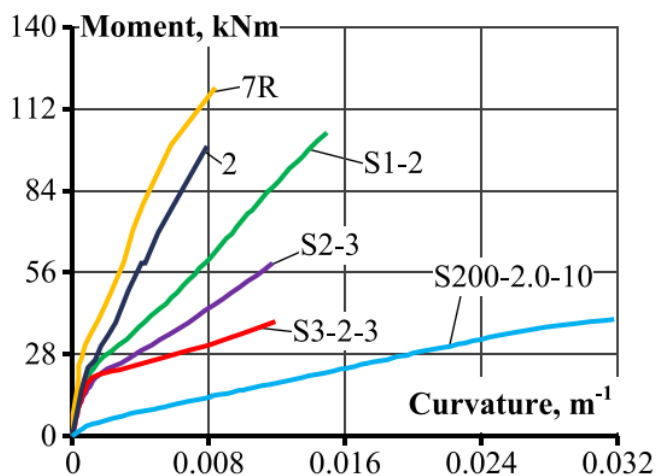
Iš eksperimentinės įlinkių diagramos (22 pav.) matome, kad įlinkiai pasiskirsto pagal funkciją $f(y) = 0,2952y - 1,506$, o lenkimo momentai pagal $f(x) = 3,3741x + 5,184$. Pagal 3 skyriuje aprašytą metodą gauti įlinkiai (23 pav.) kinta pagal funkciją $f(y) = 0,3252y - 3,3534$, o lenkimo momentai pagal $f(x) = 3,0733x + 10,315$.

Skaičiavimo rezultatai trečiajam eksperimentui ir iš jame pateiktos diagramos nustatytos eksperimentinės reikšmės pateiktos 18 lentelėje, o pagal jas sudaryta $M/(1/r)$ diagrama pavaizduota 24 paveiksle. Iš rezultatų matome, kad eksperimento metu buvo gautos mažesnės reikšmės nei apskaičiuotos dėl *Eurokodo 2* skaičiavimų atsargos.

18 lentelė. Vidutinio kreivio ir įlinkio skaičiavimas pagal 2 skyriaus formules S3-2-3 sijai ir nustatytas eksperimentinis kreivis pagal mokslininko Kaklauskio [23] diagramą

Eil. Nr.	Lenkimo momentas M, kNm	Nesupleišėjusios dalies kreivis $\frac{1}{r_{un}}, 10^{-3} \frac{1}{m}$	Supleišėjusios dalies kreivis $\frac{1}{r_{cr}}, 10^{-3} \frac{1}{m}$	Vidutinis kreivis $\frac{1}{r_{avg}}, 10^{-3} \frac{1}{m}$	Eksperimentinis kreivis $\frac{1}{r_e}, 10^{-3} \frac{1}{m}^*$	Vidutinis įlinkis, d, $10^{-3} m$
$M_{cr} = 18,060 kNm$						
1.	18,50	0,734	6,358	0,998	0,980	0,935
2.	19,00	0,754	6,530	1,311	1,010	1,229
3.	20,00	0,793	6,873	1,915	1,170	1,796
4.	21,00	0,833	7,217	2,495	1,540	2,339
5.	22,00	0,872	7,561	3,053	2,150	2,863
6.	23,00	0,912	7,904	3,593	2,940	3,368
7.	24,00	0,952	8,248	4,116	3,560	3,859
8.	25,00	0,991	8,592	4,625	4,200	4,336
9.	28,00	1,110	9,623	6,081	6,000	5,701
10.	30,00	1,190	10,310	7,005	7,000	6,567

PASTABA. * Nustatyta tik apytikslė reikšmė naudojantis mokslininko pateikta diagrama.

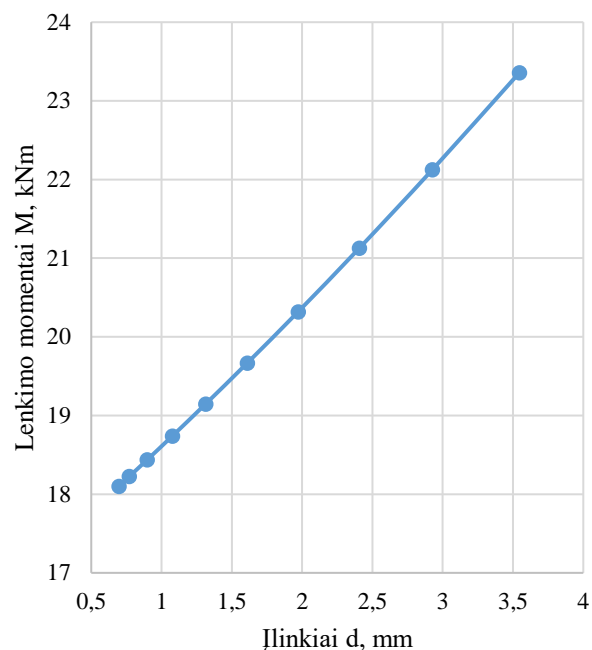
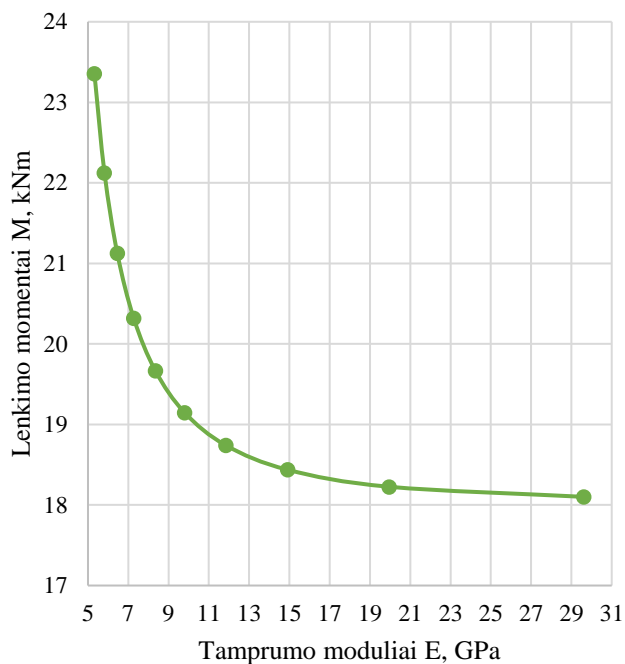


24 pav. Kairėje pusėje – elemento kreivio (x ašis) ir lenkimo momento (y ašis) diagrama pagal mokslininką Kaklauską [23]. Nagrinėjama diagrama su žymeniu „S3-2-3“. Dešinėje pusėje – pagal *Eurokodo 2* gautas teorines reikšmes ir gautas eksperimentiškai sudaryta $M/(1/r)$ diagrama

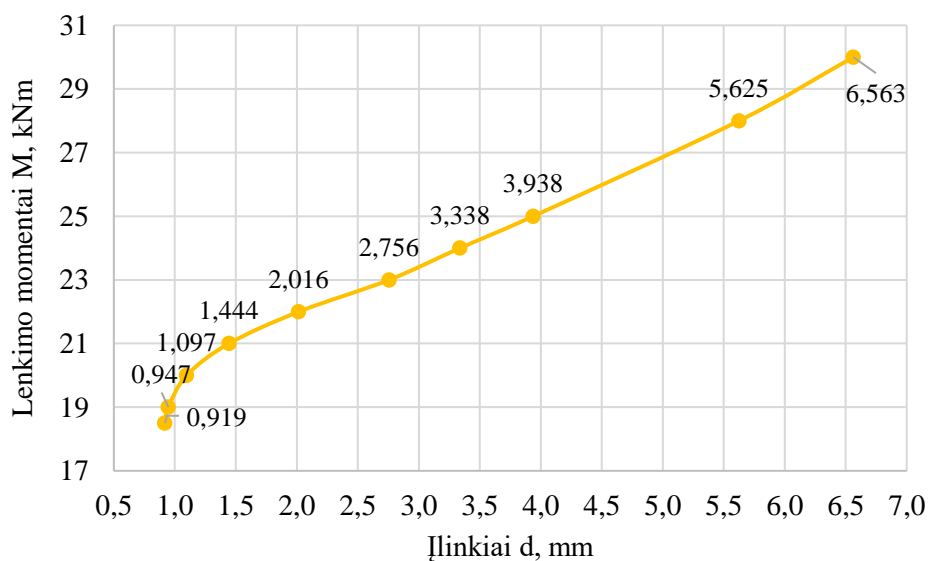
Pagal 3 skyriuje aprašytą metodą gauti rezultatai pateikti 19 lentelėje, o pagal juos sudarytos M/E ir M/d diagramos pavaizduotos 25 paveiksle.

19 lentelė. MATLAB [22] programa gauti rezultatai trečiajam eksperimentui (S3-2-3 sija)

Ruožo žymuo (nr.)	Ruožo ilgis, m	Lenkimo momentas M, kNm	Nesupleišėjusios dalies kreivis $\frac{1}{r_{un}}, 10^{-4} \frac{1}{m}$	Supleišėjusios dalies kreivis $\frac{1}{r_{cr}}, 10^{-3} \frac{1}{m}$	Įlinkis, $d, 10^{-3}m$	Tamprumo modulis E, GPa
1.	1,429	18,101	7,179	6,221	0,696	29,623
2.	1,357	18,226	7,228	6,264	0,771	19,956
3.	1,286	18,437	7,312	6,336	0,898	14,919
4.	1,214	18,740	7,432	6,440	1,077	11,850
5.	1,143	19,146	7,593	6,580	1,313	9,801
6.	1,071	19,666	7,799	6,758	1,609	8,348
7.	1,000	20,318	8,058	6,983	1,971	7,273
8.	0,929	21,126	8,379	7,260	2,406	6,456
9.	0,857	22,124	8,774	7,603	2,926	5,820
10.	0,786	23,357	9,263	8,027	3,545	5,320



25 pav. Pagal trečiojo eksperimento duomenis gautos diagramos. Kairėje - lenkimo momentų ir tamprumo modulių priklausomybė (M/E), dešinėje – lenkimo momentų ir įlinkių priklausomybė (M/d)



26 pav. Pagal mokslininko Kaklauskio [23] lenkimo momentų ir kreivių diagramos reikšmės sudaryta nauja lenkimo momentų ir įlinkių priklausomybė

Iš eksperimentinės įlinkių diagramos (26 pav.) matome, kad įlinkiai pasiskirsto pagal funkciją $f(y) = 0,5241y - 9,2165$, o lenkimo momentai pagal $f(x) = 1,8808x + 17,663$. Pagal 3 skyriuje aprašytą metodą gauti įlinkiai (25 pav.) kinta pagal funkciją $f(y) = 0,5449y - 9,1362$, o lenkimo momentai pagal $f(x) = 1,8335x + 16,768$.

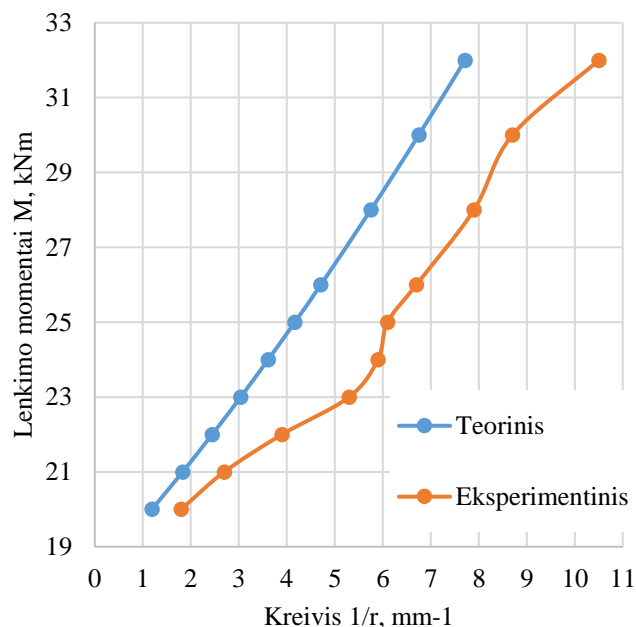
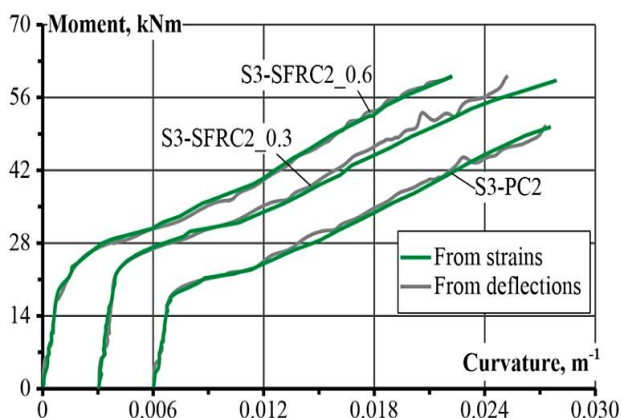
Skaičiavimo rezultatai ketvirtajam eksperimentui ir iš jame pateiktos diagramos nustatytos eksperimentinės reikšmės pateiktos 20 lentelėje, o pagal jas sudaryta $M/(1/r)$ diagrama pavaizduota 27 paveiksle. Iš gautų rezultatų matome, kad eksperimento metu buvo gautos didesnės reikšmės nei teoriniu būdu apskaičiuotos vidutinės, naudojant *Eurokodą 2*. Galima priimti, kad buvo nustatytos

netikslios eksperimentinės reikšmės, eksperimento metu atsirado deformacijos atramos arba rezultatus įtakojo kiti veiksniai.

20 lentelė. Vidutinio kreivio ir įlinkio skaičiavimas pagal 2 skyriaus formules S3-PC2 sijai ir nustatytas eksperimentinis kreivis pagal mokslininko Meškėno [24] diagramą

Eil. Nr.	Lenkimo momentas M, kNm	Nesupleišėjusios dalies kreivis $\frac{1}{r_{un}}, 10^{-3} \frac{1}{m}$	Supleišėjusios dalies kreivis $\frac{1}{r_{cr}}, 10^{-3} \frac{1}{m}$	Vidutinis kreivis $\frac{1}{r_{avg}}, 10^{-3} \frac{1}{m}$	Eksperimentinis kreivis $\frac{1}{r_e}, 10^{-3} \frac{1}{m} *$	Vidutinis įlinkis, d, $10^{-3} m$
$M_{cr} = 19,270 kNm$						
1.	20,00	0,728	7,149	1,190	1,800	1,116
2.	21,00	0,765	7,506	1,831	2,700	1,717
3.	22,00	0,801	7,864	2,447	3,900	2,294
4.	23,00	0,838	8,221	3,040	5,300	2,850
5.	24,00	0,874	8,579	3,613	5,900	3,387
6.	25,00	0,911	8,936	4,169	6,100	3,908
7.	26,00	0,947	9,293	4,710	6,700	4,415
8.	28,00	1,020	10,008	5,752	7,900	5,393
9.	30,00	1,093	10,723	6,751	8,700	6,329
10.	32,00	1,165	11,438	7,714	10,500	7,232

PASTABA. * Nustatyta tik apytikslė reikšmė naudojantis mokslininko pateikta diagrama.

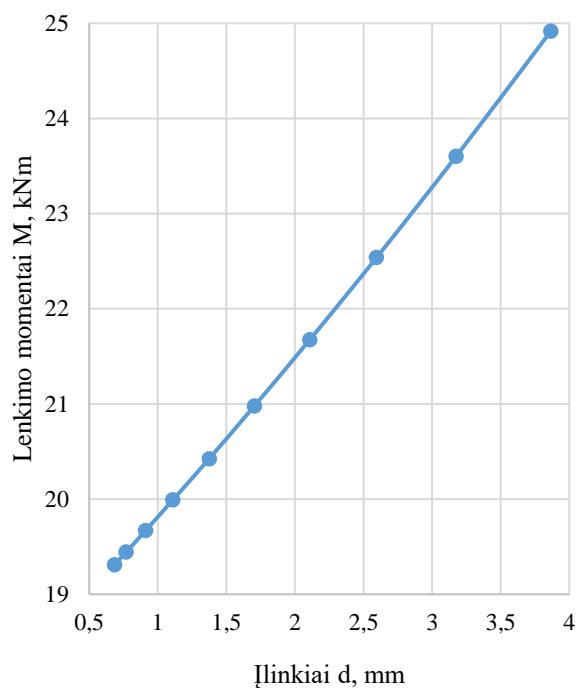
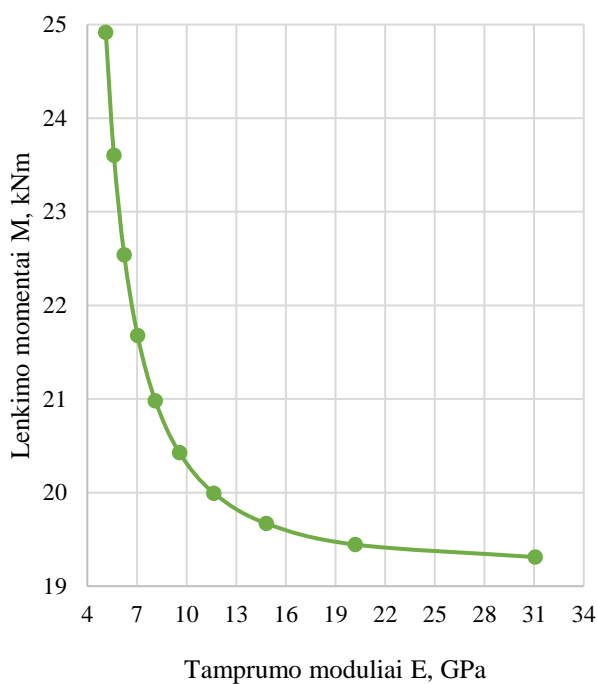


27 pav. Kairėje pusėje – elemento kreivio (x ašis) ir lenkimo momento (y ašis) diagrama pagal mokslininką Meškėną [24]. Nagrinėjama diagrama su žymeniu „S3-PC2“. Dešinėje pusėje – pagal Eurokodo 2 gautas teorines reikšmes ir gautas eksperimentiškai sudaryta M/(1/r) diagrama

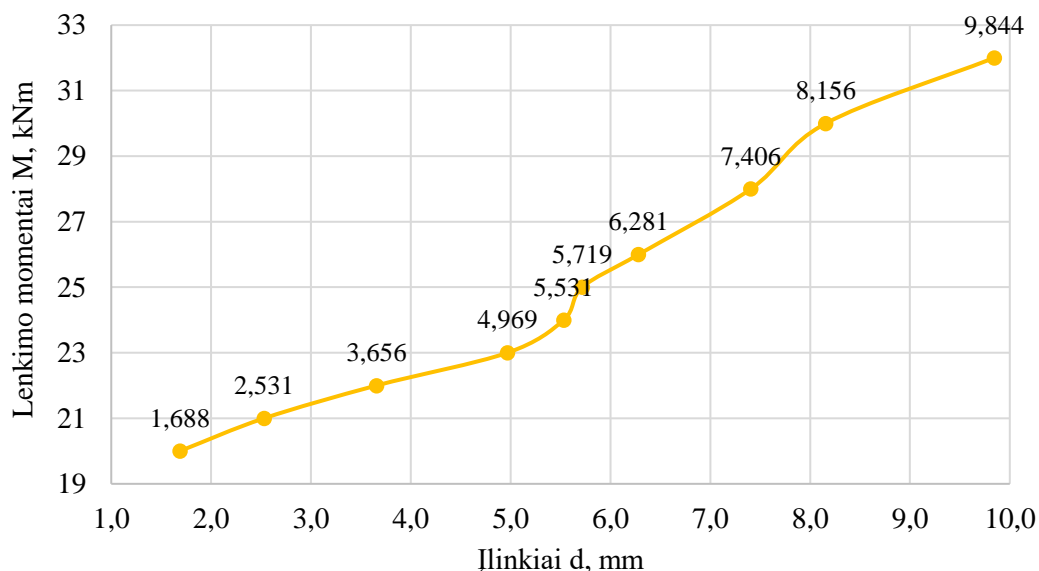
Pagal 3 skyriuje aprašytą metodą gauti rezultatai pateikti 21 lentelėje, o pagal juos sudarytos M/E ir M/d diagramos pavaizduotos 28 paveiksle.

21 lentelė. MATLAB [22] programa gauti rezultatai ketvirtajam eksperimentui (S3-PC2 sija)

Ruožo žymuo (nr.)	Ruožo ilgis, m	Lenkimo momentas M, kNm	Nesupleišėjusios dalies kreivis $\frac{1}{r_{un}}, 10^{-4} \frac{1}{m}$	Supleišėjusios dalies kreivis $\frac{1}{r_{cr}}, 10^{-3} \frac{1}{m}$	Įlinkis, $d, 10^{-3}m$	Tamprumo modulis E, GPa
1.	1,429	19,311	7,033	6,903	0,686	31,063
2.	1,357	19,444	7,081	6,950	0,770	20,199
3.	1,286	19,669	7,163	7,030	0,911	14,831
4.	1,214	19,993	7,281	7,146	1,111	11,655
5.	1,143	20,425	7,439	7,301	1,375	9,571
6.	1,071	20,980	7,641	7,499	1,705	8,111
7.	1,000	21,676	7,894	7,748	2,109	7,041
8.	0,929	22,538	8,209	8,056	2,595	6,232
9.	0,857	23,603	8,596	8,437	3,176	5,606
10.	0,786	24,918	9,075	8,907	3,866	5,116



28 pav. Pagal ketvirtojo eksperimento duomenis gautos diagramos. Kairėje - lenkimo momentų ir tamprumo modulių priklausomybė (M/E), dešinėje – lenkimo momentų ir įlinkių priklausomybė (M/d)



29 pav. Pagal mokslininko Meškėno [24] lenkimo momentų ir kreivių diagramos reikšmės sudaryta nauja lenkimo momentų ir įlinkių priklausomybė

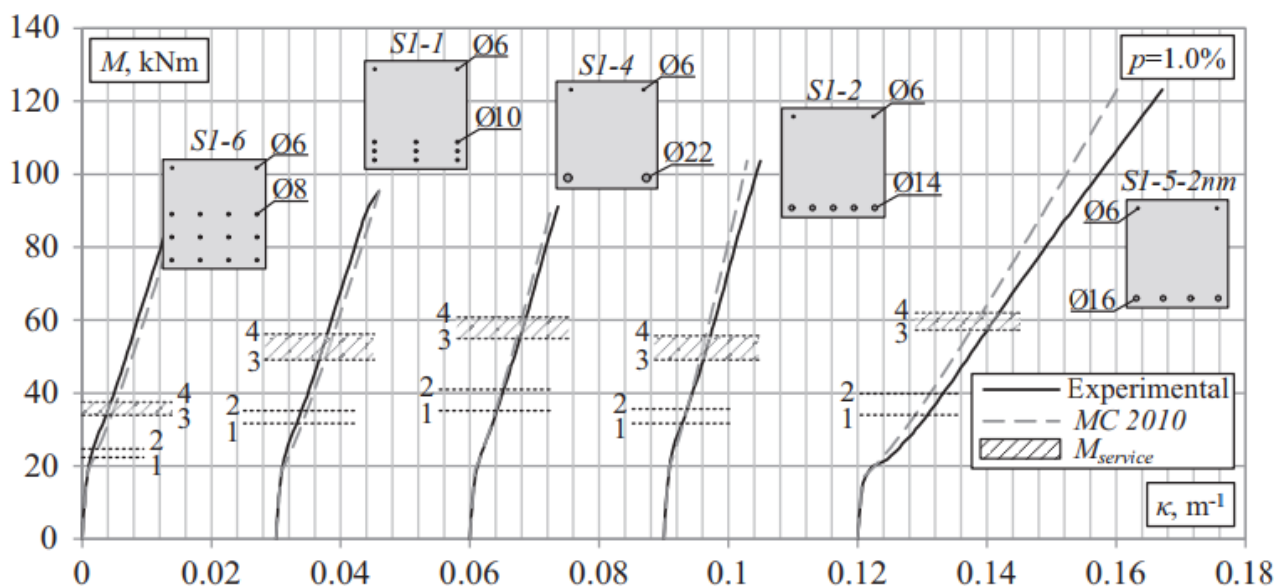
Iš eksperimentinės įlinkių diagramos (29 pav.) matome, kad įlinkiai pasiskirsto pagal funkciją $f(y) = 0,6307y - 10,253$, o lenkimo momentai pagal $f(x) = 1,532x + 16,554$. Pagal 3 skyriuje aprašytą metodą gauti įlinkiai (28 pav.) kinta pagal funkciją $f(y) = 0,5702y - 10,29$, o lenkimo momentai pagal $f(x) = 1,7522x + 18,048$.

Skaičiavimo rezultatai penktajam eksperimentui ir iš jame pateiktos diagramos nustatytos eksperimentinės reikšmės pateiktos 22 lentelėje, o pagal jas sudaryta $M/(1/r)$ diagrama pavaizduota 30 paveiksle. Iš rezultatų matome, kad eksperimento metu buvo gautos tokios pačios kaip teoriniu būdu apskaičiuotos elemento kreivio reikšmės.

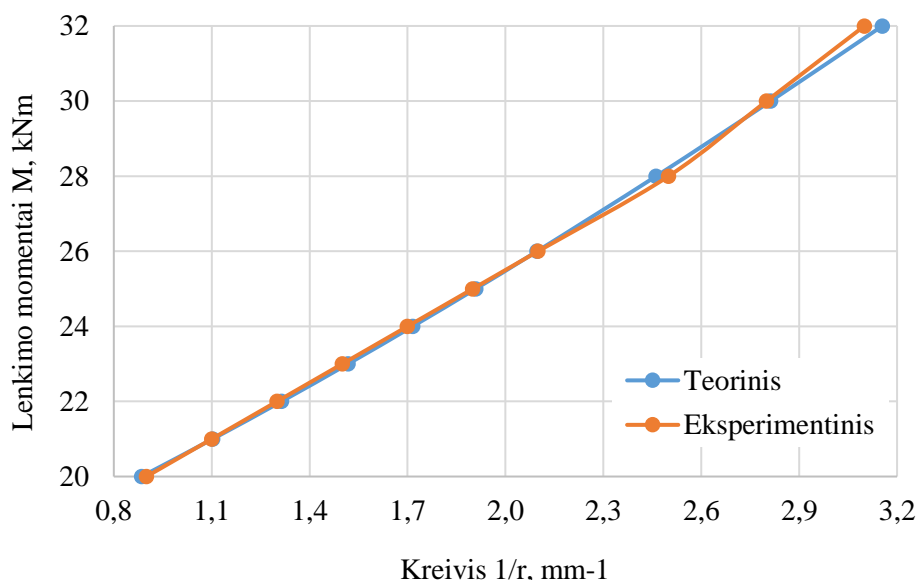
22 lentelė. Vidutinio kreivio ir įlinkio skaičiavimas pagal 2 skyriaus formules S1-4 sijai ir nustatytas eksperimentinis kreivis pagal mokslininko Gribniak [25] diagramą

Eil. Nr.	Lenkimo momentas M, kNm	Nesupleišėjusios dalies kreivis $\frac{1}{r_{un}}, 10^{-3} \frac{1}{m}$	Supleišėjusios dalies kreivis $\frac{1}{r_{cr}}, 10^{-3} \frac{1}{m}$	Vidutinis kreivis $\frac{1}{r_{avg}}, 10^{-3} \frac{1}{m}$	Eksperimentinis kreivis $\frac{1}{r_e}, 10^{-3} \frac{1}{m} *$	Vidutinis įlinkis, d, $10^{-3} m$
$M_{cr} = 19,280 kNm$						
1.	20,00	0,750	2,668	0,885	0,900	0,829
2.	21,00	0,778	2,802	1,103	1,100	1,034
3.	22,00	0,825	2,935	1,314	1,300	1,232
4.	23,00	0,863	3,069	1,518	1,500	1,423
5.	24,00	0,900	3,202	1,716	1,700	1,608
6.	25,00	0,938	3,335	1,909	1,900	1,789
7.	26,00	0,975	3,469	2,097	2,100	1,966
8.	28,00	1,051	3,736	2,462	2,500	2,308
9.	30,00	1,126	4,003	2,813	2,800	2,638
10.	32,00	1,201	4,269	3,155	3,100	2,957

PASTABA. * Nustatyta tik apytikslė reikšmė naudojantis mokslininko pateikta diagrama.



30 pav. Elemento kreivio (x ašis) ir lenkimo momento (y ašis) diagrama pagal mokslininką Gribniak [25]. Nagrinėjama diagrama su žymeniu „S1-4“



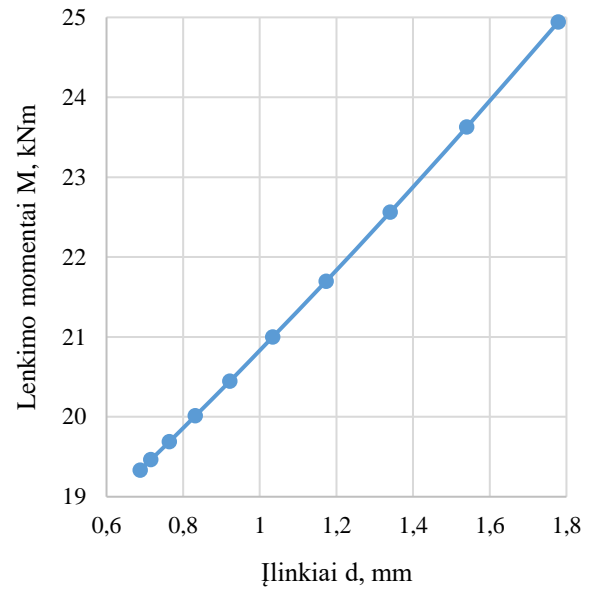
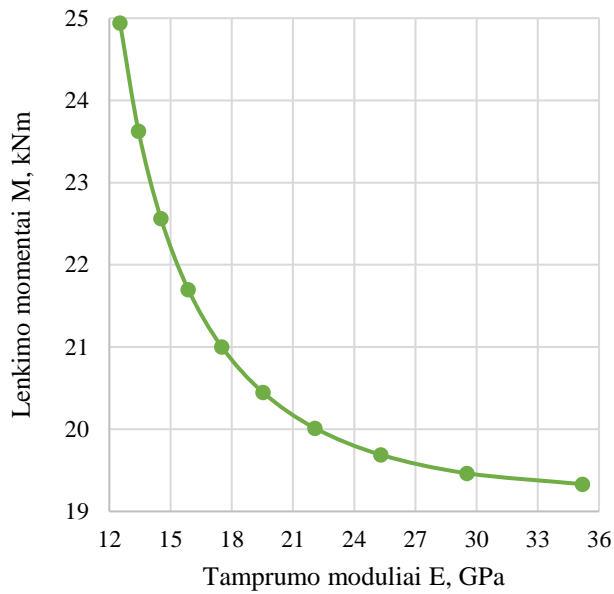
31 pav. Penktajam eksperimentui pagal Eurokodo 2 gautas teorines reikšmes ir gautas eksperimentiškai sudaryta $M/(1/r)$ diagrama

Pagal 3 skyriuje aprašytą metodą gauti rezultatai pateikti 22 lentelėje, o pagal juos sudarytos M/E ir M/d diagramos pavaizduotos 32 paveiksle.

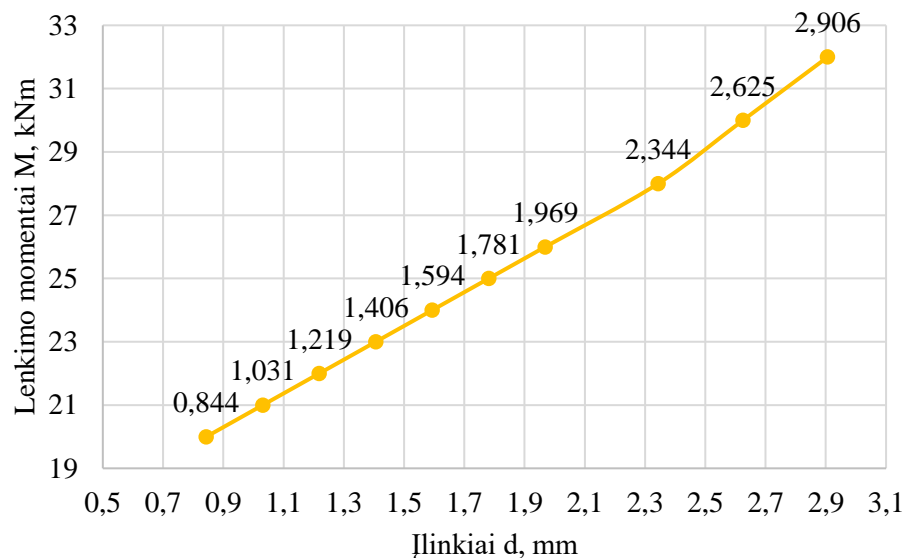
23 lentelė. MATLAB [22] programa gauti rezultatai penktajam eksperimentui (S1-4 sija)

Ruožo žymuo (nr.)	Ruožo ilgis, m	Lenkimo momentas M, kNm	Nesupleišėjusios dalies kreivis $\frac{1}{r_{un}}, 10^{-4} \frac{1}{m}$	Supleišėjusios dalies kreivis $\frac{1}{r_{cr}}, 10^{-3} \frac{1}{m}$	Įlinkis, $d, 10^{-3}m$	Tamprumo modulis E, GPa
1.	1,429	19,331	7,253	2,579	0,688	35,195
2.	1,357	19,464	7,303	2,597	0,716	29,528
3.	1,286	19,689	7,387	2,627	0,764	25,311

4.	1,214	20,013	7,509	2,670	0,832	22,077
5.	1,143	20,446	7,671	2,728	0,922	19,539
6.	1,071	21,001	7,880	2,802	1,034	17,513
7.	1,000	21,698	8,141	2,895	1,173	15,873
8.	0,929	22,561	8,465	3,010	1,340	14,533
9.	0,857	23,627	8,865	3,152	1,540	13,432
10.	0,786	24,943	9,358	3,328	1,779	12,526



32 pav. Pagal penktojo eksperimento duomenis gautos diagramos. Kairėje - lenkimo momentų ir tamprumo modulių priklausomybė (M/E), dešinėje – lenkimo momentų ir įlinkių priklausomybė (M/d)



33 pav. Pagal mokslininko Gribniak [25] lenkimo momentų ir kreivių diagramos reikšmės sudaryta nauja lenkimo momentų ir įlinkių priklausomybė

Iš eksperimentinės įlinkių diagramos (33 pav.) matome, kad įlinkiai pasiskirsto pagal funkciją $f(y) = 0,1749y - 2,6176$, o lenkimo momentai pagal $f(x) = 5,6996x + 15,001$. Pagal 3 skyriuje

aprašytą metodą gauti įlinkiai (32 pav.) kinta pagal funkciją $f(y) = 0,1954y - 3,0785$, o lenkimo momentai pagal $f(x) = 5,1146x + 15,76$.

Jog lengviau suvogtume gautus rezultatus, apibendriname kiekvieną eksperimentą. Pirmasis eksperimentas pagal Tinoco [4] su B1 sija:

- apskaičiuoti teoriniai elemento įlinkiai gauti didesni lyginant su eksperimentiniais rezultatais;
- pagal 3 skyriaus metodą apskaičiuoti įlinkiai kinta pagal $f(y) = 0,3471y - 1,4907$ funkciją, o lenkimo momentai pagal $f(x) = 2,8786x + 4,2952$ funkciją.
- eksperimentiniai įlinkiai kinta pagal $f(y) = 0,2221y - 0,8585$ funkciją, o lenkimo momentai pagal $f(x) = 4,4977x + 3,874$ funkciją.

Antrasis eksperimentas pagal Slaitą [5] su BS-0 sija:

- apskaičiuoti teoriniai elemento įlinkiai gauti mažesni lyginant su eksperimentiniais rezultatais ir tai galėjo nutikti dėl to, kad eksperimentiniai rezultatai nustatyti tik apytiksliai iš diagramos, o tai nėra tikslios įlinkių reikšmės, dėl netinkamai pateikto betono tamprumo modulio, nes jį sumažinus gaunamos panašesnės reikšmės arba dėl skirtingo pleišėjimo momento. Taip pat, galima priežastis – atsiradusios deformacijos atramose;
- pagal metodą apskaičiuoti rezultatai atitinka 22 paveiksle pavaizduotus kaip „Proposed“, o ne „Experimental“ kreive pavaizduotus rezultatus, todėl galime teigti, kad 3 skyriaus ir šio mokslininko metodai iš esmės atitinka;
- pagal 3 skyriaus metodą apskaičiuoti įlinkiai kinta pagal $f(y) = 0,3252y - 3,3534$ funkciją, o lenkimo momentai pagal $f(x) = 3,0733x + 10,315$ funkciją;
- eksperimentiniai įlinkiai kinta pagal $f(y) = 0,2952y - 1,506$ funkciją, o lenkimo momentai pagal $f(x) = 3,3741x + 5,184$ funkciją.

Trečiasis eksperimentas pagal Kaklauską [23] su S3-2-3 sija:

- apskaičiuoti teoriniai elemento įlinkiai gauti didesni lyginant su eksperimentiniais rezultatais;
- pagal 3 skyriaus metodą apskaičiuoti įlinkiai kinta pagal $f(y) = 0,5449y - 9,1362$ funkciją, o lenkimo momentai pagal $f(x) = 1,8335x + 16,768$ funkciją;
- eksperimentiniai įlinkiai kinta pagal $f(y) = 0,5241y - 9,2165$ funkciją, o lenkimo momentai pagal $f(x) = 1,8808x + 17,663$ funkciją.

Ketvirtasis eksperimentas pagal Meškėną [24] su S3-PC2 sija:

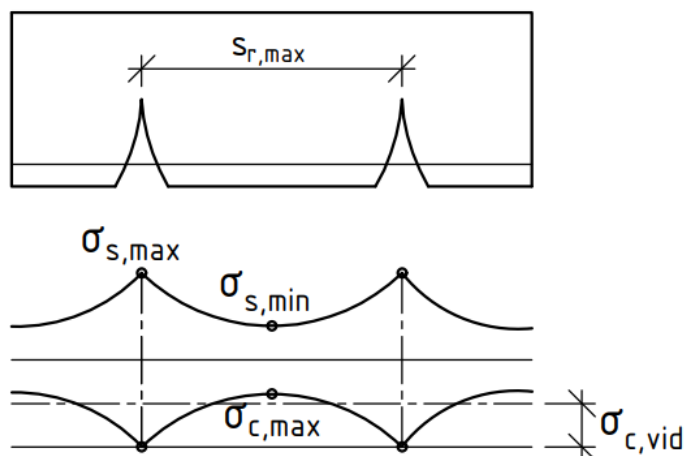
- apskaičiuoti teoriniai elemento įlinkiai gauti mažesni lyginant su eksperimentiniais rezultatais ir tai galėjo nutikti dėl to, kad eksperimentiniai rezultatai nustatyti tik apytiksliai iš diagramos, o tai nėra tikslios įlinkių reikšmės, dėl netinkamai pateikto betono tamprumo modulio, nes jį sumažinus gaunamos panašesnės reikšmės arba dėl skirtingo pleišėjimo momento. Taip pat, galima priežastis – atsiradusios deformacijos atramose;
- pagal 3 skyriaus metodą apskaičiuoti įlinkiai kinta pagal $f(y) = 0,5702y - 10,29$ funkciją, o lenkimo momentai pagal $f(x) = 1,7522x + 18,048$ funkciją;
- eksperimentiniai įlinkiai kinta pagal $f(y) = 0,6307y - 10,253$ funkciją, o lenkimo momentai pagal $f(x) = 1,532x + 16,554$ funkciją.

Penktasis eksperimentas pagal Gribniak [5] su S1-4 sija:

- apskaičiuoti teoriniai elemento įlinkiai gauti lygūs eksperimentiniais rezultatais;
- pagal 3 skyriaus metodą apskaičiuoti įlinkiai kinta pagal $f(y) = 0,1954y - 3,0785$ funkciją, o lenkimo momentai pagal $f(x) = 5,1146x + 15,76$ funkciją;
- eksperimentiniai įlinkiai kinta pagal $f(y) = 0,1749y - 2,6176$ funkciją, o lenkimo momentai pagal $f(x) = 5,6996x + 15,001$ funkciją.

5. Elemento plyšio pločio apskaičiavimo metodas

Šiame skyriuje bus glaustai aprašytas metodas, kaip pagal turimus rezultatus būtų galima apskaičiuoti elemento plyšio plotį, nes šios metodikos platus išnagrinėjimas reikalauja nemažai laiko ir gali būti atliekamas kaip atskiras magistro darbas. Skaičiavimo schema pavaizduota 34 paveiksle.



34 pav. Plyšio pločio skaičiavimo schema

Užsидуodame įtempius, atsiradusius betone, kaip parabolės funkciją:

$$\sigma_c = \frac{4 \cdot \sigma_{c,max} \cdot (s_r \cdot x - x^2)}{s_r^2}, \quad (5.1)$$

čia $\sigma_{c,max}$ – maksimalūs įtempiai betone;

s_r – atstumas tarp plyšių;

x – gniuždomos zonos aukštis.

Jeigu įtempiai betone σ_c pasiskirsto kaip 41 paveiksle, vidutiniai įtempiai tempiamame betone gali būti apskaičiuojami pagal formulę:

$$\sigma_{c,vid} = \frac{2}{3} \cdot \sigma_{c,max}; \quad (5.2)$$

Remiantis *Eurokodu 2*, lenkiamoms sijoms efektyvusis tempiamos zonos juostos aukštis apskaičiuojamas pagal formulę:

$$h_{c,eff} = \min \left\{ 2,5 \cdot a_s; \frac{h-x}{3} \right\}; \quad (5.3)$$

čia a_s – atstumas nuo elemento krašto iki armatūros centro;

h – elemento aukštis.

Apskaičiuojant elemento gniuždomos zonos aukštį pjūvyje tarp plyšių, taikoma prielaida, kad gniuždoma zona dirba tampriai, o tempiama – tampriai plastiškai. Tuomet jėgų pusiausvyros lygtis:

$$\frac{1}{2} \varepsilon_c \cdot E_c \cdot b \cdot x = \varepsilon_{ct} \cdot E_{ct} \cdot b \cdot (h - x) + \varepsilon_s \cdot E_s \cdot A_s; \quad (5.4)$$

čia $\varepsilon_c, \varepsilon_{ct}, \varepsilon_s$ – gniuždomoji, tamprioji ir tampriai plastinė deformacijos;

E_c, E_{ct}, E_s – betono tamprumo moduliai;

b – sijos plotis;

Pusiausvyros lygtyje, pateiktoje 5.4 formulėje galioja sąryšis:

$$\frac{\varepsilon_{ct}}{h-x} = \frac{\varepsilon_s}{d-x} = \frac{\varepsilon_c}{x}; \quad (5.5)$$

Šioje nagrinėjamoje zonoje elemento kreivis atitinka vidutinį kreivį, apskaičiuotą pagal betono deformacijų modelį E_t . Tokiu atveju santykis $\frac{\varepsilon_c}{x}$ turi atitikti santykį $\frac{2\varepsilon_c'}{h}$.

Lenkimo momentų pusiausvyros lygtis:

$$M = \frac{1}{2} \cdot \varepsilon_c \cdot E_c \cdot b \cdot x \cdot \left(d - \frac{x}{3}\right) - \varepsilon_{ct} \cdot E_{ct} \cdot b \cdot (h - x) \cdot \left(\frac{h-x}{2} - a_s\right); \quad (5.6)$$

Apskaičiavus gniuždomos zonos aukštį x ir tamprumo modulį E_{ct} galime apskaičiuoti vidutinius įtempius betone:

$$\sigma_{c,vid} = \varepsilon_{ct} \cdot E_{ct}; \quad (5.7)$$

Tuomet vidutiniai įtempiai armatūroje apskaičiuojami pagal formulę:

$$\sigma_{s,vid} = \frac{\sigma_{c,max} \cdot A_s - \sigma_{c,vid} \cdot b \cdot h_{c,eff}}{A_s}; \quad (5.8)$$

čia A_s – armatūros skerspjūvio plotas.

Vidutinė armatūros deformacija apskaičiuojama pagal formulę:

$$\varepsilon_{sm} = \frac{\sigma_{s,vid}}{E_s}; \quad (5.9)$$

Vidutinė betono deformacija tarp plyšių apskaičiuojama pagal formulę:

$$\varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_{c,vid}}{E_{ct}}; \quad (5.10)$$

Turint vidutines deformacijas, plyšio plotis gali būti apskaičiuojamas pagal Kelpšos [27] formulę:

$$w_k = (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \cdot s_r; \quad (5.11)$$

čia ε_{sm} – vidutinė armatūros deformacija, kuri atsirado tarp plyšių;

ε_{cm} – vidutinė betono deformacija, kuri atsirado tarp plyšių;

s_r – tarpas tarp plyšių.

Išvados

1. Atlikus literatūros analizę pastebėta, kad nėra pateiktos metodikos, kaip apskaičiuoti vidutinius įtempius supleišėjusiuose ruožuose, o pateiktas tik vidutinių kreivių skaičiavimas. Nuspręsta sudaryti skaičiuojamąjį modelį, kuris įvertintų skirtinguose ruožuose tamprumo modulius bei vidutinius įtempius.
2. Lyginant teorinio skaičiavimo pagal *Eurokodą 2* maksimalias kreivio reikšmes supleišėjusiam ruože su vidutinėmis reikšmėmis, gauname ties sijos viduriu didelį skirtumą, o ties sijos atrama – 2 kartų skirtumą. Toks maksimalių ir vidutinių kreivių santykis pastebimas ir skaičiuojamame modelyje. Tuo tarpu lyginant skaičiuojamojo metodo ir mokslininkų eksperimentuose gautas maksimalias kreivio reikšmes supleišėjusiam ruože su vidutinėmis reikšmėmis, gauname ties sijos viduriu nuo 4 iki 8 kartų skirtumą, o ties sijos atrama – 2 kartų skirtumą.
3. Lyginant eksperimentų įlinkių reikšmes su skaičiuojamojo metodo, gautas analogiškas skirtumas kaip lyginant su teorinėmis *Eurokodo 2* reikšmėmis.
4. Elemento kreivis įtakoja jo standumą, nes nuo jo priklauso įlinkiai ir deformacijų moduliai. Kreiviui padidėjus 1 proc., deformacijų modulis sumažėja 24 proc.
5. Atliekant skaičiavimus, pastebėta, kad pleišėjimo momento įtaka yra svarbi skaičiuojant elemento įlinkį, nes kintant pleišėjimo momentui, kinta ir įlinkis. Pleišėjimo momentui padidėjus apie 30 proc., elemento įlinkis vidutiniškai padidėja nuo 2 iki 6 kartų, priklausomai koks yra pradinis pleišėjimo momentas. Taip pat, pleišėjimo momentas tiesiogiai priklauso nuo sijos pločio, aukščio bei pasirinktos betono klasės, pavyzdžiui, sijos pločiui padidėjus per 1,5 karto, proporcingai padidės ir momentas – per 1,5 karto, o padidinus sijos aukštį per 1,5 karto, tuomet pleišėjimo momentas padidėja per 2,25 karto.
6. Analitiškai išnagrinėjus tamprumo modulių kitimą, buvo sudarytas skaičiuojamasis modelis, kuri aprašo deformacijų modulių kitimą priklausomai nuo elemento kreivio. Taip pat, šis skaičiavimo metodas gali būti taikomas elementų plyšio pločio skaičiavimui.

Literatūros sąrašas

1. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [LST EN 1992-1-1], *Eurokodas 2. Gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas. 1-1 dalis. Bendrosios ir pastatų taisyklės*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2011.
2. LIETUVOS RESPUBLIKOS APLINKOS MINISTERIJA. STR 2.05.05:2005, *Betoninių ir gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas*. Valstybės žinios, 2005-02-05, Nr. 17-550. [žiūrėta 2021-03-05]. Prieiga per:
<https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/TAR.C8C4EF7FF7AE/rTLfZhDSux>.
3. HAMRAT, Mostefa, Farid BOUZIADI, Bensaid BOULEKBACHE, Tahar H. DAOUADJI, Selma CHERGUI, Abderahim LABED ir Sofiane AMZIANE. Experimental and numerical investigation on the deflection behavior of pre-cracked and repaired reinforced concrete beam with fiber-reinforced polymer. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. 2020, **249**, 118745 [žiūrėta 2021-03-05], ISSN 0950-0618. Prieiga per:
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118745>.
4. TINOCO, Isaque Vargas ir Roberto Caldas de Andrade PINTO. Evaluation of stiffness loss of reinforced concrete beams using the diffuse ultrasound method. *Ultrasonics* [interaktyvus]. 2021, **117**, 106540 [žiūrėta 2021-11-30], ISSN 0041-624X. Prieiga per:
<https://doi.org/10.1016/j.ultras.2021.106540>.
5. SLAITAS, Justas ir Juozas VALIVONIS. Full moment-deflection response and bond stiffness reduction of RC elements strengthened with prestressed FRP materials. *Composite Structures* [interaktyvus]. 2021, **260**, 113265 [žiūrėta 2021-11-30], ISSN 0263-8223. Prieiga per:
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113265>.
6. O'FLAHERTY, Fin ir Elena BROWNE. A proposal to modify the moment coefficient in Eurocode 2 for predicting the residual strength of corroded reinforced concrete beams. *Engineering Structures* [interaktyvus]. 2019, **19**, 324-339 [žiūrėta 2021-03-05], ISSN 0141-0296. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.05.039>.
7. MARČIUKAITIS, Gediminas. *Statybinės konstrukcijos ir jų projektavimas pagal euronormas pagrindai: vadovėlis*. Vilnius: Technika, 2010. ISBN 9789955286769.
8. BHATT, Prabhakara. *Prestressed concrete design to Eurocodes*. London: CRC Press, 2011. ISBN: 9780429206283.
9. HIGGINS, Lee, John P. FORTH, Anne NEVILLE, Rod JONES ir Trevor HODGSON. Behaviour of cracked reinforced concrete beams under repeated and sustained load types. *Engineering Structures* [interaktyvus]. 2013, **56**, 457-465 [žiūrėta 2021-03-05]. ISSN . Prieiga per:
<https://www.sciencedirect.com>.
10. VAIŠNORAS, Mantas. *Gelžbetoninių lenkiamųjų konstrukcijų, armuotųjų nemetaline armatūra, įlinkio ir pleišėjimo tyrimas: baigiamasis magistro darbas* [interaktyvus]. Vilniaus Gedimino technikos universitetas, 2015 [žiūrėta 2021-03-10]. Prieiga per: <http://vb.vgtu.lt>.
11. MOSLEY, William H., John H. BUNGEY ir Ray HULSE. *Reinforced concrete design to Eurocode 2. 7th ed.* Basingstoke: Palgrave Macmillan, 2012. ISBN 9780230302853.
12. RUMŠYS, Deividas. *Konstruktinio armuoto lengvojo betono lenkiamųjų elementų deformacijų analizės modelis: daktaro disertacija*. Vilnius, Technika, 2019 [žiūrėta 2021-03-14]. ISBN 9786094761720. Prieiga per: <http://dspace.vgtu.lt/handle/1/3794>.

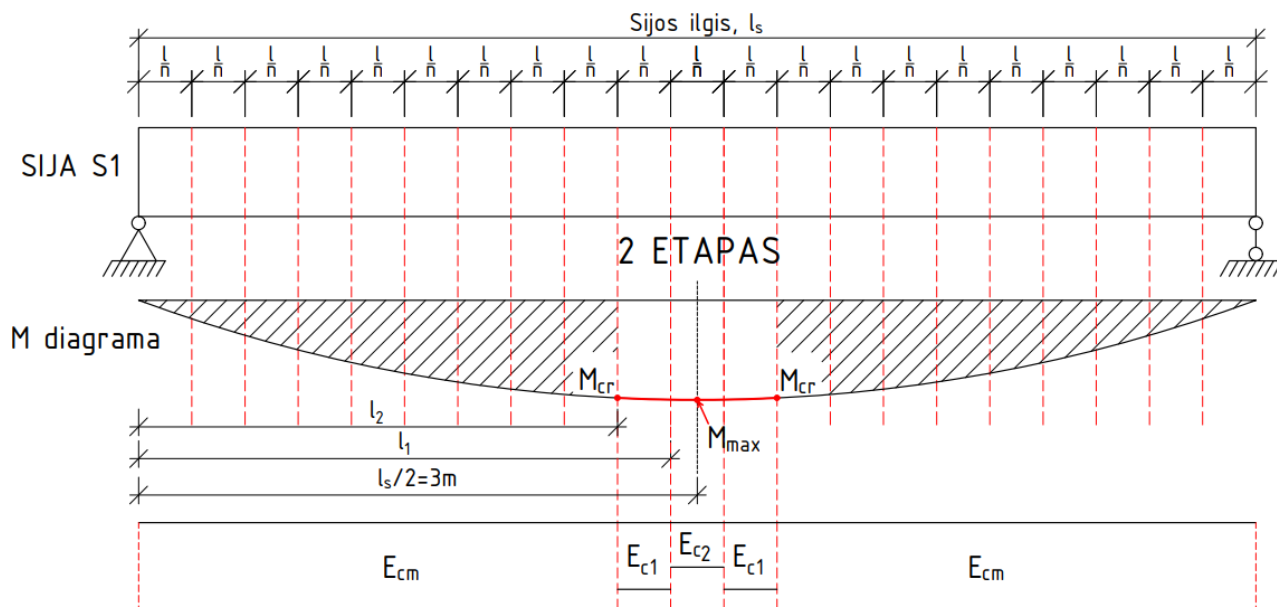
13. MARČIUKAITIS, Gediminas. *Iš anksto įtemptas gelžbetonis*. Vilnius: Technika, 2012. ISBN 9786094571794.
14. JUKNYS, Mantas. *Tempiamųjų gelžbetoninių elementų diskrečių plyšių modelio fizikinių parametrų eksperimentiniai ir skaitiniai tyrimai: daktaro disertacija*. Vilnius, Technika, 2017 [žiūrėta 2021-03-14]. ISBN 9786094760273. Prieiga per: <http://dspace.vgtu.lt/handle/1/3509>.
15. SENIŪNAS, Algis. Calculation methods analysis of cracked reinforced concrete bending elements curvatures *Science – Future of Lithuania* [interaktyvus]. 2011, **3**(2) [žiūrėta 2021-03-10]. ISSN 2029-2252. Prieiga per: <https://doi.org/10.3846/mla.2011.039>.
16. LIETUVOS RESPUBLIKOS APLINKOS MINISTERIJA. STR 2.05.04:2003, *Poveikiai ir apkrovos*. Valstybės žinios, 2003-06-20, Nr. 59-2683. [žiūrėta 2021-03-05]. Prieiga per: <https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/TAR.E5D5DC3C496B/QggipAbUWC>.
17. MIŠKELIS, Šarūnas. *Iš anksto įtemptų surenkamųjų gelžbetoninių sijų, sujungtų tarpusavyje standžiu mazgu, darbo analizė: baigiamasis magistro darbas* [interaktyvus]. Vilniaus Gedimino technikos universitetas, 2011 [žiūrėta 2021-03-10]. Prieiga per: <http://talpykla.elaba.lt>.
18. OLIVEIRA, Miguel J., António B. RIBEIRO ir Fernando G. BRANCO. Shrinkage of self-compacting concrete. A comparative analysis. *Journal of Building Engineering* [interaktyvus]. 2017, **9**, 117-124 [žiūrėta 2021-09-15], ISSN 2352-7102. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2016.12.002>.
19. WANG, Qinghe, Yue GENG, Yuyin WANG ir Huan ZHANG. Drying shrinkage model for recycled aggregate concrete accounting for the influence of parent concrete. *Engineering Structures* [interaktyvus]. 2020, **202**, 109888 [žiūrėta 2021-09-15], ISSN 0141-0296. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109888>.
20. CUESTA, Víctor Revilla, Luís EVANGELISTA, Jorge de BRITO, Vanesa Ortega-LÓPEZ ir Juan M. MANSO. Effect of the maturity of recycled aggregates on the mechanical properties and autogenous and drying shrinkage of high-performance concrete. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. 2021, **299**, 124001 [žiūrėta 2021-09-20], ISSN 0950-0618. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124001>.
21. SCHLAPPAL, Thomas, Johannes KALLIAUER, Markus VILL, Susanne Gmainer, Herbert A. MANG, Josef EBERHARDSTEINER ir Bernhard L.A. PICHLER. Serviceability limits of reinforced concrete hinges. *Engineering Structures* [interaktyvus]. 2020, **208**, 109861 [žiūrėta 2021-10-04], ISSN 0141-0296. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109861>.
22. MATHWORKS. Matlab. R2016b versija [programa]. Masačiusetas: MathWorks, 2016 [žiūrėta 2021-11-31].
23. KAKLAUSKAS, Gintaris ir Aleksandr SOKOLOV. A peculiar value of M to Mcr ratio: Reconsidering assumptions of curvature analysis of reinforced concrete beams. *Applications in Engineering Science* [interaktyvus]. 2021, **7**, 100053 [žiūrėta 2021-12-01], ISSN 2666-4968. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.apples.2021.100053>.
24. MEŠKĖNAS, Adas, Regimantas RAMANAUSKAS, Aleksandr SOKOLOV, Darius BAČINSKAS ir Gintaris KAKLAUSKAS. Residual stress – strain relations inversely derived from experimental moment – curvature response of RC beams with fibres compared to the recommendations of design codes. *Structures* [interaktyvus]. 2021, **34**, 3363-3375 [žiūrėta 2021-12-01], ISSN 2352-0124. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.09.070>.
25. GRIBNIAK, Viktor, Alejandro Pérez CALDENTEY, Gintaris KAKLAUSKAS, Arvydas RIMKUS ir Aleksandr SOKOLOV. Effect of arrangement of tensile reinforcement on flexural

- stiffness and cracking. *Engineering Structures* [interaktyvus]. 2016, **124**, 418-428 [žiūrėta 2021-12-01], ISSN 0141-0296. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.06.026>.
26. SHAMASS, Rabee ir K.A. CASHELL. Experimental investigation into the flexural behaviour of basalt FRP reinforced concrete members. *Engineering Structures* [interaktyvus]. 2020, **220**, 110950 [žiūrėta 2021-12-01], ISSN 0141-0296. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110950>.
27. KELPŠA, Šarūnas, Mindaugas AUGONIS, Mindaugas DAUKŠYS ir Algirdas AUGONIS. Analysis of crack width calculation of steel fibre and ordinary reinforced concrete flexural members. *Journal of sustainable architecture and civil engineering* [interaktyvus]. 2014, **6**(1) [žiūrėta 2021-12-01], ISSN 2029-9990. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.5755/j01.sace.6.1.6336>.

Priedai

1 Priedas. Tarpiniai sijos tamprumo modulių skaičiavimai, sudalinus siją į 21 ruožą

Šiame priede bus pateikiami tarpiniai – nuo antrojo iki ketvirtojo ir nuo šeštojo iki devintojo ruožų skaičiavimai. Skaičiavimo schema antrajame etape pavaizduota 35 paveiksle.



35 pav. Antrojo etapo skaičiavimo schema, kai siją suskirstyta į 21 nagrinėjamą ruožą

Antrajame etape nesupleišėjusios zonos ilgis pagal 3.14 formulę:

$$l_2 = \frac{a \cdot (n-1)}{2} = \frac{0,2857 \cdot (21-2)}{2} = 2,714 \text{ m};$$

Apskaičiuojame apkrovą antrajai zonai, pagal 3.15 formulę:

$$q_2 = \frac{2 \cdot M_{cr}}{L \cdot l_2 - l_2^2} = \frac{2 \cdot 34,256}{6 \cdot 2,714 - 2,714^2} = 7,682 \text{ kN/m};$$

čia l_2 – nagrinėjamos zonos ilgis antrajame etape, apskaičiuotas pagal 3.14 formulę.

Apskaičiuojame naują lenkimo momentą, kuris atsiranda nuo q_2 apkrovos pagal 2.1 formulę:

$$M_2 = \frac{q_2 \cdot L^2}{8} = \frac{7,682 \cdot 6^2}{8} = 34,570 \text{ kNm};$$

Elemento įlinkis nuo M_2 lenkimo momento, pagal 3.16 formulę:

$$d_{el,2} = \frac{5}{48} \cdot \frac{M_2 \cdot L^2}{E_{cm} \cdot I_{uc}} = \frac{5}{48} \cdot \frac{34,570 \cdot 10^3 \cdot 6^2}{34,65 \cdot 10^9 \cdot 26,578 \cdot 10^{-4}} = 1,408 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 1,408 \text{ mm};$$

Antrajam ruožui apskaičiuojamas elemento kreivis nesupleišėjusiai zonai pagal 3.17 formulę:

$$\frac{1}{r_{uc,2}} = \frac{M_2}{E_{cm} \cdot I_{uc}} = \frac{34,570 \cdot 10^3}{34,65 \cdot 10^9 \cdot 26,578 \cdot 10^{-4}} = 3,754 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{m}};$$

Apskaičiuojamas elemento kreivis supleišėjusiai zonai pagal 3.18 formulę:

$$\frac{1}{r_{cr,2}} = \frac{M_2}{E_{cm} \cdot l_{cr}} = \frac{34,570 \cdot 10^3}{34,65 \cdot 10^9 \cdot 4,309 \cdot 10^{-4}} = 2,316 \cdot 10^{-3} \frac{1}{m};$$

Apskaičiuojamas pasiskirstymo pagal 3.19 formulę:

$$\zeta_2 = 1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_2} \right)^2 = 1 - \left(\frac{34,256}{34,570} \right)^2 = 0,0181;$$

Apskaičiuojamas naujas elemento įlinkis nagrinėjamoje zonoje pagal 3.20 formulę:

$$d_2 = \left(\zeta_2 \cdot \frac{1}{r_{cr,2}} + (1 - \zeta_2) \cdot \frac{1}{r_{uc,2}} \right) \cdot \frac{5 \cdot L^2}{48} = (0,0181 \cdot 2,316 \cdot 10^{-3} + (1 - 0,0181) \cdot 3,754 \cdot 10^{-4}) \cdot \frac{5 \cdot 6^2}{48} = 1,539 \cdot 10^{-3} m = 1,539 mm;$$

Pagal 3.10 formulę apskaičiuojamas antrasis tamprumo modulis:

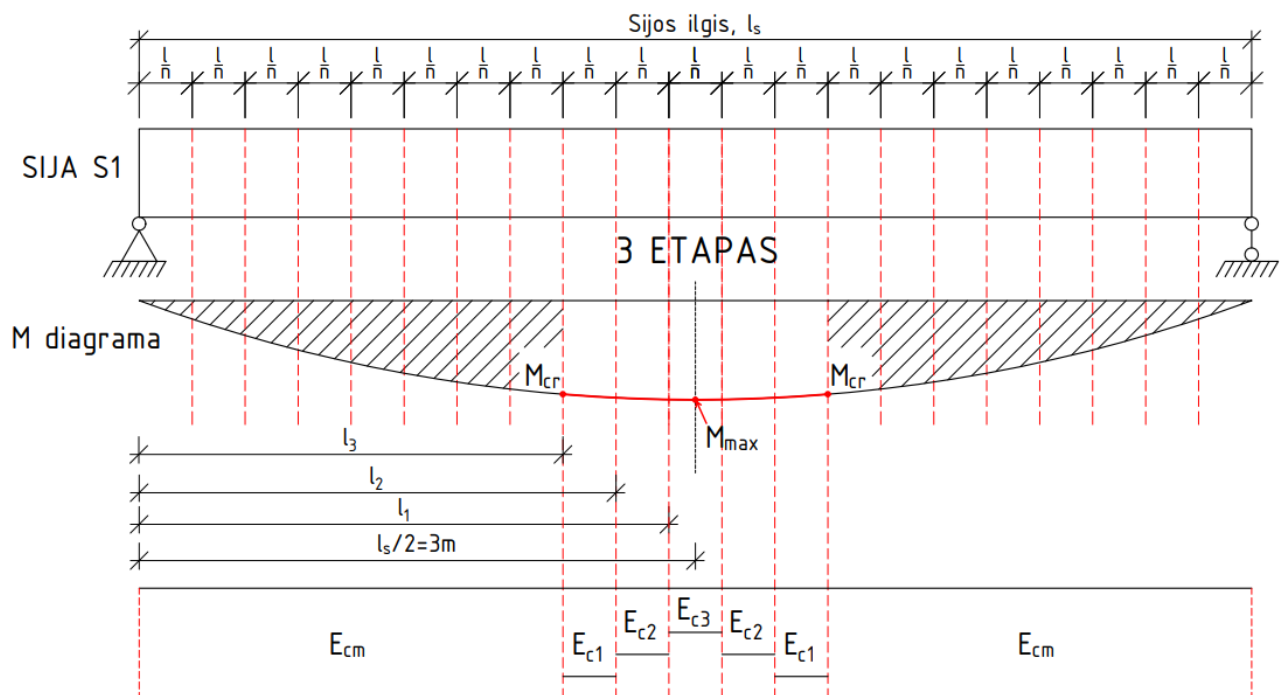
$$E_{c2} = \frac{\frac{5 \cdot L^4}{192} - \frac{L \cdot l_1^3}{3} + \frac{l_1^4}{4}}{\frac{2 \cdot l_{uc} \cdot d_2}{q_2} - \frac{1}{E_{cm}} \left(\frac{L \cdot l_2^3}{3} - \frac{l_2^4}{4} \right) - \sum_{j=1}^{i-1} \left(\frac{L \cdot l_{j+1}^3}{3} - \frac{l_{j+1}^4}{4} - \frac{L \cdot l_j^3}{3} + \frac{l_j^4}{4} \right)} \cdot \frac{1}{E_{c1}} =$$

$$= \frac{\frac{5 \cdot 6^4}{192} - \frac{6 \cdot 2,857^3}{3} + \frac{2,857^4}{4}}{\frac{2 \cdot 26,578 \cdot 10^{-4} \cdot 1,539 \cdot 10^{-3}}{7,682 \cdot 10^3} - \frac{1}{34,65 \cdot 10^9} \left(\frac{6 \cdot 2,714^3}{3} - \frac{2,714^4}{4} \right) - \left(\frac{6 \cdot 2,857^3}{3} - \frac{2,857^4}{4} - \frac{6 \cdot 2,714^3}{3} + \frac{2,714^4}{4} \right)} \cdot \frac{1}{28,636 \cdot 10^9} = 21,149 \cdot 10^9 Pa;$$

Apibendrinus antrąjį etapą gavome:

- tamprumo modulis lygus $E_{c2} = 21,149 GPa$;
- lenkimo momentas lygus $M_2 = 34,570 kNm$.

Turint antrojo etapo reikšmes galime prieiti prie sekančio etapo, kuriame ieškosime jau trečiojo tamprumo modulio. Nauja skaičiavimo schema pateikta 36 paveiksle.



36 pav. Trečiojo etapo skaičiavimo schema, kai sija suskirstyta į 21 nagrinėjamą ruožą

Trečiajame etape nesupleišėjusios zonos ilgis pagal 3.14 formulę:

$$l_3 = \frac{a \cdot (n-i)}{2} = \frac{0,2857 \cdot (21-3)}{2} = 2,571 \text{ m};$$

Apskaičiuojame apkrovą trečiajai zonai, pagal 3.15 formulę:

$$q_3 = \frac{2 \cdot M_{cr}}{L \cdot l_3 - l_3^2} = \frac{2 \cdot 34,256}{6 \cdot 2,571 - 2,571^2} = 7,771 \text{ kN/m};$$

čia l_3 – nagrinėjamas zonos ilgis trečiajame etape, apskaičiuotas pagal 3.14 formulę.

Apskaičiuojame naują lenkimo momentą, kuris atsiranda nuo q_3 apkrovos pagal 2.1 formulę:

$$M_3 = \frac{q_3 \cdot L^2}{8} = \frac{7,771 \cdot 6^2}{8} = 34,970 \text{ kNm};$$

Elemento įlinkis nuo M_3 lenkimo momento, pagal 3.16 formulę:

$$d_{el,3} = \frac{5}{48} \cdot \frac{M_3 \cdot L^2}{E_{cm} \cdot I_{uc}} = \frac{5}{48} \cdot \frac{34,970 \cdot 10^3 \cdot 6^2}{34,65 \cdot 10^9 \cdot 26,578 \cdot 10^{-4}} = 1,424 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 1,424 \text{ mm};$$

Trečiajam ruožui apskaičiuojamas elemento kreivis nesupleišėjusiai zonai pagal 3.17 formulę:

$$\frac{1}{r_{uc,3}} = \frac{M_3}{E_{cm} \cdot I_{uc}} = \frac{34,970 \cdot 10^3}{34,65 \cdot 10^9 \cdot 26,578 \cdot 10^{-4}} = 3,797 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{m}};$$

Apskaičiuojamas elemento kreivis supleišėjusiai zonai pagal 3.18 formulę:

$$\frac{1}{r_{cr,3}} = \frac{M_3}{E_{cm} \cdot I_{cr}} = \frac{34,970 \cdot 10^3}{34,65 \cdot 10^9 \cdot 4,309 \cdot 10^{-4}} = 2,342 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{m}};$$

Apskaičiuojamas pasiskirstymo koeficientas pagal 3.19 formulę:

$$\zeta_3 = 1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_3} \right)^2 = 1 - \left(\frac{34,256}{34,970} \right)^2 = 0,0404;$$

Apskaičiuojamas naujas elemento įlinkis nagrinėjamoje zonoje pagal 3.20 formulę:

$$d_3 = \left(\zeta_3 \cdot \frac{1}{r_{cr,3}} + (1 - \zeta_3) \cdot \frac{1}{r_{uc,3}} \right) \cdot \frac{5 \cdot L^2}{48} = (0,0404 \cdot 2,342 \cdot 10^{-3} + (1 - 0,0404) \cdot 3,797 \cdot 10^{-4}) \cdot \frac{5 \cdot 6^2}{48} = 1,721 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 1,721 \text{ mm};$$

Pagal 3.10 formulę apskaičiuojamas trečiasis tamprumo modulis:

$$E_{c3} = \frac{\frac{5 \cdot L^4}{192} - \frac{L \cdot l_1^3}{3} + \frac{l_1^4}{4}}{\frac{2 \cdot I_{uc} \cdot d_3}{q_3} - \frac{1}{E_{cm}} \left(\frac{L \cdot l_3^3}{3} - \frac{l_3^4}{4} \right) - \sum_{j=1}^{i-1} \left(\frac{L \cdot l_{j+1}^3}{3} - \frac{l_{j+1}^4}{4} - \frac{L \cdot l_j^3}{3} + \frac{l_j^4}{4} \right) \frac{1}{E_{i-1}}};$$

Kad būtų paprasčiau skaičiuoti išskaidome šią formulę į kelias:

$$\alpha_{c3} = \frac{5 \cdot L^4}{192} - \frac{L \cdot l_1^3}{3} + \frac{l_1^4}{4} = \frac{5 \cdot 6^4}{192} - \frac{6 \cdot 2,857^3}{3} + \frac{2,857^4}{4} = 3,7625;$$

$$\beta_{c3} = \frac{2 \cdot l_{uc} \cdot d_3}{q_3} - \frac{1}{E_{cm}} \cdot \left(\frac{L \cdot l_3^3}{3} - \frac{l_3^4}{4} \right) = \frac{2 \cdot 26,578 \cdot 10^{-4} \cdot 1,721 \cdot 10^{-3}}{7,771 \cdot 10^3} - \frac{1}{34,65 \cdot 10^9} \cdot \left(\frac{6 \cdot 2,571^3}{3} - \frac{2,571^4}{4} \right) = 5,115 \cdot 10^{-10};$$

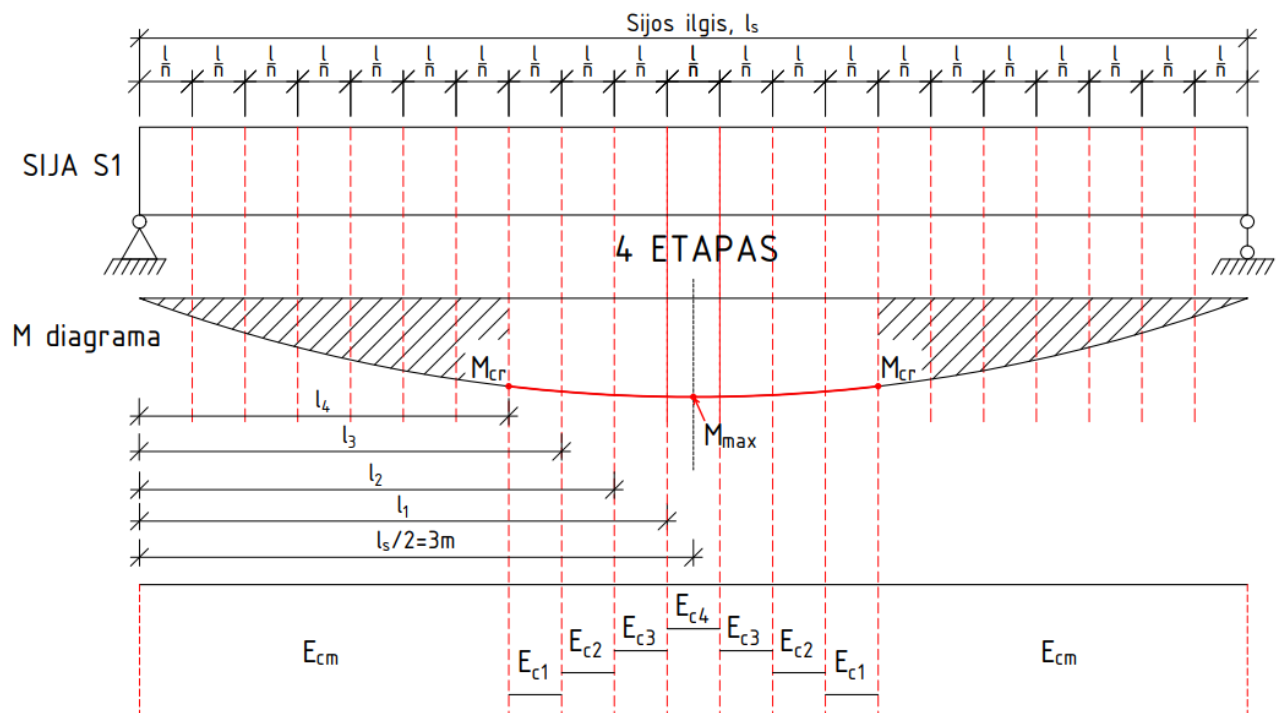
$$\gamma_{c3} = \sum_{j=1}^{i-1} \left(\frac{L \cdot l_{j+1}^3}{3} - \frac{l_{j+1}^4}{4} - \frac{L \cdot l_j^3}{3} + \frac{l_j^4}{4} \right) \cdot \frac{1}{E_{i-1}} = \left(\frac{6 \cdot 2,857}{3} - \frac{2,857^4}{4} - \frac{6 \cdot 2,714^3}{3} + \frac{2,714^4}{4} \right) \cdot \frac{1}{21,149 \cdot 10^9} + \left(\frac{6 \cdot 2,714^3}{3} - \frac{2,714^4}{4} - \frac{6 \cdot 2,571^3}{3} + \frac{2,571^4}{4} \right) \cdot \frac{1}{28,636 \cdot 10^9} = 2,854 \cdot 10^{-10};$$

$$E_{c3} = \frac{\alpha_{c3}}{\beta_{c3} - \gamma_{c3}} = \frac{3,7625}{5,115 \cdot 10^{-10} - 2,854 \cdot 10^{-10}} = 16,646 \cdot 10^9 \text{ Pa};$$

Apibendrinus trečiajį etapą gavome:

- tamprumo modulis lygus $E_{c3} = 16,646 \text{ GPa}$;
- lenkimo momentas lygus $M_3 = 34,970 \text{ kNm}$.

Turint trečiojo etapo reikšmes galime prieiti prie sekančio etapo, kuriame ieškosime jau ketvirtojo tamprumo modulario. Nauja skaičiavimo schema pateikta 37 paveiksle.



37 pav. Ketvirtojo etapo skaičiavimo schema, kai sija suskirstyta į 21 nagrinėjamą ruožą

Ketvirtajam etape nesupleišėjusios zonos ilgis pagal 3.14 formulę:

$$l_4 = \frac{a \cdot (n-i)}{2} = \frac{0,2857 \cdot (21-4)}{2} = 2,429 \text{ m};$$

Apskaičiuojame apkrovą ketvirtajai zonai, pagal 3.15 formulę:

$$q_4 = \frac{2 \cdot M_{cr}}{L \cdot l_4 - l_4^2} = \frac{2 \cdot 34,256}{6 \cdot 2,429 - 2,429^2} = 7,899 \text{ kN/m};$$

čia l_4 – nagrinėjamos zonos ilgis ketvirtajame etape, apskaičiuotas pagal 3.14 formulę.

Apskaičiuojame naują lenkimo momentą, kuris atsiranda nuo q_4 apkrovos pagal 2.1 formulę:

$$M_4 = \frac{q_4 \cdot L^2}{8} = \frac{7,899 \cdot 6^2}{8} = 35,546 \text{ kNm};$$

Elemento įlinkis nuo M_4 lenkimo momento, pagal 3.16 formulę:

$$d_{el,4} = \frac{5}{48} \cdot \frac{M_4 \cdot L^2}{E_{cm} \cdot I_{uc}} = \frac{5}{48} \cdot \frac{35,546 \cdot 10^3 \cdot 6^2}{34,65 \cdot 10^9 \cdot 26,578 \cdot 10^{-4}} = 1,447 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 1,447 \text{ mm};$$

Ketvirtajam ruožui apskaičiuojamas elemento kreivis nesupleišėjusiai zonai pagal 3.17 formulę:

$$\frac{1}{r_{uc,4}} = \frac{M_4}{E_{cm} \cdot I_{uc}} = \frac{35,546 \cdot 10^3}{34,65 \cdot 10^9 \cdot 26,578 \cdot 10^{-4}} = 3,860 \cdot 10^{-4} \frac{1}{m};$$

Apskaičiuojamas elemento kreivis supleišėjusiai zonai pagal 3.18 formulę:

$$\frac{1}{r_{cr,4}} = \frac{M_4}{E_{cm} \cdot I_{cr}} = \frac{35,546 \cdot 10^3}{34,65 \cdot 10^9 \cdot 4,309 \cdot 10^{-4}} = 2,381 \cdot 10^{-3} \frac{1}{m};$$

Apskaičiuojamas pasiskirstymo koeficientas pagal 3.19 formulę:

$$\zeta_4 = 1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_4} \right)^2 = 1 - \left(\frac{34,256}{35,546} \right)^2 = 0,07125;$$

Apskaičiuojamas naujas elemento įlinkis nagrinėjamoje zonoje pagal 3.20 formulę:

$$d_4 = \left(\zeta_4 \cdot \frac{1}{r_{cr,4}} + (1 - \zeta_4) \cdot \frac{1}{r_{uc,4}} \right) \cdot \frac{5 \cdot L^2}{48} = (0,07125 \cdot 2,381 \cdot 10^{-3} + (1 - 0,07125) \cdot 3,860 \cdot 10^{-4}) \cdot \frac{5 \cdot 6^2}{48} = 1,980 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 1,980 \text{ mm};$$

Pagal 3.10 formulę apskaičiuojamas ketvirtasis tamprumo modulis:

$$E_{c4} = \frac{\frac{5 \cdot L^4}{192} - \frac{L \cdot l_1^3}{3} + \frac{l_1^4}{4}}{\frac{2 \cdot I_{uc} \cdot d_4}{q_4} - \frac{1}{E_{cm}} \left(\frac{L \cdot l_4^3}{3} - \frac{l_4^4}{4} \right) - \sum_{j=1}^{i-1} \left(\frac{L \cdot l_{j+1}^3}{3} - \frac{l_{j+1}^4}{4} - \frac{L \cdot l_j^3}{3} + \frac{l_j^4}{4} \right) \cdot \frac{1}{E_{i-1}}};$$

Kad būtų paprasčiau skaičiuoti išskaidome šią formulę į kelias:

$$\alpha_{c4} = \frac{5 \cdot L^4}{192} - \frac{L \cdot l_1^3}{3} + \frac{l_1^4}{4} = \frac{5 \cdot 6^4}{192} - \frac{6 \cdot 2,857^3}{3} + \frac{2,857^4}{4} = 3,7625;$$

$$\beta_{c4} = \frac{2 \cdot I_{uc} \cdot d_4}{q_4} - \frac{1}{E_{cm}} \cdot \left(\frac{L \cdot l_4^3}{3} - \frac{l_4^4}{4} \right) = \frac{2 \cdot 26,578 \cdot 10^{-4} \cdot 1,980 \cdot 10^{-3}}{7,899 \cdot 10^3} - \frac{1}{34,65 \cdot 10^9} \cdot \left(\frac{6 \cdot 2,429^3}{3} - \frac{2,429^4}{4} \right) = 7,569 \cdot 10^{-10};$$

$$\gamma_{c4} = \sum_{j=1}^{i-1} \left(\frac{L \cdot l_{j+1}^3}{3} - \frac{l_{j+1}^4}{4} - \frac{L \cdot l_j^3}{3} + \frac{l_j^4}{4} \right) \cdot \frac{1}{E_{i-1}} = \left(\frac{6 \cdot 2,857}{3} - \frac{2,857^4}{4} - \frac{6 \cdot 2,714^3}{3} + \frac{2,714^4}{4} \right) \cdot \frac{1}{16,646 \cdot 10^9} + \left(\frac{6 \cdot 2,714^3}{3} - \frac{2,714^4}{4} - \frac{6 \cdot 2,571^3}{3} + \frac{2,571^4}{4} \right) \cdot \frac{1}{21,149 \cdot 10^9} + \left(\frac{6 \cdot 2,571^3}{3} - \frac{2,571^4}{4} - \frac{6 \cdot 2,429^3}{3} + \frac{2,429^4}{4} \right) \cdot \frac{1}{28,636 \cdot 10^9} = 4,815 \cdot 10^{-10};$$

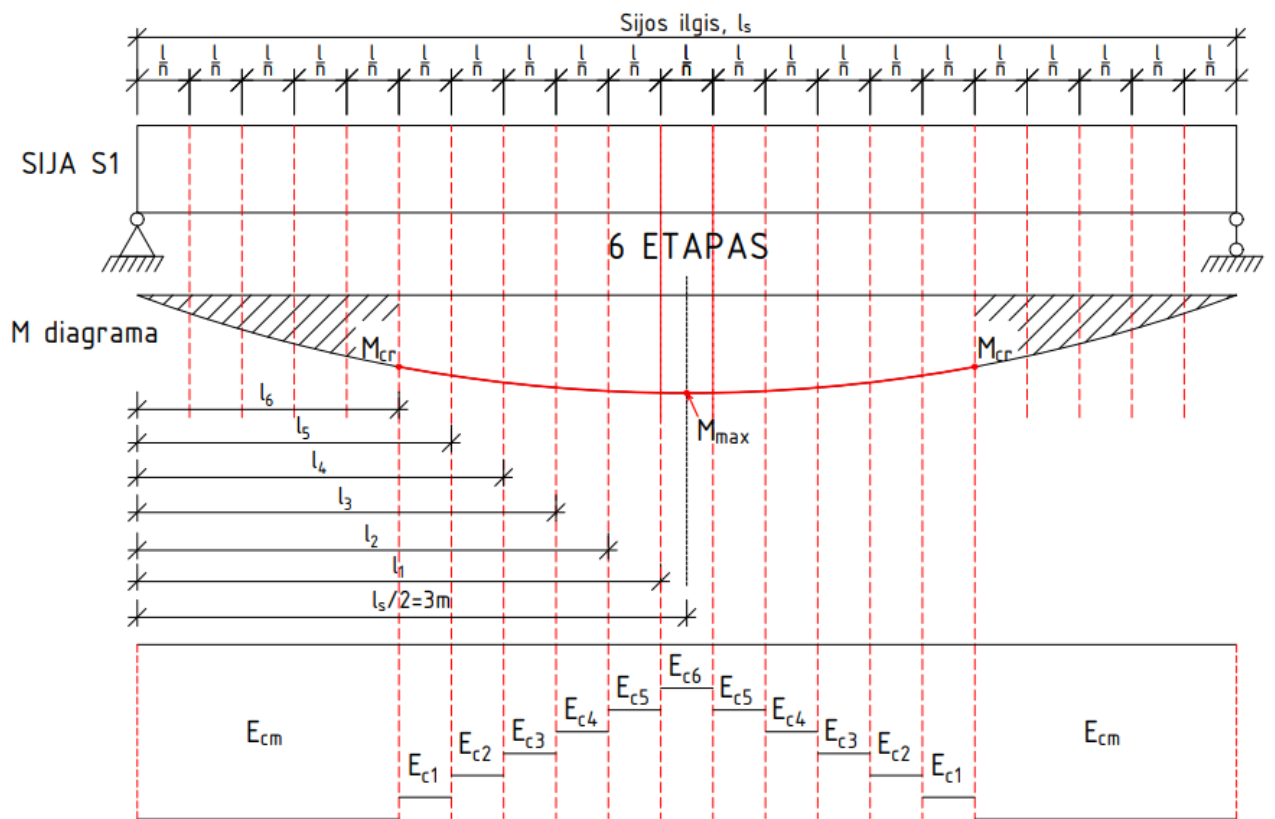
$$E_{c4} = \frac{\alpha_{c4}}{\beta_{c4} - \gamma_{c4}} = \frac{3,7625}{7,569 \cdot 10^{-10} - 4,815 \cdot 10^{-10}} = 13,662 \cdot 10^9 \text{ Pa};$$

Apibendrinus ketvirtąjį etapą gavome:

- tamprumo modulis lygus $E_{c4} = 13,662 \text{ GPa}$;

- lenkimo momentas lygus $M_4 = 35,546 \text{ kNm}$.

Penktojo etapo skaičiavimas pateiktas 3 skyriuje. Šeštame etape skaičiavimai atliekami pagal 38 paveiksle pavaizduotą schemą.



38 pav. Šeštojo etapo skaičiavimo schema, kai sija suskirstyta į 21 nagrinėjamą ruožą

Šeštajame etape nesupleišėjusios zonos ilgis pagal 3.14 formulę:

$$l_6 = \frac{a \cdot (n-i)}{2} = \frac{0,2857 \cdot (21-6)}{2} = 2,143 \text{ m};$$

Apskaičiuojame apkrovą šeštajai zonai, pagal 3.15 formulę:

$$q_6 = \frac{2 \cdot M_{cr}}{L \cdot l_6 - l_6^2} = \frac{2 \cdot 34,256}{6 \cdot 2,143 - 2,143^2} = 8,289 \text{ kN/m};$$

čia l_6 – nagrinėjamas zonos ilgis šeštajame etape, apskaičiuotas pagal 3.14 formulę.

Apskaičiuojame naują lenkimo momentą, kuris atsiranda nuo q_6 apkrovos pagal 2.1 formulę:

$$M_6 = \frac{q_6 \cdot L^2}{8} = \frac{8,289 \cdot 6^2}{8} = 37,301 \text{ kNm};$$

Elemento įlinkis nuo M_6 lenkimo momento, pagal 3.16 formulę:

$$d_{el,6} = \frac{5}{48} \cdot \frac{M_6 \cdot L^2}{E_{cm} \cdot I_{uc}} = \frac{5}{48} \cdot \frac{37,301 \cdot 10^3 \cdot 6^2}{34,65 \cdot 10^9 \cdot 26,578 \cdot 10^{-4}} = 1,519 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 1,519 \text{ mm};$$

Šeštajam ruožui apskaičiuojamas elemento kreivis nesupleišėjusiai zonai pagal 3.17 formulę:

$$\frac{1}{r_{uc,6}} = \frac{M_6}{E_{cm} \cdot I_{uc}} = \frac{37,301 \cdot 10^3}{34,65 \cdot 10^9 \cdot 26,578 \cdot 10^{-4}} = 4,050 \cdot 10^{-4} \frac{1}{m};$$

Apskaičiuojamas elemento kreivis supleišėjusiai zonai pagal 3.18 formulę:

$$\frac{1}{r_{cr,6}} = \frac{M_6}{E_{cm} \cdot I_{cr}} = \frac{37,301 \cdot 10^3}{34,65 \cdot 10^9 \cdot 4,309 \cdot 10^{-4}} = 2,498 \cdot 10^{-3} \frac{1}{m};$$

Apskaičiuojamas pasiskirstymo koeficientas pagal 3.19 formulę:

$$\zeta_6 = 1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_6} \right)^2 = 1 - \left(\frac{34,256}{37,301} \right)^2 = 0,1566;$$

Apskaičiuojamas naujas elemento įlinkis nagrinėjamoje zonoje pagal 3.20 formulę:

$$d_6 = \left(\zeta_6 \cdot \frac{1}{r_{cr,6}} + (1 - \zeta_6) \cdot \frac{1}{r_{uc,6}} \right) \cdot \frac{5 \cdot L^2}{48} = (0,1566 \cdot 2,498 \cdot 10^{-3} + (1 - 0,1566) \cdot 4,050 \cdot 10^{-4}) \cdot \frac{5 \cdot 6^2}{48} = 2,748 \cdot 10^{-3} m = 2,748 mm;$$

Pagal 3.10 formulę apskaičiuojamas šeštasis tamprumo modulis:

$$E_{c6} = \frac{\frac{5 \cdot L^4}{192} - \frac{L \cdot l_1^3}{3} + \frac{l_1^4}{4}}{\frac{2 \cdot I_{uc} \cdot d_6}{q_6} - \frac{1}{E_{cm}} \left(\frac{L \cdot l_6^3}{3} - \frac{l_6^4}{4} \right) - \sum_{j=1}^{i-1} \left(\frac{L \cdot l_{j+1}^3}{3} - \frac{l_{j+1}^4}{4} - \frac{L \cdot l_j^3}{3} + \frac{l_j^4}{4} \right) \cdot \frac{1}{E_{i-1}}};$$

Kad būtų paprasčiau skaičiuoti išskaidome šią formulę į kelias:

$$\alpha_{c6} = \frac{5 \cdot L^4}{192} - \frac{L \cdot l_1^3}{3} + \frac{l_1^4}{4} = \frac{5 \cdot 6^4}{192} - \frac{6 \cdot 2,857^3}{3} + \frac{2,857^4}{4} = 3,7625;$$

$$\beta_{c6} = \frac{2 \cdot I_{uc} \cdot d_6}{q_6} - \frac{1}{E_{cm}} \cdot \left(\frac{L \cdot l_6^3}{3} - \frac{l_6^4}{4} \right) = \frac{2 \cdot 26,578 \cdot 10^{-4} \cdot 2,748 \cdot 10^{-3}}{8,289 \cdot 10^3} - \frac{1}{34,65 \cdot 10^9} \cdot \left(\frac{6 \cdot 2,143^3}{3} - \frac{2,143^4}{4} \right) = 1,347 \cdot 10^{-9};$$

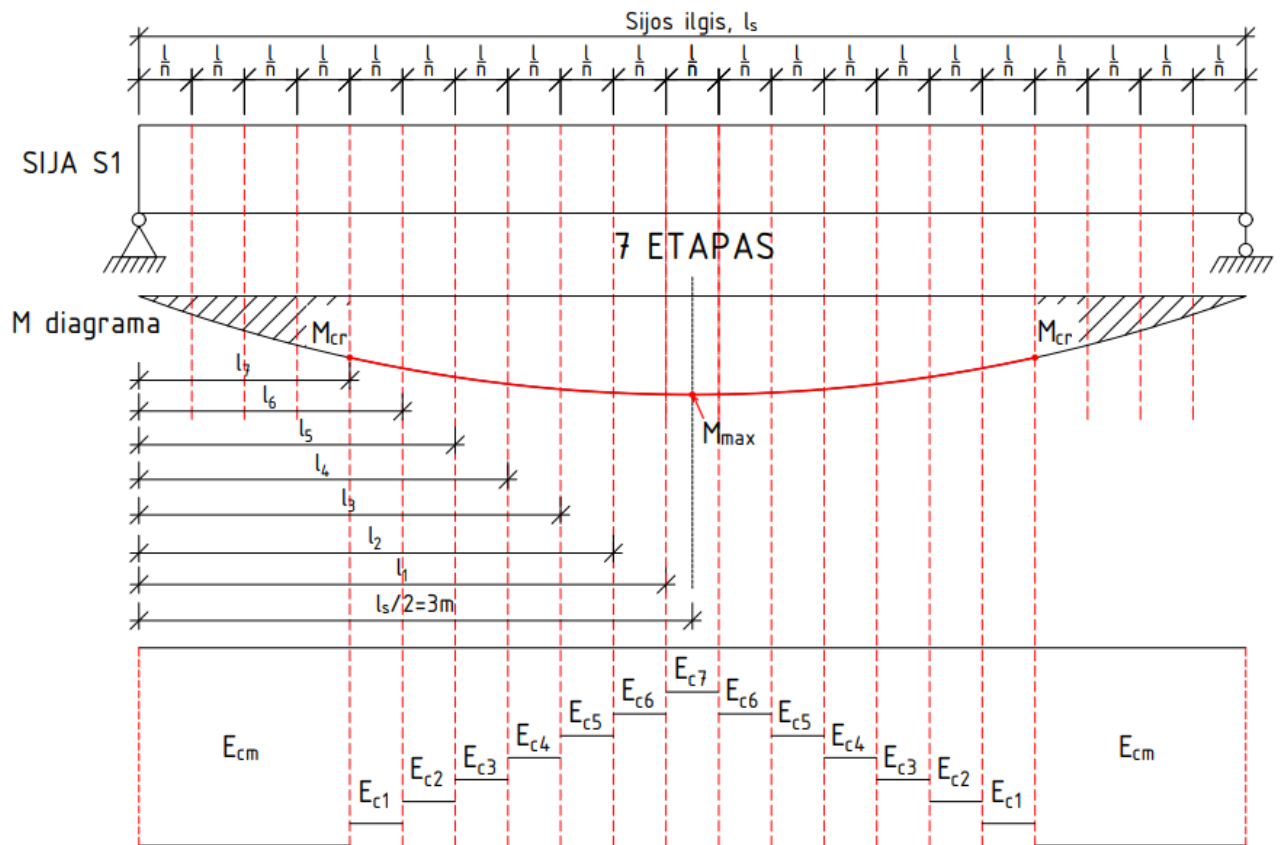
$$\gamma_{c6} = \sum_{j=1}^{i-1} \left(\frac{L \cdot l_{j+1}^3}{3} - \frac{l_{j+1}^4}{4} - \frac{L \cdot l_j^3}{3} + \frac{l_j^4}{4} \right) \cdot \frac{1}{E_{i-1}} = \left(\frac{6 \cdot 2,857}{3} - \frac{2,857^4}{4} - \frac{6 \cdot 2,714^3}{3} + \frac{2,714^4}{4} \right) \cdot \frac{1}{11,556 \cdot 10^9} + \left(\frac{6 \cdot 2,714^3}{3} - \frac{2,714^4}{4} - \frac{6 \cdot 2,571^3}{3} + \frac{2,571^4}{4} \right) \cdot \frac{1}{13,662 \cdot 10^9} + \left(\frac{6 \cdot 2,571^3}{3} - \frac{2,571^4}{4} - \frac{6 \cdot 2,429^3}{3} + \frac{2,429^4}{4} \right) \cdot \frac{1}{16,646 \cdot 10^9} + \left(\frac{6 \cdot 2,429^3}{3} - \frac{2,429^4}{4} - \frac{6 \cdot 2,286^3}{3} + \frac{2,286^4}{4} \right) \cdot \frac{1}{21,149 \cdot 10^9} + \left(\frac{6 \cdot 2,286^3}{3} - \frac{2,286^4}{4} - \frac{6 \cdot 2,143^3}{3} + \frac{2,143^4}{4} \right) \cdot \frac{1}{28,636 \cdot 10^9} = 9,705 \cdot 10^{-10};$$

$$E_{c6} = \frac{\alpha_{c6}}{\beta_{c6} - \gamma_{c6}} = \frac{3,7625}{1,347 \cdot 10^{-9} - 9,705 \cdot 10^{-10}} = 10,004 \cdot 10^9 Pa;$$

Apibendrinus šestąjį etapą gavome:

- tamprumo modulis lygus $E_{c6} = 10,004 GPa$;
- lenkimo momentas lygus $M_6 = 37,301 kNm$.

Turint šeštojo etapo reikšmes galime priėti prie sekančio etapo, kuriame ieškosime septintojo tamprumo modulio. Nauja skaičiavimo schema pateikta 39 paveiksle.



39 pav. Septintojo etapo skaičiavimo schema, kai sija suskirstyta į 21 nagrinėjamą ruožą

Septintajame etape nesupleišėjusios zonos ilgis pagal 3.14 formulę:

$$l_7 = \frac{a \cdot (n-i)}{2} = \frac{0,2857 \cdot (21-7)}{2} = 2,0 \text{ m};$$

Apskaičiuojame apkrovą septintajai zonai, pagal 3.15 formulę:

$$q_7 = \frac{2 \cdot M_{cr}}{L \cdot l_7 - l_7^2} = \frac{2 \cdot 34,256}{6 \cdot 2,0 - 2,0^2} = 8,564 \text{ kN/m};$$

čia l_7 – nagrinėjamas zonos ilgis septintame etape, apskaičiuotas pagal 3.14 formulę.

Apskaičiuojame naują lenkimo momentą, kuris atsiranda nuo q_7 apkrovos pagal 2.1 formulę:

$$M_7 = \frac{q_7 \cdot L^2}{8} = \frac{8,564 \cdot 6^2}{8} = 38,538 \text{ kNm};$$

Elemento įlinkis nuo M_7 lenkimo momento, pagal 3.16 formulę:

$$d_{el,7} = \frac{5}{48} \cdot \frac{M_7 \cdot L^2}{E_{cm} \cdot I_{uc}} = \frac{5}{48} \cdot \frac{38,538 \cdot 10^3 \cdot 6^2}{34,65 \cdot 10^9 \cdot 26,578 \cdot 10^{-4}} = 1,569 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 1,569 \text{ mm};$$

Septintajam ruožui apskaičiuojamas elemento kreivis nesupleišėjusiai zonai pagal 3.17 formulę:

$$\frac{1}{r_{uc,7}} = \frac{M_7}{E_{cm} \cdot I_{uc}} = \frac{38,538 \cdot 10^3}{34,65 \cdot 10^9 \cdot 26,578 \cdot 10^{-4}} = 4,185 \cdot 10^{-4} \frac{1}{m};$$

Apskaičiuojamas elemento kreivis supleišėjusiai zonai pagal 3.18 formulę:

$$\frac{1}{r_{cr,7}} = \frac{M_7}{E_{cm} \cdot l_{cr}} = \frac{38,538 \cdot 10^3}{34,65 \cdot 10^9 \cdot 4,309 \cdot 10^{-4}} = 2,581 \cdot 10^{-3} \frac{1}{m};$$

Apskaičiuojamas pasiskirstymo koeficientas pagal 3.19 formulę:

$$\zeta_7 = 1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_7}\right)^2 = 1 - \left(\frac{34,256}{38,538}\right)^2 = 0,2099;$$

Apskaičiuojamas naujas elemento įlinkis nagrinėjamoje zonoje pagal 3.20 formulę:

$$d_7 = \left(\zeta_7 \cdot \frac{1}{r_{cr,7}} + (1 - \zeta_7) \cdot \frac{1}{r_{uc,7}}\right) \cdot \frac{5 \cdot L^2}{48} = (0,2099 \cdot 2,581 \cdot 10^{-3} + (1 - 0,2099) \cdot 4,185 \cdot 10^{-4}) \cdot \frac{5 \cdot 6^2}{48} = 3,272 \cdot 10^{-3} m = 3,272 mm;$$

Pagal 3.10 formulę apskaičiuojamas septintasis tamprumo modulis:

$$E_{c7} = \frac{\frac{5 \cdot L^4}{192} - \frac{L \cdot l_1^3}{3} + \frac{l_1^4}{4}}{\frac{2 \cdot l_{uc} \cdot d_7}{q_7} - \frac{1}{E_{cm}} \left(\frac{L \cdot l_7^3}{3} - \frac{l_7^4}{4}\right) - \sum_{j=1}^{i-1} \left(\frac{L \cdot l_{j+1}^3}{3} - \frac{l_{j+1}^4}{4} - \frac{L \cdot l_j^3}{3} + \frac{l_j^4}{4}\right) \frac{1}{E_{i-1}}};$$

Kad būtų paprasčiau skaičiuoti išskaidome šią formulę į kelias:

$$\alpha_{c7} = \frac{5 \cdot L^4}{192} - \frac{L \cdot l_1^3}{3} + \frac{l_1^4}{4} = \frac{5 \cdot 6^4}{192} - \frac{6 \cdot 2,857^3}{3} + \frac{2,857^4}{4} = 3,7625;$$

$$\beta_{c7} = \frac{2 \cdot l_{uc} \cdot d_7}{q_7} - \frac{1}{E_{cm}} \cdot \left(\frac{L \cdot l_7^3}{3} - \frac{l_7^4}{4}\right) = \frac{2 \cdot 26,578 \cdot 10^{-4} \cdot 3,272 \cdot 10^{-3}}{8,564 \cdot 10^3} - \frac{1}{34,65 \cdot 10^9} \cdot \left(\frac{6 \cdot 2,0^3}{3} - \frac{2,0^4}{4}\right) = 1,684 \cdot 10^{-9}$$

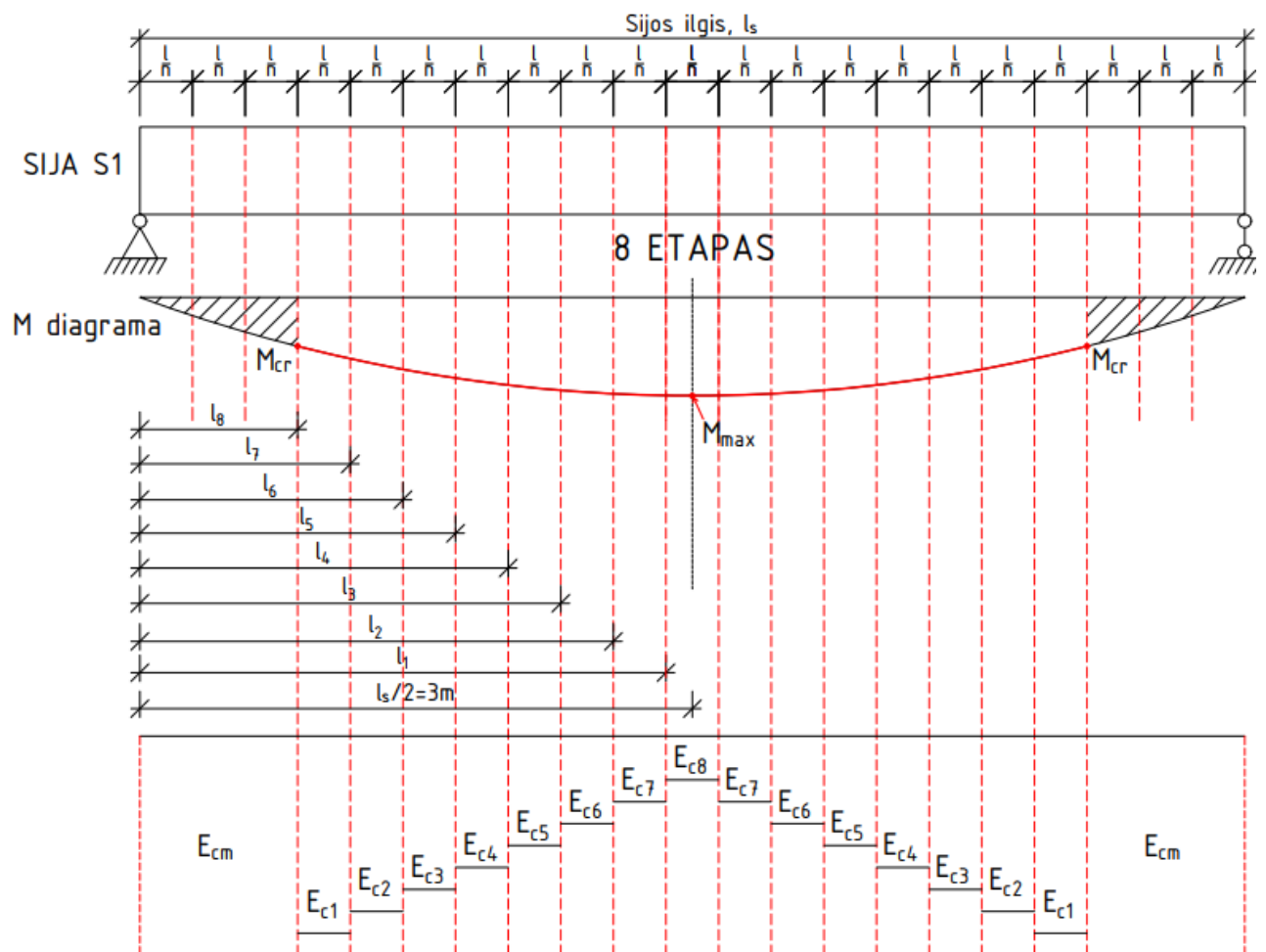
$$\begin{aligned} \gamma_{c7} = & \sum_{j=1}^{i-1} \left(\frac{L \cdot l_{j+1}^3}{3} - \frac{l_{j+1}^4}{4} - \frac{L \cdot l_j^3}{3} + \frac{l_j^4}{4}\right) \cdot \frac{1}{E_{i-1}} = \left(\frac{6 \cdot 2,857}{3} - \frac{2,857^4}{4} - \frac{6 \cdot 2,714^3}{3} + \frac{2,714^4}{4}\right) \cdot \frac{1}{10,004 \cdot 10^9} + \\ & \left(\frac{6 \cdot 2,714^3}{3} - \frac{2,714^4}{4} - \frac{6 \cdot 2,571^3}{3} + \frac{2,571^4}{4}\right) \cdot \frac{1}{11,556 \cdot 10^9} + \left(\frac{6 \cdot 2,571^3}{3} - \frac{2,571^4}{4} - \frac{6 \cdot 2,429^3}{3} + \frac{2,429^4}{4}\right) \cdot \frac{1}{13,662 \cdot 10^9} + \\ & \left(\frac{6 \cdot 2,429^3}{3} - \frac{2,429^4}{4} - \frac{6 \cdot 2,286^3}{3} + \frac{2,286^4}{4}\right) \cdot \frac{1}{16,646 \cdot 10^9} + \left(\frac{6 \cdot 2,286^3}{3} - \frac{2,286^4}{4} - \frac{6 \cdot 2,143^3}{3} + \frac{2,143^4}{4}\right) \cdot \frac{1}{21,149 \cdot 10^9} + \\ & \left(\frac{6 \cdot 2,143^3}{3} - \frac{2,143^4}{4} - \frac{6 \cdot 2,0^3}{3} + \frac{2,0^4}{4}\right) \cdot \frac{1}{28,636 \cdot 10^9} = 1,258 \cdot 10^{-9}; \end{aligned}$$

$$E_{c7} = \frac{\alpha_{c7}}{\beta_{c7} - \gamma_{c7}} = \frac{3,7625}{1,684 \cdot 10^{-9} - 1,258 \cdot 10^{-9}} = 8,823 \cdot 10^9 Pa;$$

Apibendrinus septintąjį etapą gavome:

- tamprumo modulis lygus $E_{c7} = 8,823 GPa$;
- lenkimo momentas lygus $M_7 = 38,538 kNm$.

Turint septintojo etapo reikšmes galime prieiti prie sekančio etapo, kuriame ieškosime aštuntojo tamprumo modulio. Nauja skaičiavimo schema pateikta 40 paveiksle.



40 pav. Aštuntojo etapo skaičiavimo schema, kai sija suskirstyta į 21 nagrinėjamą ruožą

Aštuntame etape nesupleišėjusios zonos ilgis pagal 3.14 formulę:

$$l_8 = \frac{a \cdot (n-i)}{2} = \frac{0,2857 \cdot (21-8)}{2} = 1,857 \text{ m};$$

Apskaičiuojame apkrovą aštuntajai zonai, pagal 3.15 formulę:

$$q_8 = \frac{2 \cdot M_{cr}}{L \cdot l_8 - l_8^2} = \frac{2 \cdot 34,256}{6 \cdot 1,857 - 1,857^2} = 8,905 \text{ kN/m};$$

čia l_8 – nagrinėjamas zonos ilgis aštuntame etape, apskaičiuotas pagal 3.14 formulę.

Apskaičiuojame naują lenkimo momentą, kuris atsiranda nuo q_8 apkrovos pagal 2.1 formulę:

$$M_8 = \frac{q_8 \cdot L^2}{8} = \frac{8,905 \cdot 6^2}{8} = 40,072 \text{ kNm};$$

Elemento įlinkis nuo M_8 lenkimo momento, pagal 3.16 formulę:

$$d_{el,8} = \frac{5}{48} \cdot \frac{M_8 \cdot L^2}{E_{cm} \cdot I_{uc}} = \frac{5}{48} \cdot \frac{40,072 \cdot 10^3 \cdot 6^2}{34,65 \cdot 10^9 \cdot 26,578 \cdot 10^{-4}} = 1,632 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 1,632 \text{ mm};$$

Aštuntajam ruožui apskaičiuojamas elemento kreivis nesupleišėjusiai zonai pagal 3.17 formulę:

$$\frac{1}{r_{uc,8}} = \frac{M_8}{E_{cm} \cdot I_{uc}} = \frac{40,072 \cdot 10^3}{34,65 \cdot 10^9 \cdot 26,578 \cdot 10^{-4}} = 4,351 \cdot 10^{-4} \frac{1}{m};$$

Apskaičiuojamas elemento kreivis supleišėjusiai zonai pagal 3.18 formulę:

$$\frac{1}{r_{cr,8}} = \frac{M_8}{E_{cm} \cdot I_{cr}} = \frac{40,072 \cdot 10^3}{34,65 \cdot 10^9 \cdot 4,309 \cdot 10^{-4}} = 2,684 \cdot 10^{-3} \frac{1}{m};$$

Apskaičiuojamas pasiskirstymo koeficientas pagal 3.19 formulę:

$$\zeta_8 = 1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_8} \right)^2 = 1 - \left(\frac{34,256}{40,072} \right)^2 = 0,2692;$$

Apskaičiuojamas naujas elemento įlinkis nagrinėjamoje zonoje pagal 3.20 formulę:

$$d_8 = \left(\zeta_8 \cdot \frac{1}{r_{cr,8}} + (1 - \zeta_8) \cdot \frac{1}{r_{uc,8}} \right) \cdot \frac{5 \cdot L^2}{48} = (0,2692 \cdot 2,684 \cdot 10^{-3} + (1 - 0,2692) \cdot 4,351 \cdot 10^{-4}) \cdot \frac{5 \cdot 6^2}{48} = 3,902 \cdot 10^{-3} m = 3,902 mm;$$

Pagal 3.10 formulę apskaičiuojamas aštuntasis tamprumo modulis:

$$E_{c8} = \frac{\frac{5 \cdot L^4}{192} - \frac{L \cdot l_1^3}{3} + \frac{l_1^4}{4}}{\frac{2 \cdot I_{uc} \cdot d_8}{q_8} - \frac{1}{E_{cm}} \left(\frac{L \cdot l_8^3}{3} - \frac{l_8^4}{4} \right) - \sum_{j=1}^{i-1} \left(\frac{L \cdot l_{j+1}^3}{3} - \frac{l_{j+1}^4}{4} - \frac{L \cdot l_j^3}{3} + \frac{l_j^4}{4} \right) \cdot \frac{1}{E_{i-1}}};$$

Kad būtų paprasčiau skaičiuoti išskaidome šią formulę į kelias:

$$\alpha_{c8} = \frac{5 \cdot L^4}{192} - \frac{L \cdot l_1^3}{3} + \frac{l_1^4}{4} = \frac{5 \cdot 6^4}{192} - \frac{6 \cdot 2,857^3}{3} + \frac{2,857^4}{4} = 3,7625;$$

$$\beta_{c8} = \frac{2 \cdot I_{uc} \cdot d_8}{q_8} - \frac{1}{E_{cm}} \cdot \left(\frac{L \cdot l_8^3}{3} - \frac{l_8^4}{4} \right) = \frac{2 \cdot 26,578 \cdot 10^{-4} \cdot 3,902 \cdot 10^{-3}}{8,905 \cdot 10^3} - \frac{1}{34,65 \cdot 10^9} \cdot \left(\frac{6 \cdot 1,857^3}{3} - \frac{1,857^4}{4} \right) = 2,045 \cdot 10^{-9};$$

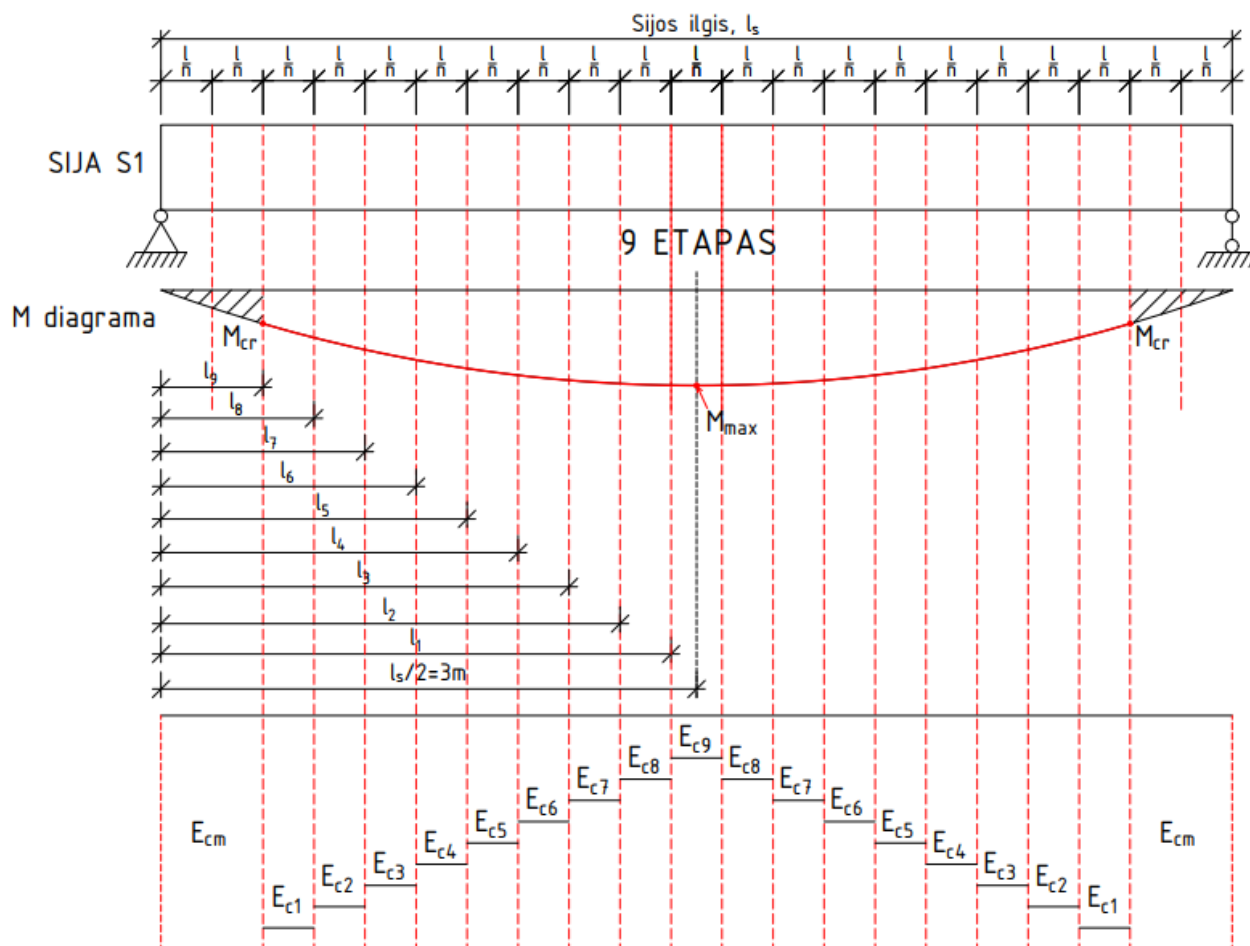
$$\gamma_{c8} = \sum_{j=1}^{i-1} \left(\frac{L \cdot l_{j+1}^3}{3} - \frac{l_{j+1}^4}{4} - \frac{L \cdot l_j^3}{3} + \frac{l_j^4}{4} \right) \cdot \frac{1}{E_{i-1}} = \left(\frac{6 \cdot 2,857}{3} - \frac{2,857^4}{4} - \frac{6 \cdot 2,714^3}{3} + \frac{2,714^4}{4} \right) \cdot \frac{1}{8,823 \cdot 10^9} + \left(\frac{6 \cdot 2,714^3}{3} - \frac{2,714^4}{4} - \frac{6 \cdot 2,571^3}{3} + \frac{2,571^4}{4} \right) \cdot \frac{1}{10,004 \cdot 10^9} + \left(\frac{6 \cdot 2,571^3}{3} - \frac{2,571^4}{4} - \frac{6 \cdot 2,429^3}{3} + \frac{2,429^4}{4} \right) \cdot \frac{1}{11,556 \cdot 10^9} + \left(\frac{6 \cdot 2,429^3}{3} - \frac{2,429^4}{4} - \frac{6 \cdot 2,286^3}{3} + \frac{2,286^4}{4} \right) \cdot \frac{1}{13,662 \cdot 10^9} + \left(\frac{6 \cdot 2,286^3}{3} - \frac{2,286^4}{4} - \frac{6 \cdot 2,143^3}{3} + \frac{2,143^4}{4} \right) \cdot \frac{1}{16,646 \cdot 10^9} + \left(\frac{6 \cdot 2,143^3}{3} - \frac{2,143^4}{4} - \frac{6 \cdot 2,0^3}{3} + \frac{2,0^4}{4} \right) \cdot \frac{1}{21,149 \cdot 10^9} + \left(\frac{6 \cdot 2,0^3}{3} - \frac{2,0^4}{4} - \frac{6 \cdot 1,857^3}{3} + \frac{1,857^4}{4} \right) \cdot \frac{1}{28,636 \cdot 10^9} = 1,569 \cdot 10^{-9};$$

$$E_{c8} = \frac{\alpha_{c8}}{\beta_{c8} - \gamma_{c8}} = \frac{3,7625}{2,045 \cdot 10^{-9} - 1,569 \cdot 10^{-9}} = 7,905 \cdot 10^9 Pa;$$

Apibendrinus aštuntąjį etapą gavome:

- tamprumo modulis lygus $E_{c8} = 7,905 GPa$;
- lenkimo momentas lygus $M_8 = 40,072 kNm$.

Turint aštuntojo etapo reikšmes galime prieiti prie sekančio etapo, kuriame ieškosime devintojo tamprumo modulio. Nauja skaičiavimo schema pateikta 41 paveiksle.



41 pav. Devintojo etapo skaičiavimo schema, kai $n=21$ vnt.

Devintame etape nesupleišėjusios zonos ilgis pagal 3.14 formulę:

$$l_9 = \frac{a \cdot (n-i)}{2} = \frac{0,2857 \cdot (21-9)}{2} = 1,714 \text{ m};$$

Apskaičiuojame apkrovą devintajai zonai, pagal 3.15 formulę:

$$q_9 = \frac{2 \cdot M_{cr}}{L \cdot l_9 - l_9^2} = \frac{2 \cdot 34,256}{6 \cdot 1,714 - 1,714^2} = 9,325 \text{ kN/m};$$

čia l_9 – nagrinėjamas zonos ilgis devintame etape, apskaičiuotas pagal 3.14 formulę.

Apskaičiuojame naują lenkimo momentą, kuris atsiranda nuo q_9 apkrovos pagal 2.1 formulę:

$$M_9 = \frac{q_9 \cdot L^2}{8} = \frac{9,325 \cdot 6^2}{8} = 41,964 \text{ kNm};$$

Elemento įlinkis nuo M_9 lenkimo momento, pagal 3.16 formulę:

$$d_{el,9} = \frac{5}{48} \cdot \frac{M_9 \cdot L^2}{E_{cm} \cdot I_{uc}} = \frac{5}{48} \cdot \frac{41,964 \cdot 10^3 \cdot 6^2}{34,65 \cdot 10^9 \cdot 26,578 \cdot 10^{-4}} = 1,709 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 1,709 \text{ mm};$$

Devintajam ruožui apskaičiuojamas elemento kreivis nesupleišėjusiai zonai pagal 3.17 formulę:

$$\frac{1}{r_{uc,9}} = \frac{M_9}{E_{cm} \cdot I_{uc}} = \frac{41,964 \cdot 10^3}{34,65 \cdot 10^9 \cdot 26,578 \cdot 10^{-4}} = 4,655 \cdot 10^{-4} \frac{1}{m};$$

Apskaičiuojamas elemento kreivis supleišėjusiai zonai pagal 3.18 formulę:

$$\frac{1}{r_{cr,9}} = \frac{M_9}{E_{cm} \cdot I_{cr}} = \frac{41,964 \cdot 10^3}{34,65 \cdot 10^9 \cdot 4,309 \cdot 10^{-4}} = 2,811 \cdot 10^{-3} \frac{1}{m};$$

Apskaičiuojamas pasiskirstymo koeficientas pagal 3.19 formulę:

$$\zeta_9 = 1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_9} \right)^2 = 1 - \left(\frac{34,256}{41,964} \right)^2 = 0,334;$$

Apskaičiuojamas naujas elemento įlinkis nagrinėjamoje zonoje pagal 3.20 formulę:

$$d_9 = \left(\zeta_9 \cdot \frac{1}{r_{cr,9}} + (1 - \zeta_9) \cdot \frac{1}{r_{uc,9}} \right) \cdot \frac{5 \cdot L^2}{48} = (0,334 \cdot 2,811 \cdot 10^{-3} + (1 - 0,334) \cdot 4,655 \cdot 10^{-4}) \cdot \frac{5 \cdot 6^2}{48} = 4,655 \cdot 10^{-3} m = 4,655 mm;$$

Pagal 3.10 formulę apskaičiuojamas devintasis tamprumo modulis:

$$E_{c9} = \frac{\frac{5 \cdot L^4}{192} - \frac{L \cdot l_1^3}{3} + \frac{l_1^4}{4}}{\frac{2 \cdot I_{uc} \cdot d_9}{q_9} - \frac{1}{E_{cm}} \left(\frac{L \cdot l_9^3}{3} - \frac{l_9^4}{4} \right) - \sum_{j=1}^{i-1} \left(\frac{L \cdot l_{j+1}^3}{3} - \frac{l_{j+1}^4}{4} - \frac{L \cdot l_j^3}{3} + \frac{l_j^4}{4} \right) \cdot \frac{1}{E_{i-1}}};$$

Kad būtų paprasčiau skaičiuoti išskaidome šią formulę į kelias:

$$\alpha_{c9} = \frac{5 \cdot L^4}{192} - \frac{L \cdot l_1^3}{3} + \frac{l_1^4}{4} = \frac{5 \cdot 6^4}{192} - \frac{6 \cdot 2,857^3}{3} + \frac{2,857^4}{4} = 3,7625;$$

$$\beta_{c9} = \frac{2 \cdot I_{uc} \cdot d_9}{q_9} - \frac{1}{E_{cm}} \cdot \left(\frac{L \cdot l_9^3}{3} - \frac{l_9^4}{4} \right) = \frac{2 \cdot 26,578 \cdot 10^{-4} \cdot 4,655 \cdot 10^{-3}}{9,325 \cdot 10^3} - \frac{1}{34,65 \cdot 10^9} \cdot \left(\frac{6 \cdot 1,714^3}{3} - \frac{1,714^4}{4} \right) = 2,425 \cdot 10^{-9};$$

$$\begin{aligned} \gamma_{c9} = & \sum_{j=1}^{i-1} \left(\frac{L \cdot l_{j+1}^3}{3} - \frac{l_{j+1}^4}{4} - \frac{L \cdot l_j^3}{3} + \frac{l_j^4}{4} \right) \cdot \frac{1}{E_{i-1}} = \left(\frac{6 \cdot 2,857}{3} - \frac{2,857^4}{4} - \frac{6 \cdot 2,714^3}{3} + \frac{2,714^4}{4} \right) \cdot \frac{1}{7,905 \cdot 10^9} + \\ & \left(\frac{6 \cdot 2,714^3}{3} - \frac{2,714^4}{4} - \frac{6 \cdot 2,571^3}{3} + \frac{2,571^4}{4} \right) \cdot \frac{1}{8,823 \cdot 10^9} + \left(\frac{6 \cdot 2,571^3}{3} - \frac{2,571^4}{4} - \frac{6 \cdot 2,429^3}{3} + \frac{2,429^4}{4} \right) \cdot \frac{1}{10,004 \cdot 10^9} + \\ & \left(\frac{6 \cdot 2,429^3}{3} - \frac{2,429^4}{4} - \frac{6 \cdot 2,286^3}{3} + \frac{2,286^4}{4} \right) \cdot \frac{1}{11,556 \cdot 10^9} + \left(\frac{6 \cdot 2,286^3}{3} - \frac{2,286^4}{4} - \frac{6 \cdot 2,143^3}{3} + \frac{2,143^4}{4} \right) \cdot \frac{1}{13,662 \cdot 10^9} + \\ & \left(\frac{6 \cdot 2,143^3}{3} - \frac{2,143^4}{4} - \frac{6 \cdot 2,0^3}{3} + \frac{2,0^4}{4} \right) \cdot \frac{1}{16,646 \cdot 10^9} + \left(\frac{6 \cdot 2,0^3}{3} - \frac{2,0^4}{4} - \frac{6 \cdot 1,857^3}{3} + \frac{1,857^4}{4} \right) \cdot \frac{1}{21,149 \cdot 10^9} + \\ & \left(\frac{6 \cdot 1,857^3}{3} - \frac{1,857^4}{4} - \frac{6 \cdot 1,714^3}{3} + \frac{1,714^4}{4} \right) \cdot \frac{1}{28,636 \cdot 10^9} = 1,901 \cdot 10^{-9}; \end{aligned}$$

$$E_{c9} = \frac{\alpha_{c9}}{\beta_{c9} - \gamma_{c9}} = \frac{3,7625}{2,425 \cdot 10^{-9} - 1,901 \cdot 10^{-9}} = 7,179 \cdot 10^9 Pa;$$

Apibendrinus devintąjį etapą gavome:

- tamprumo modulis lygus $E_{c9} = 7,179 GPa$;
- lenkimo momentas lygus $M_9 = 41,964 kNm$.

2 priedas. Teorinis skaičiavimas keičiant sijos plotį

Šiame priede bus atliekami skaičiavimai bei pateikiamos rezultatų lentelės pagal 3 skyriuje spręsta uždavinį ir siją dalinant į 21 ruožą. Pirmasis skaičiavimas bus atliekamas, kai keisime sijos plotį iš $b = 0,35 \text{ m}$ į $b'_1 = 0,20 \text{ m}$. Apskaičiuojamas nesupleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas pagal 2.2 formulę su nauju sijos pločiu:

$$I_{uc} = \frac{b'_1 \cdot h^3}{12} = \frac{200 \cdot 450^3}{12} = 15,188 \cdot 10^8 \text{ mm}^4;$$

Gniuždomos zonos aukštis apie neutralią ašį apskaičiuojamas pagal 2.3 formulę:

$$x = \frac{-\alpha_e \cdot A_s + \sqrt{\alpha_e^2 \cdot A_s^2 + 2 \cdot \alpha_e \cdot A_s \cdot b'_1 \cdot d}}{b'_1} = \frac{-5,77 \cdot 628 + \sqrt{5,77^2 \cdot 628^2 + 2 \cdot 5,77 \cdot 628 \cdot 200 \cdot 400}}{200} = 103,645 \text{ mm};$$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas, pagal 1.1.10 lygtį, lygus:

$$I_{cc} = \frac{b'_1 \cdot x^3}{3} + \alpha_e \cdot A_s \cdot (d - x)^2 = \frac{200 \cdot 103,645^3}{3} + 5,77 \cdot 628 \cdot (400 - 103,645)^2 = 3,926 \cdot 10^8 \text{ mm}^4;$$

Pleišėjimo momentas apskaičiuojamas pagal 2.4 formulę:

$$M_{cr} = \frac{b'_1 \cdot h^2}{6} \cdot f_{ctm} = \frac{200 \cdot 450^2}{6} \cdot 2,9 = 19,575 \cdot 10^6 \text{ Nmm} = 19,575 \text{ kNm};$$

24 lentelė. Gauti rezultatai pakeitus sijos plotį į $b'_1 = 0,20 \text{ m}$

Ruožo žymuo (nr.)	Ruožo ilgis, m	Apkrova q , kN/m	Lenkimo momentas M , kNm	Nesupleišėjusios dalies kreivis $\frac{1}{r_{un}}, 10^{-4} \frac{1}{m}$	Supleišėjusios dalies kreivis $\frac{1}{r_{cr}}, 10^{-3} \frac{1}{m}$	Įlinkis, d , $10^{-3} m$	Tamprumo modulis E , GPa
1.	2,857	4,360	19,619	3,728	1,442	1,416	31,033
2.	2,714	4,390	19,754	3,754	1,452	1,481	25,585
3.	2,571	4,441	19,983	3,797	1,469	1,589	21,652
4.	2,429	4,514	20,312	3,860	1,493	1,743	18,703
5.	2,286	4,611	20,751	3,943	1,526	1,946	16,428
6.	2,143	4,737	21,315	4,050	1,567	2,201	14,636
7.	2,000	4,894	22,022	4,185	1,619	2,514	13,202
8.	1,857	5,089	22,898	4,351	1,683	2,892	12,040
9.	1,714	5,329	23,979	4,557	1,763	3,344	11,092
10.	1,571	5,626	25,315	4,811	1,861	3,885	10,317

Antrasis skaičiavimas atliekamas, kai naujas sijos plotis lygus $b'_2 = 0,25 \text{ m}$. Apskaičiuojamas nesupleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas pagal 2.2 formulę su nauju sijos pločiu:

$$I_{uc} = \frac{b'_2 \cdot h^3}{12} = \frac{250 \cdot 450^3}{12} = 18,984 \cdot 10^8 \text{ mm}^4;$$

Gniuždomos zonos aukštis apie neutralią ašį apskaičiuojamas pagal 2.3 formulę:

$$x = \frac{-\alpha_e \cdot A_s + \sqrt{\alpha_e^2 \cdot A_s^2 + 2 \cdot \alpha_e \cdot A_s \cdot b'_2 \cdot d}}{b'_2} = \frac{-5,77 \cdot 628 + \sqrt{5,77^2 \cdot 628^2 + 2 \cdot 5,77 \cdot 628 \cdot 250 \cdot 400}}{250} = 94,173 \text{ mm};$$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas, pagal 1.1.10 lygtį, lygus:

$$I_{cc} = \frac{b'_2 \cdot x^3}{3} + \alpha_e \cdot A_s \cdot (d - x)^2 = \frac{250 \cdot 94,173^3}{3} + 5,77 \cdot 628 \cdot (400 - 94,173)^2 = 4,086 \cdot 10^8 \text{ mm}^4;$$

Pleišėjimo momentas apskaičiuojamas pagal 2.4 formulę:

$$M_{cr} = \frac{b'_2 \cdot h^2}{6} \cdot f_{ctm} = \frac{250 \cdot 450^2}{6} \cdot 2,9 = 24,469 \cdot 10^6 \text{ Nmm} = 24,469 \text{ kNm};$$

25 lentelė. Gauti rezultatai pakeitus sijos plotį į $b'_2 = 0,25 \text{ m}$

Ruožo žymuo (nr.)	Ruožo ilgis, m	Apkrova $q, \text{kN/m}$	Lenkimo momentas M, kNm	Nesupleišėjusios dalies kreivis $\frac{1}{r_{un}}, 10^{-4} \frac{1}{m}$	Supleišėjusios dalies kreivis $\frac{1}{r_{cr}}, 10^{-3} \frac{1}{m}$	Įlinkis, $d, 10^{-3} \text{m}$	Tamprumo modulis E, GPa
1.	2,857	5,450	24,524	3,728	1,732	1,421	30,179
2.	2,714	5,487	24,693	3,754	1,744	1,500	23,892
3.	2,571	5,551	24,979	3,797	1,764	1,634	19,654
4.	2,429	5,642	25,390	3,860	1,793	1,823	16,629
5.	2,286	5,764	25,939	3,943	1,832	2,073	14,379
6.	2,143	5,921	26,644	4,050	1,822	2,386	12,656
7.	2,000	6,117	27,527	4,185	1,944	2,770	11,306
8.	1,857	6,361	28,623	4,351	2,022	3,233	10,231
9.	1,714	6,661	29,974	4,557	2,117	3,787	9,367
10.	1,571	7,032	31,644	4,811	2,235	4,449	8,668

Trečiasis skaičiavimas atliekamas, kai naujas sijos plotis lygus $b'_3 = 0,30 \text{ m}$. Apskaičiuojamas nesupleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas pagal 2.2 formulę su nauju sijos pločiu:

$$I_{uc} = \frac{b'_3 \cdot h^3}{12} = \frac{300 \cdot 450^3}{12} = 22,781 \cdot 10^8 \text{ mm}^4;$$

Gniuždomos zonos aukštis apie neutralią ašį apskaičiuojamas pagal 2.3 formulę:

$$x = \frac{-\alpha_e \cdot A_s + \sqrt{\alpha_e^2 \cdot A_s^2 + 2 \cdot \alpha_e \cdot A_s \cdot b'_3 \cdot d}}{b'_3} = \frac{-5,77 \cdot 628 + \sqrt{5,77^2 \cdot 628^2 + 2 \cdot 5,77 \cdot 628 \cdot 300 \cdot 400}}{300} = 86,974 \text{ mm};$$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas, pagal 1.1.10 lygtį, lygus:

$$I_{cc} = \frac{b'_3 \cdot x^3}{3} + \alpha_e \cdot A_s \cdot (d - x)^2 = \frac{300 \cdot 86,974^3}{3} + 5,77 \cdot 628 \cdot (400 - 86,974)^2 = 4,210 \cdot 10^8 \text{ mm}^4;$$

Pleišėjimo momentas apskaičiuojamas pagal 2.4 formulę:

$$M_{cr} = \frac{b'_3 \cdot h^2}{6} \cdot f_{ctm} = \frac{300 \cdot 450^2}{6} \cdot 2,9 = 29,363 \cdot 10^6 \text{ Nmm} = 29,363 \text{ kNm};$$

26 lentelė. Gauti rezultatai pakeitus sijos plotį į $b'_3 = 0,30 \text{ m}$

Ruožo žymuo (nr.)	Ruožo ilgis, m	Apkrova $q, kN/m$	Lenkimo momentas M, kNm	Nesupleišėjusios dalies kreivis $\frac{1}{r_{un}}, 10^{-4} \frac{1}{m}$	Supleišėjusios dalies kreivis $\frac{1}{r_{cr}}, 10^{-3} \frac{1}{m}$	Įlinkis, $d, 10^{-3}m$	Tamprumo modulis E, GPa
1.	2,857	6,540	29,429	3,728	2,018	1,426	29,383
2.	2,714	6,585	29,631	3,754	2,031	1,520	22,429
3.	2,571	6,661	29,974	3,797	2,055	1,678	18,017
4.	2,429	6,771	30,468	3,860	2,089	1,902	14,992
5.	2,286	6,917	31,127	3,943	2,134	2,197	12,806
6.	2,143	7,105	31,973	4,050	2,192	2,568	11,167
7.	2,000	7,341	33,033	4,185	2,265	3,022	9,904
8.	1,857	7,633	34,347	4,351	2,355	3,569	8,912
9.	1,714	7,993	35,969	4,557	2,466	4,224	8,122
10.	1,571	8,438	37,973	4,811	2,603	5,004	7,488

Ketvirtasis skaičiavimas atliekamas, kai naujas sijos plotis lygus $b'_4 = 0,40 m$. Apskaičiuojamas nesupleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas pagal 2.2 formulę su nauju sijos pločiu:

$$I_{uc} = \frac{b'_4 \cdot h^3}{12} = \frac{400 \cdot 450^3}{12} = 30,375 \cdot 10^8 mm^4;$$

Gniuždomos zonos aukštis apie neutralią ašį apskaičiuojamas pagal 2.3 formulę:

$$x = \frac{-\alpha_e \cdot A_s + \sqrt{\alpha_e^2 \cdot A_s^2 + 2 \cdot \alpha_e \cdot A_s \cdot b'_4 \cdot d}}{b'_4} = \frac{-5,77 \cdot 628 + \sqrt{5,77^2 \cdot 628^2 + 2 \cdot 5,77 \cdot 628 \cdot 400 \cdot 400}}{400} = 76,564 mm;$$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas, pagal 1.1.10 lygtį, lygus:

$$I_{cc} = \frac{b'_4 \cdot x^3}{3} + \alpha_e \cdot A_s \cdot (d - x)^2 = \frac{400 \cdot 76,564^3}{3} + 5,77 \cdot 628 \cdot (400 - 76,564)^2 = 4,390 \cdot 10^8 mm^4;$$

Pleišėjimo momentas apskaičiuojamas pagal 2.4 formulę:

$$M_{cr} = \frac{b'_4 \cdot h^2}{6} \cdot f_{ctm} = \frac{400 \cdot 450^2}{6} \cdot 2,9 = 39,150 \cdot 10^6 Nmm = 39,150 kNm;$$

27 lentelė. Gauti rezultatai pakeitus sijos plotį į $b'_4 = 0,40 m$

Ruožo žymuo (nr.)	Ruožo ilgis, m	Apkrova $q, kN/m$	Lenkimo momentas M, kNm	Nesupleišėjusios dalies kreivis $\frac{1}{r_{un}}, 10^{-4} \frac{1}{m}$	Supleišėjusios dalies kreivis $\frac{1}{r_{cr}}, 10^{-3} \frac{1}{m}$	Įlinkis, $d, 10^{-3}m$	Tamprumo modulis E, GPa
1.	2,857	8,720	39,239	3,728	2,579	1,436	27,932
2.	2,714	8,780	39,508	3,754	2,597	1,558	20,018
3.	2,571	8,881	39,966	3,797	2,627	1,764	15,479
4.	2,429	9,028	40,624	3,860	2,670	2,058	12,558
5.	2,286	9,223	41,503	3,943	2,728	2,443	10,537
6.	2,143	9,473	42,630	4,050	2,802	2,927	9,068
7.	2,000	9,788	44,044	4,185	2,895	3,519	7,962

8.	1,857	10,177	45,796	4,351	3,010	4,231	7,109
9.	1,714	10,658	47,959	4,557	3,153	5,083	6,438
10.	1,571	11,251	50,631	4,811	3,328	6,097	5,907

3 priedas. Teorinis skaičiavimas keičiant sijos aukštį

Šiame priede bus atliekami skaičiavimai bei pateikiamos rezultatų lentelės pagal 3 skyriuje spręsta uždavinį ir siją dalinant į 21 ruožą. Pakeisime sijos aukštį iš 0,45m į 0,40 m, 0,50 m, 0,55 m ir 0,60 m. Priimame, kad $h'_1 = 0,40\text{ m}$ ir darbo aukštis $d'_1 = 0,35\text{ m}$. Apskaičiuojame nesupleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas pagal 2.2 formulę su nauju sijos aukščiu:

$$I_{uc} = \frac{b \cdot h_1'^3}{12} = \frac{350 \cdot 400^3}{12} = 18,667 \cdot 10^8 \text{ mm}^4;$$

Gniuždomos zonos aukštis apie neutralią ašį apskaičiuojamas pagal 2.3 formulę:

$$x = \frac{-\alpha_e \cdot A_s + \sqrt{\alpha_e^2 \cdot A_s^2 + 2 \cdot \alpha_e \cdot A_s \cdot b \cdot d_1'}}{b} = \frac{-5,77 \cdot 628 + \sqrt{5,77^2 \cdot 628^2 + 2 \cdot 5,77 \cdot 628 \cdot 350 \cdot 350}}{350} = 75,416 \text{ mm};$$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas, pagal 1.1.10 lygtį, lygus:

$$I_{cc} = \frac{b \cdot x^3}{3} + \alpha_e \cdot A_s \cdot (d_1' - x)^2 = \frac{350 \cdot 75,416^3}{3} + 5,77 \cdot 628 \cdot (350 - 75,416)^2 = 3,233 \cdot 10^8 \text{ mm}^4;$$

Pleišėjimo momentas apskaičiuojamas pagal 2.4 formulę:

$$M_{cr} = \frac{b \cdot h_1'^2}{6} \cdot f_{ctm} = \frac{350 \cdot 400^2}{6} \cdot 2,9 = 27,067 \cdot 10^6 \text{ Nmm} = 27,067 \text{ kNm};$$

28 lentelė. Gauti rezultatai pakeitus sijos aukštį į $h'_1 = 0,40\text{ m}$

Ruožo žymuo (nr.)	Ruožo ilgis, m	Apkrova $q, \text{kN/m}$	Lenkimo momentas M, kNm	Nesupleišėjusios dalies kreivis $\frac{1}{r_{un}}, 10^{-4} \frac{1}{m}$	Supleišėjusios dalies kreivis $\frac{1}{r_{cr}}, 10^{-3} \frac{1}{m}$	Įlinkis, $d, 10^{-3} m$	Tamprumo modulis E, GPa
1.	2,857	6,028	27,128	4,194	2,421	1,607	29,021
2.	2,714	6,070	27,314	4,223	2,438	1,720	21,799
3.	2,571	6,140	27,631	4,272	2,466	1,911	17,335
4.	2,429	6,241	28,086	4,342	2,507	2,182	14,326
5.	2,286	6,376	28,693	4,436	2,561	2,538	12,177
6.	2,143	6,549	29,473	4,557	2,631	2,986	10,580
7.	2,000	6,767	30,450	4,708	2,718	3,534	9,358
8.	1,857	7,036	31,662	4,895	2,826	4,194	8,401
9.	1,714	7,368	33,157	5,126	2,959	4,983	7,643
10.	1,571	7,779	35,004	5,412	3,124	5,924	7,036

Antruoju etapu priimame, kad sijos aukštis $h'_2 = 0,50\text{ m}$ ir darbo aukštis $d'_2 = 0,45\text{ m}$. Apskaičiuojame nesupleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas pagal 2.2 formulę su nauju sijos aukščiu:

$$I_{uc} = \frac{b \cdot h_2'^3}{12} = \frac{350 \cdot 500^3}{12} = 36,458 \cdot 10^8 \text{ mm}^4;$$

Gniuždomos zonos aukštis apie neutralią ašį apskaičiuojamas pagal 2.3 formulę:

$$x = \frac{-\alpha_e \cdot A_s + \sqrt{\alpha_e^2 \cdot A_s^2 + 2 \cdot \alpha_e \cdot A_s \cdot b \cdot d'_2}}{b} = \frac{-5,77 \cdot 628 + \sqrt{5,77^2 \cdot 628^2 + 2 \cdot 5,77 \cdot 628 \cdot 350 \cdot 450}}{350} = 86,742 \text{ mm};$$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas, pagal 1.1.10 lygtį, lygus:

$$I_{cc} = \frac{b \cdot x^3}{3} + \alpha_e \cdot A_s \cdot (d'_2 - x)^2 = \frac{350 \cdot 86,742^3}{3} + 5,77 \cdot 628 \cdot (450 - 86,742)^2 = 5,545 \cdot 10^8 \text{ mm}^4;$$

Pleišėjimo momentas apskaičiuojamas pagal 2.4 formulę:

$$M_{cr} = \frac{b \cdot h_2'^2}{6} \cdot f_{ctm} = \frac{350 \cdot 500^2}{6} \cdot 2,9 = 42,292 \cdot 10^6 \text{ Nmm} = 42,292 \text{ kNm};$$

29 lentelė. Gauti rezultatai pakeitus sijos aukštį į $h'_2 = 0,50 \text{ m}$

Ruožo žymuo (nr.)	Ruožo ilgis, m	Apkrova $q, \text{kN/m}$	Lenkimo momentas M, kNm	Nesupleišėjusios dalies kreivis $\frac{1}{r_{un}}, 10^{-4} \frac{1}{m}$	Supleišėjusios dalies kreivis $\frac{1}{r_{cr}}, 10^{-3} \frac{1}{m}$	Įlinkis, $d, 10^{-3} \text{m}$	Tamprumo modulis E, GPa
1.	2,857	9,420	42,388	3,355	2,206	1,290	28,250
2.	2,714	9,484	42,679	3,378	2,221	1,394	20,520
3.	2,571	9,594	43,173	3,418	2,247	1,570	15,992
4.	2,429	9,752	43,884	3,474	2,284	1,820	13,040
5.	2,286	9,963	44,833	3,549	2,334	2,148	10,980
6.	2,143	10,234	46,051	3,645	2,397	2,561	9,473
7.	2,000	10,573	47,578	3,766	2,476	3,065	8,334
8.	1,857	10,994	49,471	3,916	2,575	3,673	7,452
9.	1,714	11,513	51,807	4,101	2,697	4,398	6,757
10.	1,571	12,154	54,694	4,330	2,847	5,263	6,205

Trečiuoju etapu priimame, kad sijos aukštis $h'_3 = 0,55 \text{ m}$ ir darbo aukštis $d'_3 = 0,50 \text{ m}$. Apskaičiuojame nesupleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas pagal 2.2 formulę su nauju sijos aukščiu:

$$I_{uc} = \frac{b \cdot h_3'^3}{12} = \frac{350 \cdot 550^3}{12} = 48,526 \cdot 10^8 \text{ mm}^4;$$

Gniuždomos zonos aukštis apie neutralią ašį apskaičiuojamas pagal 2.3 formulę:

$$x = \frac{-\alpha_e \cdot A_s + \sqrt{\alpha_e^2 \cdot A_s^2 + 2 \cdot \alpha_e \cdot A_s \cdot b \cdot d'_3}}{b} = \frac{-5,77 \cdot 628 + \sqrt{5,77^2 \cdot 628^2 + 2 \cdot 5,77 \cdot 628 \cdot 350 \cdot 500}}{350} = 91,937 \text{ mm};$$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas, pagal 1.1.10 lygtį, lygus:

$$I_{cc} = \frac{b \cdot x^3}{3} + \alpha_e \cdot A_s \cdot (d'_3 - x)^2 = \frac{350 \cdot 91,937^3}{3} + 5,77 \cdot 628 \cdot (500 - 91,937)^2 = 6,942 \cdot 10^8 \text{ mm}^4;$$

Pleišėjimo momentas apskaičiuojamas pagal 2.4 formulę:

$$M_{cr} = \frac{b \cdot h_3'^2}{6} \cdot f_{ctm} = \frac{350 \cdot 550^2}{6} \cdot 2,9 = 51,173 \cdot 10^6 \text{ Nmm} = 51,173 \text{ kNm};$$

30 lentelė. Gauti rezultatai pakeitus sijos aukštį į $h'_3 = 0,55 \text{ m}$

Ruožo žymuo (nr.)	Ruožo ilgis, m	Apkrova $q, \text{kN/m}$	Lenkimo momentas M, kNm	Nesupleišėjusios dalies kreivis $\frac{1}{r_{un}}, 10^{-4} \frac{1}{\text{m}}$	Supleišėjusios dalies kreivis $\frac{1}{r_{cr}}, 10^{-3} \frac{1}{\text{m}}$	Įlinkis, $d, 10^{-3} \text{m}$	Tamprumo modulis E, GPa
1.	2,857	11,398	51,289	3,050	2,132	1,175	27,867
2.	2,714	11,476	51,641	3,071	2,147	1,276	19,916
3.	2,571	11,609	52,239	3,107	2,172	1,447	15,376
4.	2,429	11,800	53,099	3,158	2,207	1,690	12,462
5.	2,286	12,055	54,248	3,226	2,255	2,008	10,450
6.	2,143	12,383	55,722	3,314	2,316	2,408	8,988
7.	2,000	12,793	57,570	3,424	2,393	2,898	7,889
8.	1,857	13,302	59,860	3,560	2,488	3,488	7,041
9.	1,714	13,930	62,687	3,728	2,606	4,192	6,376
10.	1,571	14,707	66,180	3,936	2,751	5,031	5,848

Ketvirtuoju etapu priimame, kad sijos aukštis $h'_4 = 0,60 \text{ m}$ ir darbo aukštis $d'_4 = 0,55 \text{ m}$. Apskaičiuojame nesupleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas pagal 2.2 formulę su nauju sijos aukščiu:

$$I_{uc} = \frac{b \cdot h_4'^3}{12} = \frac{350 \cdot 600^3}{12} = 63,000 \cdot 10^8 \text{ mm}^4;$$

Gniuždomos zonos aukštis apie neutralią ašį apskaičiuojamas pagal 2.3 formulę:

$$x = \frac{-\alpha_e \cdot A_s + \sqrt{\alpha_e^2 \cdot A_s^2 + 2 \cdot \alpha_e \cdot A_s \cdot b \cdot d_4'}}{b} = \frac{-5,77 \cdot 628 + \sqrt{5,77^2 \cdot 628^2 + 2 \cdot 5,77 \cdot 628 \cdot 350 \cdot 550}}{350} = 96,879 \text{ mm};$$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas, pagal 1.1.10 lygtį, lygus:

$$I_{cc} = \frac{b \cdot x^3}{3} + \alpha_e \cdot A_s \cdot (d_4' - x)^2 = \frac{350 \cdot 96,879^3}{3} + 5,77 \cdot 628 \cdot (550 - 96,879)^2 = 8,503 \cdot 10^8 \text{ mm}^4;$$

Pleišėjimo momentas apskaičiuojamas pagal 2.4 formulę:

$$M_{cr} = \frac{b \cdot h_4'^2}{6} \cdot f_{ctm} = \frac{350 \cdot 600^2}{6} \cdot 2,9 = 60,900 \cdot 10^6 \text{ Nmm} = 60,900 \text{ kNm};$$

31 lentelė. Gauti rezultatai pakeitus sijos aukštį į $h'_4 = 0,65 \text{ m}$

Ruožo žymuo (nr.)	Ruožo ilgis, m	Apkrova $q, \text{kN/m}$	Lenkimo momentas M, kNm	Nesupleišėjusios dalies kreivis $\frac{1}{r_{un}}, 10^{-4} \frac{1}{\text{m}}$	Supleišėjusios dalies kreivis $\frac{1}{r_{cr}}, 10^{-3} \frac{1}{\text{m}}$	Įlinkis, $d, 10^{-3} \text{m}$	Tamprumo modulis E, GPa
1.	2,857	13,564	61,038	2,796	2,072	1,079	27,491
2.	2,714	13,657	61,457	2,815	2,086	1,178	19,341
3.	2,571	13,815	62,169	2,848	2,110	1,344	14,800
4.	2,429	14,043	63,193	2,895	2,145	1,581	11,928
5.	2,286	14,347	64,560	2,957	2,191	1,892	9,963

6.	2,143	14,736	66,313	3,038	2,251	2,282	8,545
7.	2,000	15,225	68,513	3,139	2,325	2,760	7,484
8.	1,857	15,831	71,238	3,263	2,418	3,335	6,669
9.	1,714	16,578	74,603	3,418	2,532	4,022	6,032
10.	1,571	17,502	78,759	3,608	2,673	4,840	5,527

4 priedas. Teorinis skaičiavimas keičiant sijos armatūros kiekį

Šiame priede bus atliekami skaičiavimai bei pateikiamos rezultatų lentelės pagal 3 skyriuje spręsta uždavinį ir siją dalinant į 21 ruožą. Bus nagrinėjamas armatūros kiekio poveikis skaičiavimams. Esamą armatūrą $2x\emptyset 20$ mm, kurios skerspjūvio plotas lygus $A_s = 6,28 \text{ cm}^2$ keisime į $3x\emptyset 18$ mm, $3x\emptyset 20$ mm, $4x\emptyset 18$ mm ir $4x\emptyset 20$ mm. Pirmuoju atveju armatūros skerspjūvio plotas lygus $A_{s,1} = 7,63 \text{ cm}^2$. Apskaičiuojame pasikeitusį gniuždomos zonos aukštis apie neutralią ašį, dėl pakeisto armatūros kiekio, pagal 2.3 formulę:

$$x = \frac{-\alpha_e \cdot A_{s,1} + \sqrt{\alpha_e^2 \cdot A_{s,1}^2 + 2 \cdot \alpha_e \cdot A_{s,1} \cdot b \cdot d}}{b} = \frac{-5,77 \cdot 763 + \sqrt{5,77^2 \cdot 763^2 + 2 \cdot 5,77 \cdot 763 \cdot 350 \cdot 400}}{350} = 88,534 \text{ mm};$$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas, pagal 1.1.10 lygtį, lygus:

$$I_{cc} = \frac{b \cdot x^3}{3} + \alpha_e \cdot A_{s,1} \cdot (d - x)^2 = \frac{350 \cdot 88,534^3}{3} + 5,77 \cdot 763 \cdot (400 - 88,534)^2 = 5,082 \cdot 10^8 \text{ mm}^4;$$

32 lentelė. Gauti rezultatai pakeitus sijos armatūros skerspjūvio plotą į $A_{s,1} = 7,63 \text{ cm}^2$

Ruožo žymuo (nr.)	Ruožo ilgis, m	Apkrova $q, \text{kN/m}$	Lenkimo momentas M, kNm	Nesupleišėjusios dalies kreivis $\frac{1}{r_{un}}, 10^{-4} \frac{1}{m}$	Supleišėjusios dalies kreivis $\frac{1}{r_{cr}}, 10^{-3} \frac{1}{m}$	Įlinkis, $d, 10^{-3} m$	Tamprumo modulis E, GPa
1.	2,857	7,630	34,334	3,728	1,950	1,425	29,568
2.	2,714	7,682	34,570	3,754	1,963	1,515	22,760
3.	2,571	7,771	34,970	3,797	1,986	1,667	18,380
4.	2,429	7,899	35,546	3,860	2,019	1,884	15,351
5.	2,286	8,070	36,315	3,943	2,062	2,168	13,148
6.	2,143	8,289	37,301	4,050	2,118	2,525	11,488
7.	2,000	8,564	38,538	4,185	2,189	2,962	10,204
8.	1,857	8,905	40,072	4,351	2,276	3,490	9,193
9.	1,714	9,325	41,964	4,557	2,383	4,120	8,386
10.	1,571	9,845	44,302	4,811	2,516	4,872	7,738

Antruoju atveju armatūros skerspjūvio plotas lygus $A_{s,2} = 9,42 \text{ cm}^2$. Apskaičiuojame pasikeitusį gniuždomos zonos aukštis apie neutralią ašį, dėl pakeisto armatūros kiekio, pagal 2.3 formulę:

$$x = \frac{-\alpha_e \cdot A_{s,2} + \sqrt{\alpha_e^2 \cdot A_{s,2}^2 + 2 \cdot \alpha_e \cdot A_{s,2} \cdot b \cdot d}}{b} = \frac{-5,77 \cdot 942 + \sqrt{5,77^2 \cdot 942^2 + 2 \cdot 5,77 \cdot 942 \cdot 350 \cdot 400}}{350} = 97,023 \text{ mm};$$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas, pagal 1.1.10 lygtį, lygus:

$$I_{cc} = \frac{b \cdot x^3}{3} + \alpha_e \cdot A_{s,2} \cdot (d - x)^2 = \frac{350 \cdot 97,023^3}{3} + 5,77 \cdot 942 \cdot (400 - 97,023)^2 = 6,057 \cdot 10^8 \text{ mm}^4;$$

33 lentelė. Gauti rezultatai pakeitus sijos armatūros skerspjūvio plotą į $A_{s,2} = 9,42 \text{ cm}^2$

Ruožo žymuo (nr.)	Ruožo ilgis, m	Apkrova $q, \text{kN/m}$	Lenkimo momentas M, kNm	Nesupleišėjusios dalies kreivis $\frac{1}{r_{un}}, 10^{-4} \frac{1}{m}$	Supleišėjusios dalies kreivis $\frac{1}{r_{cr}}, 10^{-3} \frac{1}{m}$	Įlinkis, $d, 10^{-3} m$	Tamprumo modulis E, GPa
-------------------	----------------	--------------------------	----------------------------------	---	---	-------------------------	----------------------------------

1.	2,857	7,630	34,334	3,728	1,636	1,420	30,457
2.	2,714	7,682	34,570	3,754	1,647	1,494	24,428
3.	2,571	7,771	34,970	3,797	1,666	1,619	20,274
4.	2,429	7,899	35,546	3,860	1,694	1,797	17,264
5.	2,286	8,070	36,315	3,943	1,730	2,031	14,999
6.	2,143	8,289	37,301	4,050	1,777	2,325	13,250
7.	2,000	8,564	38,538	4,185	1,836	2,685	11,871
8.	1,857	8,905	40,072	4,351	1,909	3,120	10,767
9.	1,714	9,325	41,964	4,557	2,000	3,640	9,876
10.	1,571	9,845	44,302	4,811	2,111	4,262	9,153

Trečiuoju atveju armatūros skerspjūvio plotas lygus $A_{s,3} = 10,18 \text{ cm}^2$. Apskaičiuojame pasikeitusį gniuždomos zonos aukštis apie neutralią ašį, dėl pakeisto armatūros kiekio, pagal 2.3 formulę:

$$x = \frac{-\alpha_e \cdot A_{s,3} + \sqrt{\alpha_e^2 \cdot A_{s,3}^2 + 2 \cdot \alpha_e \cdot A_{s,3} \cdot b \cdot d}}{b} = \frac{-5,77 \cdot 1018 + \sqrt{5,77^2 \cdot 1018^2 + 2 \cdot 5,77 \cdot 1018 \cdot 350 \cdot 400}}{350} = 100,312 \text{ mm};$$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas, pagal 1.1.10 lygtį, lygus:

$$I_{cc} = \frac{b \cdot x^3}{3} + \alpha_e \cdot A_{s,3} \cdot (d - x)^2 = \frac{350 \cdot 100,312^3}{3} + 5,77 \cdot 1018 \cdot (400 - 100,312)^2 = 6,455 \cdot 10^8 \text{ mm}^4;$$

34 lentelė. Gauti rezultatai pakeitus sijos armatūros skerspjūvio plotą į $A_{s,3} = 10,18 \text{ cm}^2$

Ruožo žymuo (nr.)	Ruožo ilgis, m	Apkrova $q, \text{kN/m}$	Lenkimo momentas M, kNm	Nesupleišėjusios dalies kreivis $\frac{1}{r_{un}}, 10^{-4} \frac{1}{m}$	Supleišėjusios dalies kreivis $\frac{1}{r_{cr}}, 10^{-3} \frac{1}{m}$	Įlinkis, $d, 10^{-3} m$	Tamprumo modulis E, GPa
1.	2,857	7,630	34,334	3,728	1,535	1,418	30,754
2.	2,714	7,682	34,570	3,754	1,546	1,487	25,017
3.	2,571	7,771	34,970	3,797	1,564	1,603	20,970
4.	2,429	7,899	35,546	3,860	1,598	1,769	17,985
5.	2,286	8,070	36,315	3,943	1,624	1,987	15,712
6.	2,143	8,289	37,301	4,050	1,668	2,260	13,938
7.	2,000	8,564	38,538	4,185	1,723	2,596	12,529
8.	1,857	8,905	40,072	4,351	1,792	3,001	11,395
9.	1,714	9,325	41,964	4,557	1,876	3,486	10,476
10.	1,571	9,845	44,302	4,811	1,981	4,065	9,724

Ketvirtuoju atveju armatūros skerspjūvio plotas lygus $A_{s,4} = 12,57 \text{ cm}^2$. Apskaičiuojame pasikeitusį gniuždomos zonos aukštis apie neutralią ašį, dėl pakeisto armatūros kiekio, pagal 2.3 formulę:

$$x = \frac{-\alpha_e \cdot A_{s,4} + \sqrt{\alpha_e^2 \cdot A_{s,4}^2 + 2 \cdot \alpha_e \cdot A_{s,4} \cdot b \cdot d}}{b} = \frac{-5,77 \cdot 1257 + \sqrt{5,77^2 \cdot 1257^2 + 2 \cdot 5,77 \cdot 1257 \cdot 350 \cdot 400}}{350} = 109,706 \text{ mm};$$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas, pagal 1.1.10 lygtį, lygus:

$$I_{cc} = \frac{b \cdot x^3}{3} + \alpha_e \cdot A_{s,4} \cdot (d - x)^2 = \frac{350 \cdot 109,706}{3} + 5,77 \cdot 1257 \cdot (400 - 109,706)^2 = 7,655 \cdot 10^8 \text{ mm}^4;$$

35 lentelė. Gauti rezultatai pakeitus sijos armatūros skerspjūvio plotą į $A_{s,4} = 12,57 \text{ cm}^2$

Ruožo žymuo (nr.)	Ruožo ilgis, m	Apkrova $q, \text{kN/m}$	Lenkimo momentas M, kNm	Nesupleišėjusios dalies kreivis $\frac{1}{r_{un}}, 10^{-4} \frac{1}{m}$	Supleišėjusios dalies kreivis $\frac{1}{r_{cr}}, 10^{-3} \frac{1}{m}$	Įlinkis, $d, 10^{-3} \text{m}$	Tamprumo modulis E, GPa
1.	2,857	7,630	34,334	3,728	1,294	1,414	31,487
2.	2,714	7,682	34,570	3,754	1,303	1,471	26,545
3.	2,571	7,771	34,970	3,797	1,318	1,566	22,836
4.	2,429	7,899	35,546	3,860	1,340	1,702	19,973
5.	2,286	8,070	36,315	3,943	1,369	1,881	17,716
6.	2,143	8,289	37,301	4,050	1,406	2,107	15,906
7.	2,000	8,564	38,538	4,185	1,453	2,383	14,437
8.	1,857	8,905	40,072	4,351	1,511	2,718	13,233
9.	1,714	9,325	41,964	4,557	1,582	3,118	12,243
10.	1,571	9,845	44,302	4,811	1,670	3,597	11,426

5 priedas. Teorinis skaičiavimas keičiant sijai naudojamą betono klasę

Šiame priede bus atliekami skaičiavimai bei pateikiamos rezultatų lentelės pagal 3 skyriuje spręsta uždavinį ir siją dalinant į 21 ruožą. Pakeisime betono klasę C30/37, kurios charakteristikos: skaičiuotinis betono stipris $f_{cd} = 20 \text{ MPa}$, vidutinis betono tempiamasis stipris $f_{ctm} = 2,9 \text{ MPa}$ ir tamprumo modulis $E_c = 33 \cdot 1,05 = 34,65 \text{ GPa}$, į C20/25, C25/30, C35/45 ir C40/50 klasės betonus. Pirmuoju atveju, kai keičiame į C20/25 klasės betoną, jo skaičiuotinis betono stipris $f_{cd} = 13,33 \text{ MPa}$, vidutinis betono tempiamasis stipris $f_{ctm} = 2,2 \text{ MPa}$ ir tamprumo modulis $E_c = 30 \cdot 1,05 = 31,50 \text{ GPa}$.

36 lentelė. Gauti rezultatai pakeitus sijos betono klasę į C20/25

Ruožo žymuo (nr.)	Ruožo ilgis, m	Apkrova $q, \text{kN/m}$	Lenkimo momentas M, kNm	Nesupleišėjusios dalies kreivis $\frac{1}{r_{un}}, 10^{-4} \frac{1}{\text{m}}$	Supleišėjusios dalies kreivis $\frac{1}{r_{cr}}, 10^{-3} \frac{1}{\text{m}}$	Įlinkis, $d, 10^{-3} \text{m}$	Tamprumo modulis E, GPa
1.	2,857	5,788	26,047	3,111	1,770	1,191	26,460
2.	2,714	5,828	26,225	3,132	1,782	1,274	19,950
3.	2,571	5,895	26,529	3,169	1,802	1,413	15,901
4.	2,429	5,992	26,966	3,221	1,832	1,611	13,161
5.	2,286	6,112	27,549	3,291	1,872	1,871	11,200
6.	2,143	6,288	28,298	3,380	1,922	2,198	9,739
7.	2,000	6,497	29,236	3,492	1,986	2,598	8,619
8.	1,857	6,755	30,399	3,631	2,065	3,080	7,742
9.	1,714	7,074	31,835	3,802	2,163	3,656	7,046
10.	1,571	7,469	33,608	4,014	2,283	4,343	6,489

Antruoju atveju, kai keičiame į C25/30 klasės betoną, jo skaičiuotinis betono stipris $f_{cd} = 16,67 \text{ MPa}$, vidutinis betono tempiamasis stipris $f_{ctm} = 2,6 \text{ MPa}$ ir tamprumo modulis $E_c = 31 \cdot 1,05 = 32,55 \text{ GPa}$.

37 lentelė. Gauti rezultatai pakeitus sijos betono klasę į C25/30

Ruožo žymuo (nr.)	Ruožo ilgis, m	Apkrova $q, \text{kN/m}$	Lenkimo momentas M, kNm	Nesupleišėjusios dalies kreivis $\frac{1}{r_{un}}, 10^{-4} \frac{1}{\text{m}}$	Supleišėjusios dalies kreivis $\frac{1}{r_{cr}}, 10^{-3} \frac{1}{\text{m}}$	Įlinkis, $d, 10^{-3} \text{m}$	Tamprumo modulis E, GPa
1.	2,857	6,841	30,782	3,558	2,081	1,364	27,193
2.	2,714	6,887	30,994	3,583	2,095	1,461	20,359
3.	2,571	6,967	31,352	3,624	2,119	1,625	16,157
4.	2,429	7,082	31,869	3,684	2,154	1,859	13,334
5.	2,286	7,235	32,558	3,763	2,201	2,165	11,323
6.	2,143	7,432	33,443	3,866	2,261	2,550	9,831
7.	2,000	7,678	34,552	3,994	2,336	3,022	8,689
8.	1,857	7,984	35,926	4,153	2,429	3,590	7,798
9.	1,714	8,361	37,623	4,349	2,543	4,269	7,092
10.	1,571	8,826	39,719	4,591	2,685	5,078	6,528

Trečiuoju atveju, kai keičiame į C35/45 klasės betoną, jo skaičiuotinis betono stipris $f_{cd} = 23,33MPa$, vidutinis betono tempiamasis stipris $f_{ctm} = 3,2 MPa$ ir tamprumo modulis $E_c = 34 \cdot 1,05 = 35,70 GPa$.

38 lentelė. Gauti rezultatai pakeitus sijos betono klasę į C35/45

Ruožo žymuo (nr.)	Ruožo ilgis, m	Apkrova $q, kN/m$	Lenkimo momentas M, kNm	Nesupleišėjusios dalies kreivis $\frac{1}{r_{un}}, 10^{-4} \frac{1}{m}$	Supleišėjusios dalies kreivis $\frac{1}{r_{cr}}, 10^{-3} \frac{1}{m}$	Įlinkis, $d, 10^{-3}m$	Tamprumo modulis E, GPa
1.	2,857	8,419	37,886	3,993	2,527	1,533	29,346
2.	2,714	8,477	38,146	4,020	2,544	1,653	21,531
3.	2,571	8,575	38,588	4,067	2,574	1,853	16,879
4.	2,429	8,716	39,223	4,134	2,616	2,139	13,817
5.	2,286	8,905	40,072	4,223	2,673	2,513	11,666
6.	2,143	9,147	41,160	4,338	2,745	2,984	10,085
7.	2,000	9,450	42,525	4,482	2,836	3,560	8,886
8.	1,857	9,826	44,217	4,660	2,949	4,254	7,955
9.	1,714	10,290	46,305	4,880	3,088	5,083	7,220
10.	1,571	10,863	48,885	5,152	3,260	6,071	6,635

Ketvirtuoju atveju, kai keičiame į C40/50 klasės betoną, jo skaičiuotinis betono stipris $f_{cd} = 26,67MPa$, vidutinis betono tempiamasis stipris $f_{ctm} = 3,5 MPa$ ir tamprumo modulis $E_c = 35 \cdot 1,05 = 36,75 GPa$.

39 lentelė. Gauti rezultatai pakeitus sijos betono klasę į C40/50

Ruožo žymuo (nr.)	Ruožo ilgis, m	Apkrova $q, kN/m$	Lenkimo momentas M, kNm	Nesupleišėjusios dalies kreivis $\frac{1}{r_{un}}, 10^{-4} \frac{1}{m}$	Supleišėjusios dalies kreivis $\frac{1}{r_{cr}}, 10^{-3} \frac{1}{m}$	Įlinkis, $d, 10^{-3}m$	Tamprumo modulis E, GPa
1.	2,857	9,208	41,438	4,242	2,752	1,630	30,049
2.	2,714	9,272	41,722	4,272	2,771	1,761	21,904
3.	2,571	9,379	42,205	4,321	2,803	1,980	17,106
4.	2,429	9,533	42,900	4,392	2,849	2,291	13,968
5.	2,286	9,740	43,828	4,487	2,911	2,700	11,772
6.	2,143	10,004	45,019	4,609	2,990	3,214	10,164
7.	2,000	10,336	46,512	4,762	3,089	3,842	8,946
8.	1,857	10,747	48,362	4,951	3,212	4,600	8,003
9.	1,714	11,255	50,646	5,185	3,364	5,504	7,259
10.	1,571	11,882	53,468	5,474	3,551	6,582	6,668

6 priedas. Teorinis skaičiavimas keičiant sijos plotį ir aukštį

Šiame priede bus atliekami skaičiavimai bei pateikiamos rezultatų lentelės pagal 3 skyriuje spręsta uždavinį ir siją dalinant į 21 ruožą. Tikrinsime prielaidą, kad jeigu pakeitus sijos plotį, lenkimo momentas pakinta $M \cdot s_b$, o sijos aukštį pakinta $M \cdot s_h^2$, tai pakeitus abu gausime: $M \cdot s_b \cdot s_h^2$. Pirmuoju atveju keičiame sijos plotį iš $b = 0,35 \text{ m}$ į $b'_1 = 0,40 \text{ m}$, o sijos aukštį iš $b = 0,45 \text{ m}$ į $h'_1 = 0,50 \text{ m}$ t.y., abu nagrinėjamus dydžius padidiname. Apskaičiuojamas nesupleišėjusio skerspjuvio inercijos momentas pagal 2.2 formulę su nauju sijos pločiu ir aukščiu:

$$I_{uc} = \frac{b'_1 \cdot h_1'^3}{12} = \frac{400 \cdot 500^3}{12} = 41,667 \cdot 10^8 \text{ mm}^4;$$

Gniuždomos zonos aukštis apie neutralią ašį apskaičiuojamas pagal 2.3 formulę:

$$x = \frac{-\alpha_e \cdot A_s + \sqrt{\alpha_e^2 \cdot A_s^2 + 2 \cdot \alpha_e \cdot A_s \cdot b'_1 \cdot d'_1}}{b'_1} = \frac{-5,77 \cdot 628 + \sqrt{5,77^2 \cdot 628^2 + 2 \cdot 5,77 \cdot 628 \cdot 400 \cdot 450}}{400} = 81,701 \text{ mm};$$

Supleišėjusio skerspjuvio inercijos momentas, pagal 1.1.10 lygtį, lygus:

$$I_{cc} = \frac{b'_1 \cdot x^3}{3} + \alpha_e \cdot A_s \cdot (d'_1 - x)^2 = \frac{400 \cdot 81,701^3}{3} + 5,77 \cdot 628 \cdot (450 - 81,701)^2 = 5,644 \cdot 10^8 \text{ mm}^4;$$

Pleišėjimo momentas apskaičiuojamas pagal 2.4 formulę:

$$M_{cr} = \frac{b'_1 \cdot h_1'^2}{6} \cdot f_{ctm} = \frac{400 \cdot 500^2}{6} \cdot 2,9 = 48,333 \cdot 10^6 \text{ Nmm} = 48,333 \text{ kNm};$$

40 lentelė. Gauti rezultatai pakeitus sijos plotį į $b'_1 = 0,40 \text{ m}$ ir sijos aukštį į $h'_1 = 0,50 \text{ m}$

Ruožo žymuo (nr.)	Ruožo ilgis, m	Apkrova $q, \text{kN/m}$	Lenkimo momentas M, kNm	Nesupleišėjusios dalies kreivis $\frac{1}{r_{un}}, 10^{-4} \frac{1}{m}$	Supleišėjusios dalies kreivis $\frac{1}{r_{cr}}, 10^{-3} \frac{1}{m}$	Įlinkis, $d, 10^{-3} \text{m}$	Tamprumo modulis E, GPa
1.	2,857	10,765	48,443	3,355	2,477	1,295	27,514
2.	2,714	10,839	48,776	3,378	2,494	1,413	19,376
3.	2,571	10,965	49,340	3,418	2,523	1,612	14,835
4.	2,429	11,145	50,153	3,474	2,565	1,895	11,960
5.	2,286	11,386	51,238	3,549	2,620	2,267	9,992
6.	2,143	11,695	52,630	3,645	2,691	2,733	8,572
7.	2,000	12,083	54,375	3,766	2,780	3,304	7,509
8.	1,857	12,564	56,538	3,916	2,891	3,992	6,692
9.	1,714	13,157	59,208	4,101	3,028	4,812	6,052
10.	1,571	13,891	62,507	4,330	3,196	5,790	5,546

Antruoju atveju pamažiname sijos plotį iki $b'_2 = 0,30 \text{ m}$ ir sijos aukštį iki $h'_2 = 0,40 \text{ m}$. Apskaičiuojamas nesupleišėjusio skerspjuvio inercijos momentas pagal 2.2 formulę su nauju sijos pločiu ir aukščiu:

$$I_{uc} = \frac{b_2 \cdot h_2'^3}{12} = \frac{300 \cdot 400^3}{12} = 16,000 \cdot 10^8 \text{ mm}^4;$$

Gniuždomos zonos aukštis apie neutralią ašį apskaičiuojamas pagal 2.3 formulę:

$$x = \frac{-\alpha_e \cdot A_s + \sqrt{\alpha_e^2 \cdot A_s^2 + 2 \cdot \alpha_e \cdot A_s \cdot b'_2 \cdot d'_2}}{b'_2} = \frac{-5,77 \cdot 628 + \sqrt{5,77^2 \cdot 628^2 + 2 \cdot 5,77 \cdot 628 \cdot 300 \cdot 350}}{300} = 80,675 \text{ mm};$$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas, pagal 1.1.10 lygtį, lygus:

$$I_{cc} = \frac{b'_2 \cdot x^3}{3} + \alpha_e \cdot A_s \cdot (d'_2 - x)^2 = \frac{300 \cdot 80,675^3}{3} + 5,77 \cdot 628 \cdot (350 - 80,675)^2 = 3,154 \cdot 10^8 \text{ mm}^4;$$

Pleišėjimo momentas apskaičiuojamas pagal 2.4 formulę:

$$M_{cr} = \frac{b'_2 \cdot h_2'^2}{6} \cdot f_{ctm} = \frac{300 \cdot 400^2}{6} \cdot 2,9 = 23,200 \cdot 10^6 \text{ Nmm} = 23,200 \text{ kNm};$$

41 lentelė. Gauti rezultatai pakeitus sijos plotį į $b'_2 = 0,30 \text{ m}$ ir sijos aukštį į $h'_2 = 0,40 \text{ m}$

Ruožo žymuo (nr.)	Ruožo ilgis, m	Apkrova $q, \text{kN/m}$	Lenkimo momentas M, kNm	Nesupleišėjusios dalies kreivis $\frac{1}{r_{un}}, 10^{-4} \frac{1}{m}$	Supleišėjusios dalies kreivis $\frac{1}{r_{cr}}, 10^{-3} \frac{1}{m}$	Įlinkis, $d, 10^{-3} \text{m}$	Tamprumo modulis E, GPa
1.	2,857	5,167	23,253	4,194	2,127	1,602	29,730
2.	2,714	5,203	23,412	4,223	2,142	1,700	23,054
3.	2,571	5,263	23,683	4,272	2,167	1,866	18,707
4.	2,429	5,350	24,073	4,342	2,203	2,101	15,676
5.	2,286	5,465	24,594	4,436	2,250	2,410	13,458
6.	2,143	5,614	25,262	4,557	2,311	2,798	11,781
7.	2,000	5,800	26,100	4,708	2,388	3,274	10,480
8.	1,857	6,031	27,138	4,895	2,483	3,848	9,452
9.	1,714	6,316	28,420	5,126	2,600	4,534	8,630
10.	1,571	6,667	30,004	5,412	2,745	5,353	7,969

Trečiuoju atveju pamažiname sijos plotį iki $b'_3 = 0,25 \text{ m}$ ir padidinsime sijos aukštį iki $h'_3 = 0,55 \text{ m}$. Apskaičiuojamas nesupleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas pagal 2.2 formulę su nauju sijos pločiu ir aukščiu:

$$I_{uc} = \frac{b'_3 \cdot h_3'^3}{12} = \frac{250 \cdot 550^3}{12} = 34,661 \cdot 10^8 \text{ mm}^4;$$

Gniuždomos zonos aukštis apie neutralią ašį apskaičiuojamas pagal 2.3 formulę:

$$x = \frac{-\alpha_e \cdot A_s + \sqrt{\alpha_e^2 \cdot A_s^2 + 2 \cdot \alpha_e \cdot A_s \cdot b'_3 \cdot d'_3}}{b'_3} = \frac{-5,77 \cdot 628 + \sqrt{5,77^2 \cdot 628^2 + 2 \cdot 5,77 \cdot 628 \cdot 250 \cdot 500}}{250} = 106,783 \text{ mm};$$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas, pagal 1.1.10 lygtį, lygus:

$$I_{cc} = \frac{b'_3 \cdot x^3}{3} + \alpha_e \cdot A_s \cdot (d'_3 - x)^2 = \frac{250 \cdot 106,783^3}{3} + 5,77 \cdot 628 \cdot (500 - 106,783)^2 = 6,619 \cdot 10^8 \text{ mm}^4;$$

Pleišėjimo momentas apskaičiuojamas pagal 2.4 formulę:

$$M_{cr} = \frac{b'_3 \cdot h_3'^2}{6} \cdot f_{ctm} = \frac{250 \cdot 550^2}{6} \cdot 2,9 = 36,552 \cdot 10^6 \text{ Nmm} = 36,552 \text{ kNm};$$

42 lentelė. Gauti rezultatai pakeitus sijos plotį į $b'_3 = 0,25 \text{ m}$ ir sijos aukštį į $h'_3 = 0,55 \text{ m}$

Ruožo žymuo (nr.)	Ruožo ilgis, m	Apkrova $q, \text{kN/m}$	Lenkimo momentas M, kNm	Nesupleišėjusios dalies kreivis $\frac{1}{r_{un}}, 10^{-4} \frac{1}{\text{m}}$	Supleišėjusios dalies kreivis $\frac{1}{r_{cr}}, 10^{-3} \frac{1}{\text{m}}$	Įlinkis, $d, 10^{-3} \text{m}$	Tamprumo modulis E, GPa
1.	2,857	8,141	36,635	3,050	1,597	1,166	29,561
2.	2,714	8,197	36,887	3,071	1,608	1,240	22,748
3.	2,571	8,292	37,314	3,107	1,627	1,364	18,367
4.	2,429	8,428	37,928	3,158	1,654	1,542	15,337
5.	2,286	8,611	38,749	3,226	1,689	1,775	13,135
6.	2,143	8,845	39,801	3,314	1,735	2,067	11,476
7.	2,000	9,138	41,121	3,424	1,793	2,426	10,193
8.	1,857	9,502	42,757	3,560	1,864	2,857	9,183
9.	1,714	9,950	44,776	3,728	1,952	3,374	8,377
10.	1,571	10,505	47,271	3,936	2,061	3,990	7,729