



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
STATYBOS FAKULTETAS
GELŽETONINIŲ KONSTRUKCIJŲ IR GEOTECHNIKOS KATEDRA

Vidmantas Vitkus

**IŠ ANKSTO ĮTEMPTOS ARMATŪROS PADĖTIES ĮTAKA LENKIMO
MOMENTŲ PASISKIRSTYMO TRIATRAMĖSE SIJOSE**

INFLUENCE OF PRESTRESSED REINFORCEMENT POSITION ON THE
DISTRIBUTION OF BENDING MOMENTS IN CONTINUOUS BEAMS WITH
THREE SUPPORTS

Baigiamasis magistro darbas

Statinių konstrukcijų studijų programa, valstybinis kodas 6211EX040

Pastatų konstrukcijų specializacija

Statybos inžinerijos studijų kryptis 02T

Vilnius, 2023

<table><tr><td>Vilniaus Gedimino technikos universitetas</td></tr><tr><td>Statybos fakultetas</td></tr><tr><td>Gelžbetoninių konstrukcijų ir geotechnikos katedra</td></tr></table>		Vilniaus Gedimino technikos universitetas	Statybos fakultetas	Gelžbetoninių konstrukcijų ir geotechnikos katedra	<table><tr><td>ISBN</td><td>ISSN</td></tr><tr><td>Egz. sk.</td><td></td></tr><tr><td>Data-.....-.....</td><td></td></tr></table>	ISBN	ISSN	Egz. sk.		Data-.....-.....	
Vilniaus Gedimino technikos universitetas											
Statybos fakultetas											
Gelžbetoninių konstrukcijų ir geotechnikos katedra											
ISBN	ISSN										
Egz. sk.											
Data-.....-.....											
Antrosios pakopos studijų Statinių konstrukcijų programos magistro baigiamasis darbas											
Pavadinimas	Iš anksto įtemptos armatūros padėties įtaka lenkimo momentų pasiskirstymui triatramėse sijose										
Autorius	Vidmantas Vitkus										
Vadovas	Juozas Valivonis										
<table><tr><td></td><td>Kalba: lietuvių</td></tr></table>			Kalba: lietuvių								
	Kalba: lietuvių										
Anotacija Šiame baigiamajame magistro darbe nagrinėjama iš anksto įtemptos armatūros padėties įtaka lenkimo momentų pasiskirstymui triatramėse sijose. Darbas susideda iš trijų pagrindinių dalių: literatūros analizės, analitinių skaičiavimų ir skaitinės analizės. Literatūros analizėje nagrinėjama iš anksto įtemptų daugiaatramių gelžbetoninių sijų elgsena, armatūros padėties įtaka lenkimo momentų pasiskirstymui bei analizuojami lenkimo momentų, kurie gaunami nuo skirtingų armatūros padėčių skerspjūvyje, apskaičiavimo metodai. Analitinių skaičiavimų skyriuje atliekami šešių sijų, taikant skirtingas iš anksto įtemptos armatūros išdėstymo schemas, skaičiavimai ir parametrinė analizė keičiant išankstinio apgniuždymo jėgos ekscentriciteto reikšmes bei išankstinio apgniuždymo jėgą. Taip pat lyginami kitų autorių eksperimentinių tyrimų rezultatai su apskaičiuotais teoriniais rezultatais. Skaitmeninės analizės dalyje yra sudaromi šešių sijų skaitmeniniai modeliai, apskaičiuojami lenkimo momentai nuo skirtingų įtemptos armatūros išdėstymo schemų bei palyginami gauti rezultatai analitinių skaičiavimų su gautais skaitmeninių modelių. Tiriamojo darbo pabaigoje pateikiamos išvados bei rekomendacijos. Baigiamasis darbas susideda iš įvado, trijų pagrindinių dalių, jų poskyrių ir skyrelių, išvadų, rekomendacijų, literatūros sąrašo ir priedų. Darbo apimtis – 82 p. teksto be priedų, 100 iliustr., 3 lent., 24 literatūros šaltiniai. Taip pat pridedamas darbo A priedas.											
Prasminiai žodžiai: daugiaatramė sija, iš anksto įtemptas gelžbetonis, pirminis momentas, antrinis momentas, iš anksto įtemptos armatūros padėtis, lenkimo momentų pasiskirstymas											

<table border="1"> <tr> <td>Vilnius Gediminas Technical University</td> </tr> <tr> <td>Faculty of Civil Engineering</td> </tr> <tr> <td>Department of Reinforced Concrete Structures and Geotechnics</td> </tr> </table>		Vilnius Gediminas Technical University	Faculty of Civil Engineering	Department of Reinforced Concrete Structures and Geotechnics	<table border="1"> <tr> <td>ISBN</td> <td>ISSN</td> </tr> <tr> <td>Copies No.</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Date-.....-.....</td> <td></td> </tr> </table>		ISBN	ISSN	Copies No.		Date-.....-.....								
Vilnius Gediminas Technical University																			
Faculty of Civil Engineering																			
Department of Reinforced Concrete Structures and Geotechnics																			
ISBN	ISSN																		
Copies No.																			
Date-.....-.....																			
<table border="1"> <tr> <td colspan="4">Master Degree Studies Structural Engineering study programme Master Graduation Thesis</td> </tr> <tr> <td>Title</td> <td colspan="3">Influence of Prestressed Reinforcement Position on the Distribution of bending Moments in Continuous Beams with three Supports</td> </tr> <tr> <td>Author</td> <td colspan="3">Vidmantas Vitkus</td> </tr> <tr> <td>Academic supervisor</td> <td colspan="3">Juozas Valivonis</td> </tr> </table>				Master Degree Studies Structural Engineering study programme Master Graduation Thesis				Title	Influence of Prestressed Reinforcement Position on the Distribution of bending Moments in Continuous Beams with three Supports			Author	Vidmantas Vitkus			Academic supervisor	Juozas Valivonis		
Master Degree Studies Structural Engineering study programme Master Graduation Thesis																			
Title	Influence of Prestressed Reinforcement Position on the Distribution of bending Moments in Continuous Beams with three Supports																		
Author	Vidmantas Vitkus																		
Academic supervisor	Juozas Valivonis																		
		<table border="1"> <tr> <td>Thesis language: Lithuanian</td> </tr> </table>		Thesis language: Lithuanian															
Thesis language: Lithuanian																			
<table border="1"> <tr> <td> Annotation This master's thesis examines the influence of pre-stressed reinforcement position on the distribution of bending moments in continuous beams with three supports. The thesis consists of three main parts: a literature review, analytical calculations, and numerical analysis. The literature review examines the behavior of pre-stressed multi-span reinforced concrete beams, the influence of reinforcement positioning on bending moment distribution, and methods for calculating bending moments obtained from different reinforcement positions in the cross-section. In the section of analytical calculations, calculations and parametric analysis are performed for six beams using different pre-stressing reinforcement layout schemes, by varying the values of pre-stressing force eccentricity and pre-stressing force. Additionally, the results of other authors experimental studies are compared with the calculated theoretical results. In the numerical analysis section, numerical models of six beams are created, bending moments are calculated for different pre-stressed reinforcement layout schemes, and the obtained results are compared with the results of analytical calculations. The conclusion of the study presents the conclusions and recommendations. The thesis includes an introduction, three main parts, their sections and subsections, conclusions, recommendations, a list of references, and appendices. The thesis comprises 82 pages of text excluding appendices, 100 illustrations, 3 tables, 24 references. Appendix A is provided. </td> </tr> </table>				Annotation This master's thesis examines the influence of pre-stressed reinforcement position on the distribution of bending moments in continuous beams with three supports. The thesis consists of three main parts: a literature review, analytical calculations, and numerical analysis. The literature review examines the behavior of pre-stressed multi-span reinforced concrete beams, the influence of reinforcement positioning on bending moment distribution, and methods for calculating bending moments obtained from different reinforcement positions in the cross-section. In the section of analytical calculations, calculations and parametric analysis are performed for six beams using different pre-stressing reinforcement layout schemes, by varying the values of pre-stressing force eccentricity and pre-stressing force. Additionally, the results of other authors experimental studies are compared with the calculated theoretical results. In the numerical analysis section, numerical models of six beams are created, bending moments are calculated for different pre-stressed reinforcement layout schemes, and the obtained results are compared with the results of analytical calculations. The conclusion of the study presents the conclusions and recommendations. The thesis includes an introduction, three main parts, their sections and subsections, conclusions, recommendations, a list of references, and appendices. The thesis comprises 82 pages of text excluding appendices, 100 illustrations, 3 tables, 24 references. Appendix A is provided.															
Annotation This master's thesis examines the influence of pre-stressed reinforcement position on the distribution of bending moments in continuous beams with three supports. The thesis consists of three main parts: a literature review, analytical calculations, and numerical analysis. The literature review examines the behavior of pre-stressed multi-span reinforced concrete beams, the influence of reinforcement positioning on bending moment distribution, and methods for calculating bending moments obtained from different reinforcement positions in the cross-section. In the section of analytical calculations, calculations and parametric analysis are performed for six beams using different pre-stressing reinforcement layout schemes, by varying the values of pre-stressing force eccentricity and pre-stressing force. Additionally, the results of other authors experimental studies are compared with the calculated theoretical results. In the numerical analysis section, numerical models of six beams are created, bending moments are calculated for different pre-stressed reinforcement layout schemes, and the obtained results are compared with the results of analytical calculations. The conclusion of the study presents the conclusions and recommendations. The thesis includes an introduction, three main parts, their sections and subsections, conclusions, recommendations, a list of references, and appendices. The thesis comprises 82 pages of text excluding appendices, 100 illustrations, 3 tables, 24 references. Appendix A is provided.																			
<table border="1"> <tr> <td> Keywords: continuous beams, pre-stressed reinforced concrete, primary moment, secondary moment, prestressed reinforcement position, distribution of bending moments </td> </tr> </table>				Keywords: continuous beams, pre-stressed reinforced concrete, primary moment, secondary moment, prestressed reinforcement position, distribution of bending moments															
Keywords: continuous beams, pre-stressed reinforced concrete, primary moment, secondary moment, prestressed reinforcement position, distribution of bending moments																			

TURINYS

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS.....	1
LENTELIŲ SĄRAŠAS.....	4
ĮVADAS.....	5
1. LITERATŪROS ANALIZĖ	7
1.1. Iš anksto įtempto gelžbetonio konstrukcijos esmė	7
1.2. Armatūros įtempimo būdai	8
1.3. Iš anksto įtempto plieno įvairovė.....	9
1.4. Įtemptojo gelžbetonio ribiniai įtempiai	11
1.5. Išankstiniai armatūros įtempimo nuostoliai.....	12
1.6. Ekscentriciteto ir iš anksto įtemptos armatūros įtempimo jėgos parinkimas	14
1.7. Daugiaatramių įtemptojo gelžbetonio sijų skaičiavimas	17
1.7.1. Esmė ir pranašumai	17
1.7.2. Įrašų nuo išankstinio apgniuždymo apskaičiavimas	18
1.7.3. Jėgų metodas.....	19
1.7.4. Skerspjūvio pasisukimo kampų metodas.....	21
1.7.5. Momentų persiskirstymo metodas.....	23
1.7.6. Teorinių tyrimų analizė	25
1.7.7. Eksperimentinių tyrimų analizė.....	27
1.7.8. Teorinių ir eksperimentinių tyrimų palyginimas	29
1.8. Skyriaus išvados	31
2. ANALITINIAI SKAIČIAVIMAI	32
2.1. Tiriamos konstrukcijos	32
2.2. Sijų analitiniai skaičiavimai.....	34
2.3. Analitinė parametrinė analizė	45
2.4. Analitinių ir eksperimentinių rezultatų palyginimas	56
2.5. Skyriaus išvados	61
3. SKAITINĖ ANALIZĖ	62
3.1. Modeliuojamų konstrukcijų aprašymas	62
3.2. Sijų skaitinė analizė	66
3.3. Skaitmeninės ir analitinės analizės rezultatų palyginimas.....	72
3.4. Skyriaus išvados	78
BENDROSIOS DARBO IŠVADOS	79
REKOMENDACIJOS.....	80
LITERATŪROS SĄRAŠAS.....	81
PRIEDAI	83

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Gelžbetoninė sija (Mosley et al., 2007).....	7
1.2 pav. Iš anksto įtempta gelžbetoninė sija.....	7
1.3 pav. Mechaninis armatūros įtempimo būdas: a – armatūra įtempama tarp atsparų; b – betonuojama konstrukcija; c – atleidžiama armatūra ir perduodama įtempimo jėga konstrukcijai	8
1.4 pav. Išorinis išankstinis įtempimas: a – betonas pilamas aplink plastmasinį apvaskalą; b – įtempama armatūra; c – atleidžiama armatūra.....	9
1.5 pav. Lynai: a) iš 19 vielų sudaryta gija; b) iš 7 gijų sudarytas lynas (certex.lt).....	9
1.6 pav. Strypas su sriegiu (bbv – systems.com)	10
1.7 pav. Įtempių ir deformacijų schema iš anksto įtempto plieno ir paprastos armatūros plieno (Nawy, 2002).....	10
1.8 pav. Įtempių pasiskirstymas ir jų leistinos ribos: a – gamybos etapo metu; b – eksploatacijos metu (Marčiukaitis, 2012)	12
1.9 pav. G.Manjelio diagramos schema (Marčiukaitis, 2012).....	14
1.10 pav. Armatūros padėtis, kai plyšiai tempiamojoje zonoje leidžiami gamybos ir naudojimo etapuose: 1 – nėra išankstinio įtempimo nuostolių; 2 – nuostoliai sudaro 10 %; 3 – 15 %; 4 – 20 %; 5 – apatinė armatūros padėtis (Jokūbaitis, 2013)	16
1.11 pav. Armatūros padėtis, kai plyšiai tempiamojoje zonoje neleidžiami gamybos ir naudojimo etapuose: 1 – nėra išankstinio įtempimo nuostolių; 2 – nuostoliai sudaro 10 %; 3 – 15 %; 4 – 20 %; 5 – apatinė armatūros padėtis (Jokūbaitis, 2013)	16
1.12 pav. Armatūros padėtis, kai plyšiai tempiamojoje zonoje neleidžiami gamybos etape, bet leidžiami naudojimo etape: 1 – nėra išankstinio įtempimo nuostolių; 2 – nuostoliai sudaro 10 %; 3 – 15 %; 4 – 20 %; 5 – apatinė armatūros padėtis (Jokūbaitis, 2013)	17
1.13 pav. Armatūros padėtis, kai plyšiai tempiamojoje zonoje leidžiami gamybos etape, bet neleidžiami naudojimo etape: 1 – nėra išankstinio įtempimo nuostolių; 2 – nuostoliai sudaro 10 %; 3 – 15 %; 4 – 20 %; 5 – apatinė armatūros padėtis (Jokūbaitis, 2013)	17
1.14 pav. Triatramės sijos schema (Gilbert et al., 2016).....	18
1.15 pav. Lenkimo momentai nuo iš anksto įtemptos armatūros statiskai neišsprendžiamoje sijoje: a – skaičiuotinė schema; b – pirminio momento diagrama; c – reakcijos; d – antrinis momentas; e – suminiai lenkimo momentai (Gilbert et al., 2016).....	20
1.16 pav. Sijų su tiesine (a) ir paraboline (b, c, d) iš anksto įtempta armatūra ekvivalentinės apkrovos ir deformacijos (Marčiukaitis, 2012).....	21
1.17 pav. Lenkimo momentų diagramos nustatymas skerspjuvio pasisukimo θ kampų metodu (Marčiukaitis, 2012)	22
1.18 pav. Sutelktieji momentai ir momentų pasikeitimo perdavimas kitam sijos galui (Gilbert et al., 2016).....	24
1.19 pav. Lynų išdėstymo schema (Witchukreangkrai et al., 2003).....	25
1.20 pav. Tyrime naudojamų sijų schemas (Tiejiong Lou et al., 2010)	26
1.21 pav. Tyrime naudotos sijos schema (Halvonik et al., 2018)	27
1.22 pav. Eksperimente naudotų sijų lynų išdėstymo schemas (Thiru Aravithan et al., 2005).....	27
1.23 pav. Eksperimentinio tyrimo skerspjuvio pjūviai: a – tarpatramio viduryje; b – vidurinėje atramoje (Halvonik et al., 2018).....	28
1.24 pav. Lynų išdėstymo schema (Halvonik et al., 2018).....	28

1.25 pav. Dviejų tarpatriamių T tipo sija: I –V valdymo blokai (Ning Duan et al., 2022).....	29
1.26 pav. Lenkimo momentų pasiskirstymas išilgai tarpatriamio (Witchukreangkrai et al., 2003) ..	29
1.27 pav. Teorinių ir eksperimentinių tyrimų rezultatų palyginimas pjūvyje 1-1 (Halvonik et al., 2018).....	30
1.28 pav. Teorinių ir eksperimentinių tyrimų rezultatų palyginimas pjūvyje 2-2 (Halvonik et al., 2018).....	30
2.1 pav. Skaičiuojamoji triatramės sijos schema ir skerspjūvio pjūviai	32
2.2 pav. Šešių sijų nuo A-1 iki A-6 skaičiuojamosios schemas su skirtingais įtemptos armatūros išdėstymais per sijos ilgį.....	33
2.3 pav. Sijos A-1 gauti lenkimo momentai tik nuo išankstinio apgniuždymo	34
2.4 pav. Sijos A-1 gauti lenkimo momentai nuo išankstinio apgniuždymo ir išorinės apkrovos	35
2.5 pav. Sijos A-2 gauti lenkimo momentai tik nuo išankstinio apgniuždymo	35
2.6 pav. Sijos A-2 gauti lenkimo momentai nuo išankstinio apgniuždymo ir išorinės apkrovos	36
2.7 pav. Sijos A-3 gauti lenkimo momentai tik nuo išankstinio apgniuždymo	37
2.8 pav. Sijos A-3 gauti lenkimo momentai nuo išankstinio apgniuždymo ir išorinės apkrovos	37
2.9 pav. Sijos A-4 gauti lenkimo momentai tik nuo išankstinio apgniuždymo	38
2.10 pav. Sijos A-4 gauti lenkimo momentai nuo išankstinio apgniuždymo ir išorinės apkrovos ...	39
2.11 pav. Sijos A-5 gauti lenkimo momentai tik nuo išankstinio apgniuždymo	39
2.12 pav. Sijos A-5 gauti lenkimo momentai nuo išankstinio apgniuždymo ir išorinės apkrovos ...	40
2.13 pav. Sijos A-6 gauti lenkimo momentai tik nuo išankstinio apgniuždymo	41
2.14 pav. Sijos A-6 gauti lenkimo momentai nuo išankstinio apgniuždymo ir išorinės apkrovos ...	41
2.15 pav. Pirminiai momentai sijų nuo A-1 iki A-6.....	42
2.16 pav. Antriniai momentai sijų nuo A-1 iki A-6	43
2.17 pav. Bendri lenkimo momentai nuo išankstinio apgniuždymo sijų nuo A-1 iki A-6	43
2.18 pav. Suminiai lenkimo momentai sijų nuo A-1 iki A-6.....	44
2.19 pav. Sijos A-1 lenkimo momentų kitimas (tik nuo išankstinio apgniuždymo) keičiant išankstinio apgniuždymo jėgos ekscentricitetą.....	45
2.20 pav. Sijos A-1 lenkimo momentų kitimas (suminis lenkimo momentas) keičiant išankstinio apgniuždymo jėgos ekscentricitetą.....	46
2.21 pav. Sijos A-2 lenkimo momentų kitimas (tik nuo išankstinio apgniuždymo) keičiant išankstinio apgniuždymo jėgos ekscentricitetą.....	46
2.22 pav. Sijos A-2 lenkimo momentų kitimas (suminis lenkimo momentas) keičiant išankstinio apgniuždymo jėgos ekscentricitetą.....	47
2.23 pav. Sijos A-3 lenkimo momentų kitimas (tik nuo išankstinio apgniuždymo) keičiant išankstinio apgniuždymo jėgos ekscentricitetą.....	47
2.24 pav. Sijos A-3 lenkimo momentų kitimas (suminis lenkimo momentas) keičiant išankstinio apgniuždymo jėgos ekscentricitetą.....	48
2.25 pav. Sijos A-4 lenkimo momentų kitimas (tik nuo išankstinio apgniuždymo) keičiant išankstinio apgniuždymo jėgos ekscentricitetą.....	48
2.26 pav. Sijos A-4 lenkimo momentų kitimas (suminis lenkimo momentas) keičiant išankstinio apgniuždymo jėgos ekscentricitetą.....	49
2.27 pav. Sijos A-5 lenkimo momentų kitimas (tik nuo išankstinio apgniuždymo) keičiant išankstinio apgniuždymo jėgos ekscentricitetą.....	49

2.28 pav. Sijos A-5 lenkimo momentų kitimas (suminis lenkimo momentas) keičiant išankstinio apgniuždymo jėgos ekscentricitetą.....	50
2.29 pav. Sijos A-6 lenkimo momentų kitimas (tik nuo išankstinio apgniuždymo) keičiant išankstinio apgniuždymo jėgos ekscentricitetą.....	50
2.30 pav. Sijos A-6 lenkimo momentų kitimas (suminis lenkimo momentas) keičiant išankstinio apgniuždymo jėgos ekscentricitetą.....	51
2.31 pav. Sijos A-1 lenkimo momentų kitimas B atramoje keičiant išankstinio apgniuždymo jėgą	52
2.32 pav. Sijos A-2 lenkimo momentų kitimas B atramoje keičiant išankstinio apgniuždymo jėgą	53
2.33 pav. Sijos A-3 lenkimo momentų kitimas B atramoje keičiant išankstinio apgniuždymo jėgą	53
2.34 pav. Sijos A-4 lenkimo momentų kitimas B atramoje keičiant išankstinio apgniuždymo jėgą	54
2.35 pav. Sijos A-5 lenkimo momentų kitimas B atramoje keičiant išankstinio apgniuždymo jėgą	55
2.36 pav. Sijos A-6 lenkimo momentų kitimas B atramoje keičiant išankstinio apgniuždymo jėgą	55
2.37 pav. Analizuojamos sijos skaičiuotinė schema ir pjūviai 1-1 ir 2-2 (Halvonik et al, 2018)	56
2.38 pav. Analitiniais skaičiavimais gauti lenkimo momentai tik nuo išankstinio apgniuždymo.....	57
2.39 pav. Halvonik et al. eksperimentinio tyrimo metu gauti lenkimo momentai tik nuo išankstinio apgniuždymo (Halvonik et al, 2018)	58
2.40 pav. Halvonik et al. eksperimento ir apskaičiuoti analitiniu būdu antriniai momentai	58
2.41 pav. Halvonik et al. eksperimento ir apskaičiuoti analitiniu būdu išorinės apkrovos sukelti lenkimo momentai	59
2.42 pav. Halvonik et al. eksperimento ir apskaičiuoti analitiniu būdu gauti suminiai lenkimo momentai	59
2.43 pav. Analitiniais skaičiavimais gauti lenkimo momentai tik nuo išankstinio apgniuždymo įvedus koeficientą α	60
2.44 pav. Halvonik et al. eksperimento ir apskaičiuoti analitiniu būdu bei įvertinus koeficientą α gauti antriniai momentai	61
3.1 pav. Sijos 2D ir 3D modelis	62
3.2 pav. Naudojimo apkrova ir savasis konstrukcijos svoris	64
3.3 pav. Išankstinio apgniuždymo jėga	64
3.4 pav. Sumodeliuotų sijų nuo A-1 iki A-3 skaičiuotiniai modeliai	64
3.5 pav. Sumodeliuotų sijų nuo A-4 iki A-6 skaičiuotiniai modeliai	65
3.6 pav. Sijos A-1 bendri lenkimo momentai nuo išankstinio apgniuždymo jėgos gauti programiniu paketu „IDEA StatiCa“	66
3.7 pav. Sijos A-2 bendri lenkimo momentai nuo išankstinio apgniuždymo jėgos gauti programiniu paketu „IDEA StatiCa“	66
3.8 pav. Sijos A-3 bendri lenkimo momentai nuo išankstinio apgniuždymo jėgos gauti programiniu paketu „IDEA StatiCa“	67
3.9 pav. Sijos A-4 bendri lenkimo momentai nuo išankstinio apgniuždymo jėgos gauti programiniu paketu „IDEA StatiCa“	67
3.10 pav. Sijos A-5 bendri lenkimo momentai nuo išankstinio apgniuždymo jėgos gauti programiniu paketu „IDEA StatiCa“	68
3.11 pav. Sijos A-6 bendri lenkimo momentai nuo išankstinio apgniuždymo jėgos gauti programiniu paketu „IDEA StatiCa“	68
3.12 pav. Sijos A-1 suminiai lenkimo momentai gauti programiniu paketu „IDEA StatiCa“	69

3.13 pav. Sijos A-2 suminiai lenkimo momentai gauti programiniu paketu „IDEA StatiCa“	69
3.14 pav. Sijos A-3 suminiai lenkimo momentai gauti programiniu paketu „IDEA StatiCa“	70
3.15 pav. Sijos A-4 suminiai lenkimo momentai gauti programiniu paketu „IDEA StatiCa“	70
3.16 pav. Sijos A-5 suminiai lenkimo momentai gauti programiniu paketu „IDEA StatiCa“	71
3.17 pav. Sijos A-6 suminiai lenkimo momentai gauti programiniu paketu „IDEA StatiCa“	71
3.18 pav. Teorinių ir programinės įrangos pirminių momentų rezultatų palyginimas A atramoje...	72
3.19 pav. Teorinių ir programinės įrangos pirminių momentų rezultatų palyginimas tarpatramio viduryje.....	72
3.20 pav. Teorinių ir programinės įrangos pirminių momentų rezultatų palyginimas B atramoje ...	73
3.21 pav. Teorinių ir programinės įrangos antrinių momentų rezultatų palyginimas tarpatramio viduryje.....	73
3.22 pav. Teorinių ir programinės įrangos antrinių momentų rezultatų palyginimas B atramoje	74
3.23 pav. Teorinių ir programinės įrangos bendrų (pirminių ir antrinių momentų suma) lenkimo momentų nuo išankstinio apgniuždymo rezultatų palyginimas A atramoje.....	74
3.24 pav. Teorinių ir programinės įrangos bendrų (pirminių ir antrinių momentų suma) lenkimo momentų nuo išankstinio apgniuždymo rezultatų palyginimas tarpatramio viduryje.....	75
3.25 pav. Teorinių ir programinės įrangos bendrų (pirminių ir antrinių momentų suma) lenkimo momentų nuo išankstinio apgniuždymo rezultatų palyginimas B atramoje.....	75
3.26 pav. Teorinių ir programinės įrangos suminių lenkimo momentų rezultatų palyginimas A atramoje	76
3.27 pav. Teorinių ir programinės įrangos suminių lenkimo momentų rezultatų palyginimas tarpatramio viduryje	76
3.28 pav. Teorinių ir programinės įrangos suminių lenkimo momentų rezultatų palyginimas B atramoje	77

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1.1 lentelė. Pagrindiniai išankstinio įtempimo nuostolių tipai (pagal Marčiukaitis, 2012)	13
3.1 lentelė. Parinktų lynų parametrai (pagal „IDEA StatiCa“)	63
3.2 lentelė. Betono parametrai (pagal „IDEA StatiCa“)	63

IVADAS

Gelžbetoninės konstrukcijos yra vienos iš populiariausių pastatų ir kitų statinių konstrukcijų. Tobulėjant šiuolaikinei statybai vis plačiau pradedamas naudoti iš anksto įtemptas gelžbetonis. Vienas iš pagrindinių šių konstrukcijų pranašumų lyginant su įprastu gelžbetoniu yra tai, kad jomis galima perdengti didelius tarpatramius bei tinkamai atliekant projektavimo darbus sumažinti konstrukcijoms naudojamus medžiagų kiekius. Taip pat šios konstrukcijos pasižymi atsparumu korozijai, dideliu atsparumu ugniai bei ilgalaikiškumu.

Atliekant iš anksto įtemptos sijos projektavimą, dažnai neišnaudojami visi šios konstrukcijos efektyvumą didinantys privalumai. Vienas iš jų – iš anksto įtemptos armatūros padėtis. Tiksliai parinkus armatūros padėtį pavojingiausiuose konstrukcijos pjūviuose galima panaikinti tempimo įtempius nuo išorinių apkrovų, sumažinti konstrukcijos savąjį svorį. Taip pat iš anksto įtemptos armatūros padėtis gali turėti didelę įtaką lenkimo momentų pasiskirstymui daugiaatramėse sijose. Norint užtikrinti tokių konstrukcijų saugumą ir ilgaamžiškumą, projektuotojas turi suprasti iš anksto įtemptos armatūros padėties įtaką lenkimo momentų pasiskirstymui.

Šio magistro darbo tikslas yra išanalizuoti iš anksto įtemptos armatūros padėties įtaką triatramės sijos lenkimo momentų pasiskirstymui.

Šiam tikslui pasiekti išsikelti šie uždaviniai:

1. Atlikti literatūros, kurioje aprašomos tokio tipo sijos, jų elgsena ir skaičiavimai, analizę.
2. Išnagrinėti armatūros padėties įtaką lenkimo momentų pasiskirstymui taikant teorinius skaičiavimus.
3. Sumodeliuoti baigtinių elementų programa nagrinėjamą konstrukciją ir atlikti skaitinę analizę.
4. Palyginti skaitinio modelio ir teorinių skaičiavimų rezultatus.

Baigiamasis magistro darbas sudarytas iš trijų pagrindinių skyrių. Pirmajame skyriuje aptariama literatūra, kurioje aprašoma iš anksto įtemptų daugiaatramių gelžbetoninių sijų elgsena, armatūros padėties įtaka lenkimo momentų pasiskirstymui bei momentų nuo skirtingų armatūros padėčių skerspjuvyje apskaičiavimo metodai. Literatūros apžvalgos skyriuje taip pat aptariami atlikti eksperimentiniai tyrimai, kuriuose buvo nagrinėjami lenkimo momentų pasiskirstymai nuo skirtingų armatūros padėčių skerspjuvyje. Antroje dalyje aprašomi atliktų analitinių skaičiavimų rezultatai, gauti taikant skirtingus iš anksto įtemptos armatūros variantus šešioms nagrinėjamoms sijoms. Taip pat praktinėje darbo dalyje analizuojami atliktos parametrinės analizės rezultatai, gauti keičiant išankstinio apgniuždymo jėgos ekscentriciteto reikšmes bei išankstinio apgniuždymo jėgą. Be to, lyginami kitų autorių eksperimentinių tyrimų rezultatai su apskaičiuotais teoriniais rezultatais. Trečiasis skyrius skirtas antrame skyriuje nagrinėtų sijų modeliavimui ir skaitinei analizei. Taip pat

lyginami gauti analitinių skaičiavimų rezultatai su gautais programine įranga. Darbo pabaigoje pateikiamos išvados ir rekomendacijos.

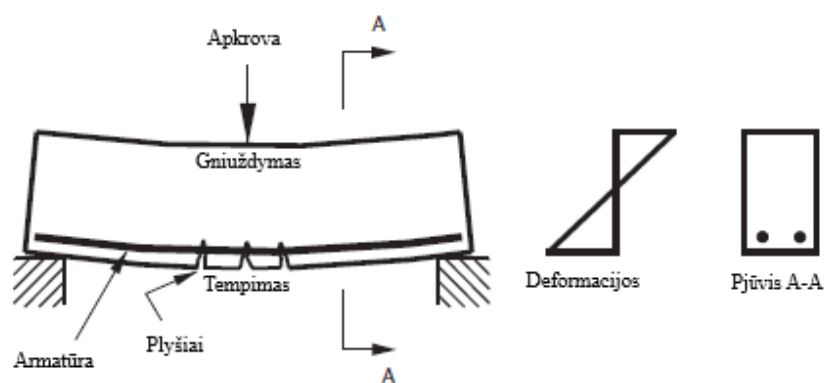
Šio baigiamojo magistro darbo tyrimo metodologija remiasi kampų pasisukimo metodu, kuris leidžia apskaičiuoti lenkimo momentus nuo skirtingų iš anksto įtemptos armatūros padėčių. Tyrimas buvo atliktas trimis etapais. Pirmuoju etapu pasirenkami nagrinėjamų konstrukcijų matmenys, forma, medžiagos ir sukuriamos skaičiuotinės sijų schemos. Antruoju etapu atliekami sijų lenkimo momentų skaičiavimai, remiantis kampų pasisukimo metodu. Trečiuoju etapu buvo kuriami modeliai baigtinių elementų programine įranga „IDEA StatiCa“ ir atliekama skaitinė analizė. Gauti tyrimo rezultatai analizuojami ir interpretuojami grafinės analizės metodu.

Pagrindinė nagrinėjamos temos problema yra informacijos ir konkrečių tyrimų trūkumai, kurie nagrinėja iš anksto įtemptos armatūros padėties įtaką lenkimo momentų pasiskirstymui triatramėse sijose. Pasirinkta darbo tema yra aktuali, nes gali suteikti vertingų įžvalgų ir reikšmingos informacijos inžinieriams ir mokslininkams, kadangi buvo nagrinėjamos ir lyginamos šešios iš anksto įtemptos triatramės sijos su skirtingomis armatūros padėtimis skerspjūvyje. Darbe naudojama viena iš patikimiausių skaičiavimo metodikų ir plačiai naudojama statybų pramonėje programinė įranga „IDEA StatiCa“.

1. LITERATŪROS ANALIZĖ

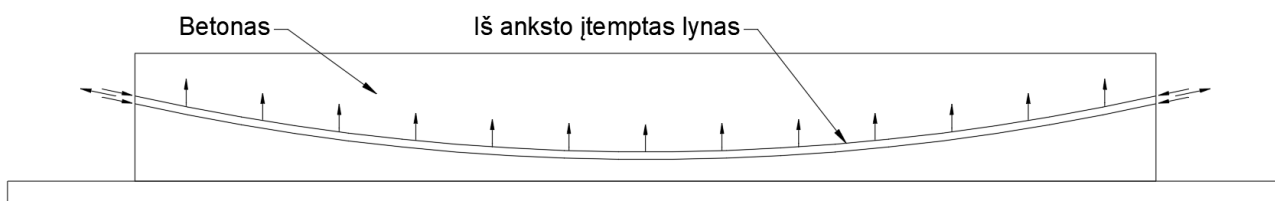
1.1. Iš anksto įtempto gelžbetonio konstrukcijos esmė

Iš anksto įtemptas gelžbetonis pradėtas naudoti norint panaikinti paprastoje gelžbetoninėje konstrukcijoje atsirandančius plyšius. Žinoma, jog nearmuotas betonas blogai atlaiko tempimo įtempius. Jo tempiamasis stipris svyruoja nuo 8 iki 14 procentų gniuždymo stiprio (Nawy 2002). Norint pagerinti šią betono savybę buvo pradėta armuoti konstrukcijas armatūra, nuo ko ir atsirado gelžbetoninės konstrukcijos. Nors plieninė armatūra užtikrina įtrūkusios konstrukcijos lenkiamąjį stiprumą, ji neapsaugo nuo įtrūkimų ir standumo praradimo (Gilbert et al., 2016). Tačiau didinant armatūros kiekį galima reguliuoti atsirandančius plyšius betone (žr. 1.1 pav.), bet tai ne visada galima padaryti dėl konstrukcijos matmenų. Tai lėmė, jog buvo ieškomi būdai, kaip padidinti gelžbetoninės konstrukcijos tempiamosios zonos atsparumą pleišėjimui.



1.1 pav. Gelžbetoninė sija (Mosley et al., 2007)

Išankstinis įtempimas – tai sąmoningas nuolatinių vidinių įtempių sukūrimas konstrukcijoje ar sistemoje, siekiant pagerinti jos eksploatacines savybes (Naaman, 2004). Įtempto gelžbetonio veikimo principas yra toks, jog prieš eksploatuojant konstrukciją sukeliama pradiniai įtempimai, kuriuos konstrukcija galėtų perimti eksploatavimo laikotarpiu (žr. 1.2 pav.). Šitaip konstrukcijoje yra sumažinami tempimo įtempiai. Pradiniai įtempiai sukeliama apgniuždymo jėgos, kurią palaiko smarkiai įtempta armatūra. Tai leidžia pašalinti konstrukcijoje galimus atsirasti plyšius. Taip pat iš anksto įtempto gelžbetonio konstrukcijoje atsiranda vidinės jėgos, kurios panaikina arba sumažina nuo išorinės apkrovos sukeltą įlinkį.



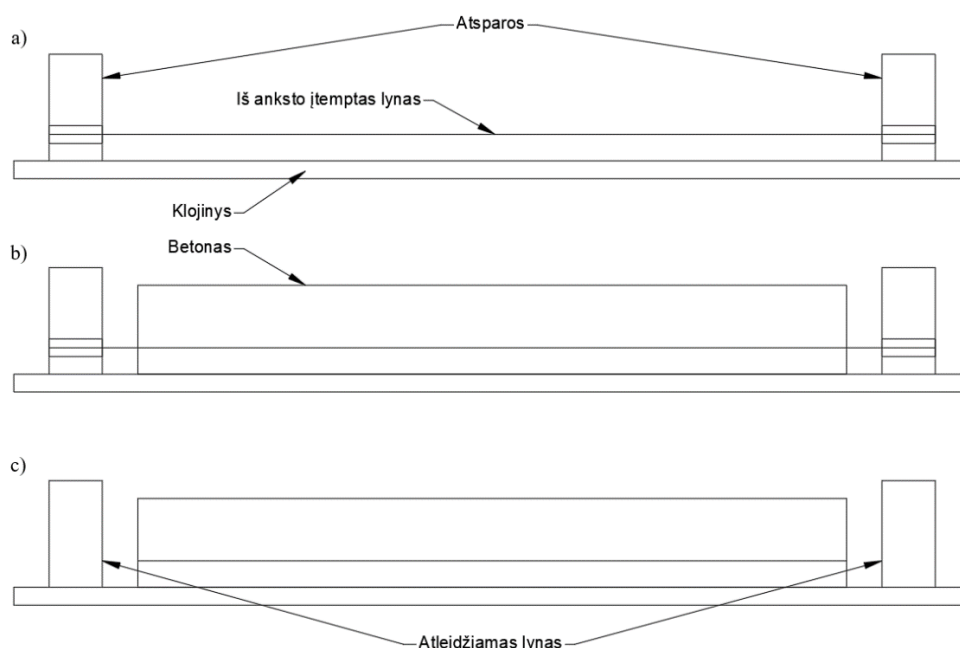
1.2 pav. Iš anksto įtempta gelžbetoninė sija

1.2. Armatūros įtempimo būdai

Yra keletas būdų išankstiniam įtempimui. Iš esmės jie gali būti išskirstyti į dvi grupes: išankstinis įtempimas prieš betonavimo darbus ir įtempimas po betonavimo darbų.

Išankstinis įtempimas prieš betonavimą

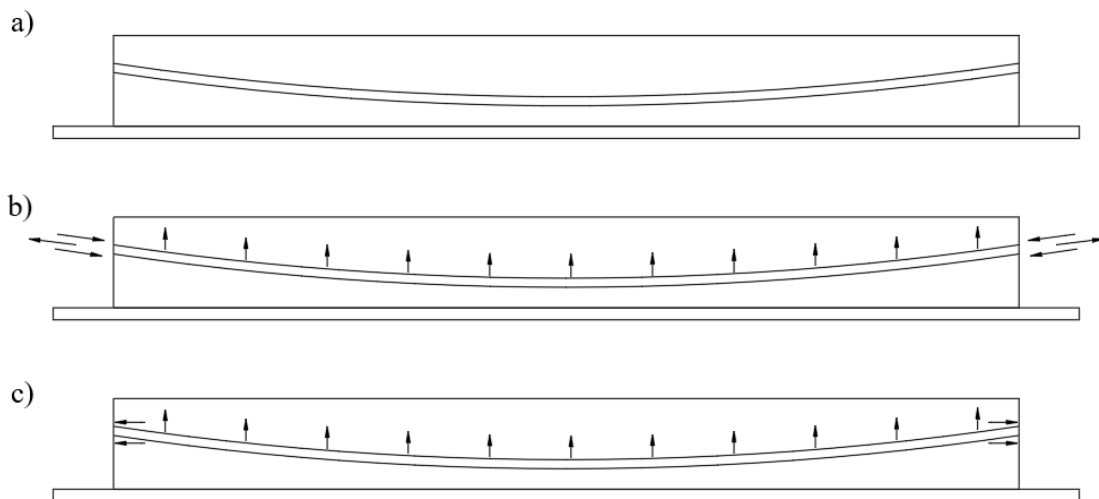
Šios armatūros įtempimo metodo seka pateikta 1.3 paveiksle. Prieš betonuojant konstrukciją į fiksuotas atsparas įtempinama armatūra. Tuomet įrengiami klojiniai ir atliekami betonavimo darbai. Pasiekus reikiamą betono stiprį įtempta armatūra nukerpama nuo atsparų. Taip konstrukcijai perduodama įtempimo jėga, kuri betoną gniuždo. Dažniausiai toks armatūros įtempimas naudojamas surenkamoms konstrukcijoms ir atliekamas gamyklose. Dėl to, jog tai atliekama gamyklose konstrukcijos turi ribotą ilgį, dėl transportavimo ribojimų ir kranų keliamosios galios.



1.3 pav. Mechaninis armatūros įtempimo būdas: a – armatūra įtempinama tarp atsparų; b – betonuojama konstrukcija; c – atleidžiama armatūra ir perduodama įtempimo jėga konstrukcijai

Įtempimas po betonavimo darbų

Šiuo metodo atveju įrengiami klojiniai ir pilamas betonas aplink tuščiavidurius plastmasinius apvalkalus. Jie neleidžia betonui sukibti su armatūra. Betonui pasiekus reikiamą stiprį, įtempinama armatūra specialiais įrankiais (domkratais, įtempimo mašinomis). Atliekant armatūros įtempimą betonas apgniuždomas, tai reiškia, jog armatūroje atsiradę tempimo įtempiai perduodami į betoną apgniuždant jį. Paskutiniu šio įrengimo etapu metu įtvirtinama įtempta armatūra į inkarus ir jos kanalai užpildomi skiediniu, jog būtų geresnis sukibimas, armatūra nekoroduotų. Šio metodo seka pavaizduota 1.4 paveiksle. Šis armatūros įtempimas galimas gamyklose ir statybvietėje. Konstrukcijų ilgiai yra neribojami, kadangi nereikalingas transportavimas ir kėlimas.



1.4 pav. Išorinis išankstinis įtempimas: a – betonas pilamas aplink plastmasinę apvaskalą; b – įtempiamą armatūra; c – atleidžiama armatūra

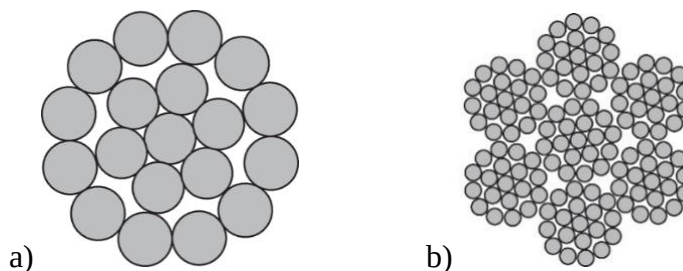
1.3. Iš anksto įtempio plieno įvairovė

Dėl didelių praslydimo ir sukibimo nuostolių betone veiksmingą išankstinį įtempimą galima pasiekti naudojant labai didelio stiprio plienus (Nawy, 2002). Tokie didelio stiprio plienai gali užtikrinti pakankamą išankstinio įtempimo jėgą netgi atsirandant tam tikriems nuostoliams. Kitu atveju dėl išankstinio įtempimo nuostolių įtempiai armatūroje sumažėtų smarkiai arba išnyktų. Pastatų gelžbetoninėms konstrukcijoms naudojami trys pagrindiniai iš anksto įtempio plieno tipai:

1. Šalto tempimo viela;
2. Lynai;
3. Įtempiami strypai.

Vielų skersmuo paprastai būna 2,5 – 12,5 mm. Tipinis vielos tempiamasis stipris f_k yra nuo 1570 iki 1860 MPa.

Lynai dažniausiai būna 7 ir 19 gijų, kaip parodyta 1.5 paveiksle. Gijos tai paprasčiausiai aplink šerdį suvyniotos vielos. Dažniausiai šerdis būna plieninė, bet gali būti ir pluoštinė bei plastikinė monolitinė. Įtemptai vielai naudojama plieninė dėl tenkamų didelių apkrovų. 7 gijų skersmuo kinta nuo 7 – 15,2 mm, o tempiamasis stipris f_k yra nuo 1770 iki 2060 MPa.



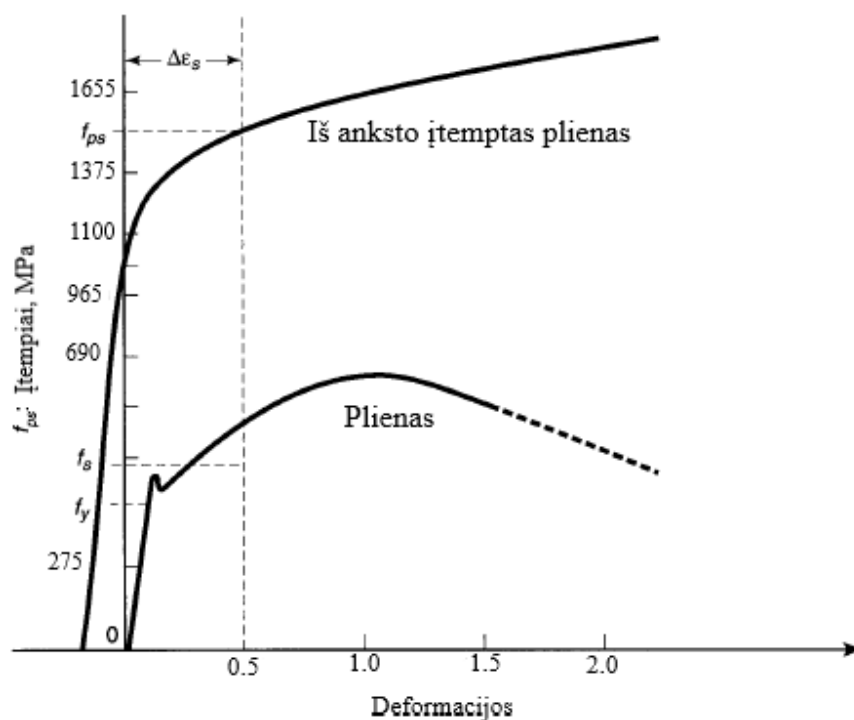
1.5 pav. Lynai: a) iš 19 vielų sudaryta gija; b) iš 7 gijų sudarytas lynas (certex.lt)

Įtempiami strypai dažniausiai gaminami lygiu arba rumbuotu paviršiumi. Gaminant lygius strypus galima padaryti jos tokius, kad būtų su sriegiu strypo gale, jog tvirtintusi prie plokštelės veržle, kaip pavaizduota 1.6 paveiksle. Rumbuoti strypai naudojami, jog būtų pagerintas sukibimas. Dažniausiai naudojami strypų skersmenys 20 – 50 mm, o jų o tempiamasis stipris f_k yra nuo 1030 iki 1230 MPa.



1.6 pav. Strypas su sriegiu (bbv – systems.com)

Iš anksto įtempto plieno tempiamasis stipris 2 – 4 kartus didesnis už paprastos armatūros tempiamąjį stiprį. Iš anksto įtemptas plienas turi didesnę atsparumą kol pasieks takumo ribą. 1.7 paveiksle pavaizduota kaip skiriasi iš anksto įtempto plieno ir paprasto plieno įtempimų ir deformacijų priklausomybės grafikai.



1.7 pav. Įtempimų ir deformacijų schema iš anksto įtempto plieno ir paprastos armatūros plieno (Nawy, 2002)

1.4. Įtemptojo gelžbetonio ribiniai įtempiai

Konstrukcijos, kuriuose naudojamas iš anksto įtemptas gelžbetonis, kaip ir kiti gelžbetoniniai elementai turi tenkinti ribinius būvius, jog neprarastų savo laikomosios galios ir atlaikytų išorinius poveikius. Taip pat konstrukcijos negali viršyti nustatytų įlinkių ir plyšių reikšmių. Tam turi būti tenkinami saugos ir tinkamumo ribiniai būviai. Jei konstrukcija tenkinama vieno ribinio būvio, tai nereiškia, jog kitas bus tenkinamas taip pat, todėl kiekvieną ribinį būvį reikia tikrinti atskirai. Be to projektuojant iš anksto įtemptas gelžbetonines konstrukcijas reikia įvertinti ir ribinių įtempių reikšmes tiek gamybos etape tiek eksploatacijos metu.

Ribiniai įtempiai gamybos etape

Iš anksto įtempto gelžbetonio konstrukcijose dėl galimų plyšių atsiradimo ribojami betono gniuždomieji įtempiai. Vadovaujantis LST EN 1992–1–1 projektavimo normomis gamybos etape betono gniuždomieji ribiniai įtempiai lygūs:

$$f_{max} = 0,6f_{ck}(t), \quad (1.1)$$

čia:

$f_{ck}(t)$ – betono charakteristinis gniuždomasis stipris laiko momentu t , kai jį veikia išankstinio įtempimo jėga.

Taip pat vadovaujantis LST EN 1992–1–1 projektavimo normomis gamybos etape betono tempiamieji ribiniai įtempiai lygūs vidutiniam betono ašiniam tempiamajam stipriui:

$$f_{min} = -f_{ctm}(t), \quad (1.2)$$

čia:

$f_{ctm}(t)$ – vidutinis betono ašinis tempiamasis stipris.

Gamybos etapas trunka iki 28 dienų, kol betonas pasiekia reikiamą stiprį. Visą tą laiką betone įtempių pasiskirstymas yra priešingas negu išorės apkrovų sukeltų įtempių.

Ribiniai įtempiai eksploatacijos metu

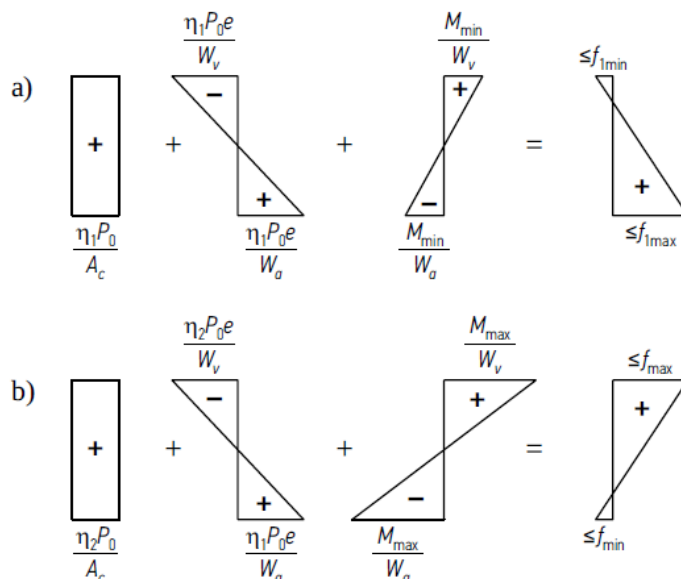
Eksploatacijos metu kaip ir gamybos metu dėl galimų plyšių atsiradimo ribojami betono gniuždomieji įtempiai, kurie taip pat vadovaujantis LST EN 1992–1–1 projektavimo normomis lygūs:

$$f_{1,max} = 0,45f_{ck}. \quad (1.3)$$

Taip pat vadovaujantis LST EN 1992–1–1 projektavimo normomis eksploatacijos metu betono tempiamieji ribiniai įtempiai lygūs vidutiniam betono ašiniam tempiamajam stipriui:

$$f_{1,min} = -f_{ctm}. \quad (1.4)$$

Pagal projektavimo normas pastatų eksploatacinis laikotarpis trunka 50 metų. Per šiuos metus padidėja ilgalaikiai iš anksto įtempto betono apgniuždymo nuostoliai ir išorė apkrova.



1.8 pav. Įtempių pasiskirstymas ir jų leistinos ribos: a – gamybos etapo metu; b – eksploatacijos metu (Marčiukaitis, 2012)

Gamybos etapo metu (žr. 1.8 pav. a) apspaudžiant betoną gniuždomieji įtempiai veikia apačioje, o tempimo įtempiai viršutinėje dalyje. Įtempių pasiskirstymas pasikeičia pasibaigus gamybos etapui ir perėjus į eksploatacijos laikotarpį. Veikiant naudojimo apkrovos įtempių pobūdis skerspjūvio viršuje ir apačioje pasikeičia: viršuje gaunami gniuždymo įtempiai, apačioje tempimo įtempiai (Marčiukaitis, 2012).

1.5. Išankstiniai armatūros įtempimo nuostoliai

Įtempiai iš anksto įtemptose gelžbetoninėse konstrukcijose laikui bėgant be perstojo mažėja, todėl svarbu nustatyti išankstinio įtempimo jėgos lygį kiekviename apkrovos etape. Šį mažėjimą lemia armatūros relaksacija, betono valksnumas, aplinkos drėgnis, temperatūra ir betono traukumas. Įtempių nuostolių atsiradimą galima nagrinėti konstrukcijos gamybos ir eksploatacijos etapuose. Gamybos etapo metu atsiradę nuostoliai vadinami pirminiais nuostoliais. O eksploatacijos metu įtempių sumažėjimas per laiką vadinamas ilgalaikiais nuostoliais. Tiksliai nustatyti šių nuostolių neįmanoma, ypač priklausančių nuo laiko (ilgalaikių), nes jie priklauso nuo daugybės tarpusavyje susijusių veiksnių (Nawy, 2002). Pirminiai nuostoliai dažniausiai atsiranda perduodant išankstinį įtempimą arba atleidžiant jį. Netikslus įvertinimas ilgalaikio išankstinio įtempimo gali sukelti eksploatacinių problemų, įskaitant betono įtrūkimus ir pernelyg didelį įlinkį ar išlinkimą (Samer et al., 2007). Bendrą išankstinio įtempimo sumažėjimą dažniausiai lemia kai kurie arba visi toliau išvardintų (žr. 1.1 lentelę) nuostolių bendras poveikis. Kiekvienas iš pateiktų (žr. 1.1 lentelę) nuostolių tipų lemia atskirus išankstinio įtempimo nuostolius armatūroje. Šie nuostoliai gali atsirasti akimirksniu arba laikui bėgant.

1.1 lentelė. Pagrindiniai išankstinio įtempimo nuostolių tipai (pagal Marčiukaitis, 2012)

Įtempių grupė	Nuostolių žymėjimas	Išankstinio įtempimo nuostolių atsiradimo grupės
Technologiniai	$\Delta\sigma_{pd}$	Dėl inkarinių įtaisų pleišėtų įtraukimo ir įtaisų deformacijų
	Ds_{θ}	Dėl temperatūrų skirtumo tarp gaminio, jeigu kietinama kaitinant, ir atsparų
	$\Delta\sigma_{el}$	Dėl betono tampriosios deformacijos, atsirandančios dėl įtempiamos armatūros poveikio ją atleidžiant nuo atramų arba kai įtempinama į betoną
	$\Delta\sigma_{fr}$	Dėl armatūros trinties su kanalų sienelėmis arba konstrukcijų betono paviršiumi
	$\Delta\sigma_{pfr}$	Dėl metalinių formų deformacijų, jeigu armatūra įtempinama į formas
	$\Delta\sigma_{psl}$	Dėl betono glemžimo įtemptai apvyniojama (spiraline arba žiedine) armatūra
	$\Delta\sigma_{pbs}$	Dėl sandūrų tarp blokų apgniuždymo deformacijos
Ilgalaikiai	$\Delta\sigma_{pr}$	Dėl armatūros relaksacijos per laikotarpį, kuris praeina nuo įtempiamosios armatūros įtempimo tam tikro laiko (iki 1000 val.)
	$\Delta\sigma_{cs}$	Dėl betono traukumo
	$\Delta\sigma_{cr}$	Dėl betono valksnumo

Teorinių tyrimų analizė

Atliktoje nuostolių vertinimo skirtingų normų metodikos skaičiavimų analizėje autorius teigia, kad išankstinio armatūros įtempimo nuostoliai, susiję su armatūros relaksacija, betono traukumu ir valksnumu, yra nuo laiko priklausantys ir turi didesnę įtaką bendram įtemptosios armatūros įtempių nuostolių dydžiui nei trumpalaikiai nuostoliai, o tai reiškia, kad šie nuostoliai tampa vis svarbesni ir didesni laikui bėgant. (Jokūbaitis, 2013).

Atliktame ilgalaikių nuostolių vertinimo tyrime autoriai ištyrė, jog gniuždymo įtempiai, iš anksto įtemptoje konstrukcijoje, liekantys betone po nuostolių turi mažesnę absoliučiąją vertę apačioje pluošto ir virš vidinės atramos. Samer'is et al. padarė išvadą, jog neatsižvelgiant į apgniuždymo įtempių nuostolius projektavimo stadijoje, gali lemti netikėtus įtrūkimus ir didesnes deformacija (Samer et al, 2007).

Dar viename atliktame ilgalaikių nuostolių vertinimo tyrime autoriai ištyrė, jog viršutinės ir apatinės išilginės neįtemptos armatūros plieno kiekis turi įtakos išankstinio įtempimo nuostoliams. Pablo'as et al. padarė išvadą, jog didėjant armatūros plieno santykiui, mažėja išankstinio įtempimo nuostoliai. Todėl, net jei elementui ir nereikalinga išilginė neįtempta armatūra, ją dėl nuostolių pravartu įdėti (Pablo et al, 2018).

1.6. Ekscentriciteto ir iš anksto įtemptos armatūros įtempimo jėgos parinkimas

Iš anksčiau aptarto skyriaus žinoma, jog kiekviename (gamybos ir eksploatacijos) etape pasireiškia išankstinės armatūros įtempimų nuostoliai. Nors armatūros įtempiai gali patirti nuostolius gamybos ir naudojimo metu, didelis tikslumas juos vertinant nebūtinas. Gamybos metu pasireiškiantys nuostoliai gali būti imami 10 % nuo pradinių armatūros įtempių verčių, o naudojimo etapo metu šie nuostoliai gali siekti 20-25 % (Jokūbaitis, 2013).

Žinant nagrinėjamos konstrukcijos ribinių įtempių reikšmes, skerspjūvio matmenis bei išorines apkrovas galima rasti išankstinio apgniuždymo jėgos dydį ir jos pridėties ekscentriciteto reikšmes. Tam panaudoti galima Manjelio pertvarkytas nelygybes ((1.5) – (1.8)).

Gamybos etapo metu:

$$\frac{1}{P_0} \geq \frac{\eta_1(1/A_c - e/W_v)}{(f_{1.min} - M_{min}/W_v)}, \quad (1.5)$$

$$\frac{1}{P_0} \leq \frac{\eta_1(1/A_c + e/W_a)}{(f_{1.max} + M_{min}/W_a)}. \quad (1.6)$$

Eksploatacijos metu:

$$\frac{1}{P_0} \geq \frac{\eta_2(1/A_c - e/W_v)}{(f_{max} - M_{max}/W_v)}, \quad (1.7)$$

$$\frac{1}{P_0} \leq \frac{\eta_2(1/A_c + e/W_a)}{(f_{min} + M_{max}/W_a)}. \quad (1.8)$$

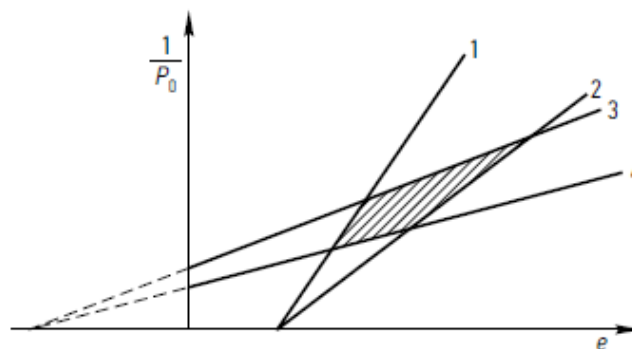
Čia:

M_{min}, M_{max} – momentai, kurie pasireiškia gamybos ir eksploatacijos laikotarpiu;

W_v, W_a – skerspjūvio atsparumo momentai, kurie veikia viršutinio ir apatinio skerspjūvio krašto atžvilgiu;

e – ekscentricitetas, parodantis, koku atstumu pridėta išankstinio apgniuždymo jėga.

Visos keturios ((1.5) – (1.8)) lygtys duoda skirtingas P_0 ir e tiesines priklausomybes. Jos aprašo ribas, kuriose esantys P_0 ir e gali tenkinti ir gamybos, ir eksploatacijos reikalavimus (Marčiukaitis, 2012). Šių lygčių grafiškas vaizdavimas pateiktas 1.9 paveiksle.



1.9 pav. G.Manjelio diagramos schema (Marčiukaitis, 2012)

1.9 paveiksle pateikta diagrama parodo, kad besikertančios lygčių tiesės apibrėžia plotą, kuriame yra patenkinamos visos keturios nelygybės (Jokūbaitis, 2013). Dydžiai P_0 ir e esantys užstrichuotame plote tenkins įtempimų ir stiprumo reikalavimus. Naudojantis šia diagrama galima parinkti daugelį kombinacijų armatūros įtempimo jėgai ir jos pridėties ekscentricitetui. Tačiau jei išankstinio įtempimo jėga nėra pakankamai didelė, ekscentricitetų intervalas yra per didelis ir neįmanoma rasti antrinio momento, dėl kurio lyno profilis visada liktų konstrukcijos viduje (Burgoyne, 2005).

Antros ir trečios linijų sankirta parodo, jog racionaliausią parinkti didžiausią santykį $1/P_0$ ir ji atitinkantį ekscentricitetą. Tuomet bus gaunama mažiausia įtempimo jėga P_0 . Pasirinkus optimalų ryšį tarp P_0 ir e , galima tiksliai nustatyti konstrukcijos laikomąją galią ir užtikrinti, kad būtų atitinkami reikalavimai dėl atsparumo supleišėjimui ir įlinkiams (Marčiukaitis, 2012).

Norint parinkti racionaliausią iš anksto įtemptos armatūros padėtį, reikia rasti pagal G.Manjelio ((1.5) – (1.8)) nelygybes optimaliausią išankstinio įtempimo jėgos reikšmę P_0 . Turint ją ir pertvarkius G.Manjelio nelygybes galima rasti racionaliausius ekscentriciteto ribas.

Gamybos etapo metu:

$$e_1 \leq -\frac{f_{1.min} \cdot W_v}{P_0} + \frac{M_{min}}{P_0} + \frac{W_v}{A_c}, \quad (1.9)$$

$$e_2 \leq \frac{f_{1.max} \cdot W_a}{P_0} + \frac{M_{min}}{P_0} - \frac{W_a}{A_c}. \quad (1.10)$$

Eksplotacijos etape:

$$e_3 \geq -\frac{f_{max} \cdot W_v}{P_0} + \frac{M_{max}}{P_0} + \frac{W_v}{A_c}, \quad (1.11)$$

$$e_4 \geq \frac{f_{min} \cdot W_a}{P_0} + \frac{M_{max}}{P_0} - \frac{W_a}{A_c}. \quad (1.12)$$

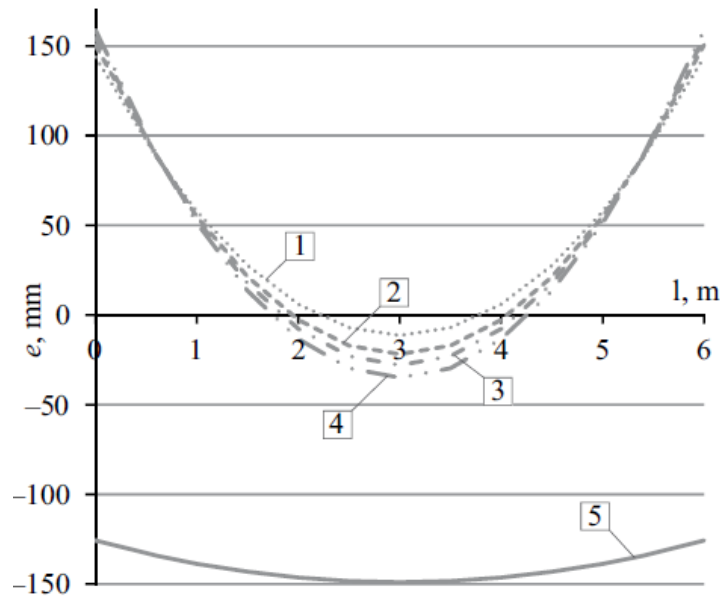
Šiuose nagrinėjamuose etapuose gali būti leidžiami plyšiai, tačiau gali būti ir neleidžiami.

Teorinių tyrimų analizė

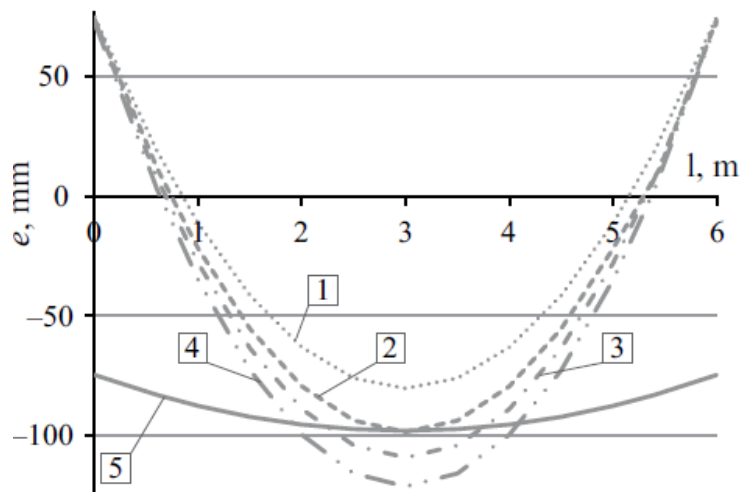
Atliktame tyrime (Jokūbaitis, 2013) buvo nagrinėjamos keturios situacijos, kai plyšiai tempiamojoje zonoje leidžiami gamybos ir eksploatacijos etapuose, kai plyšiai tempiamojoje zonoje neleidžiami abiejuose etapuose, kai plyšiai tempiamojoje zonoje neleidžiami gamybos, bet leidžiami eksploatacijos ir kai plyšiai tempiamojo zonoje leidžiami gamybos etape, bet neleidžiami naudojimo etape. Visas keturias situacijas pavaizduotos 1.10 – 1.13 paveiksluose.

Nagrinėjant 1.10 – 1.13 paveiksluose pateiktus rezultatus pastebima, jog didelę įtaką racionaliausiai armatūros padėčiai turi nagrinėjamos situacijos. Iš duotų diagramų matoma, kad kai plyšiai leidžiami gamybos etape ekscentriciteto ribos plėtėja, tokiu atveju galima parinkti racionalesnį armatūros išdėstymą. Tačiau, kai plyšiai neleidžiami gamybos etape ekscentriciteto ribos mažėja. Iš grafikų dar matyti, jog mažiausią armatūros išdėstymo įvairovę duoda ta situacija, kai plyšiai leidžiami gamybos etape ir naudojimo, bei kai plyšiai neleidžiami gamybos, bet leidžiami naudojimo.

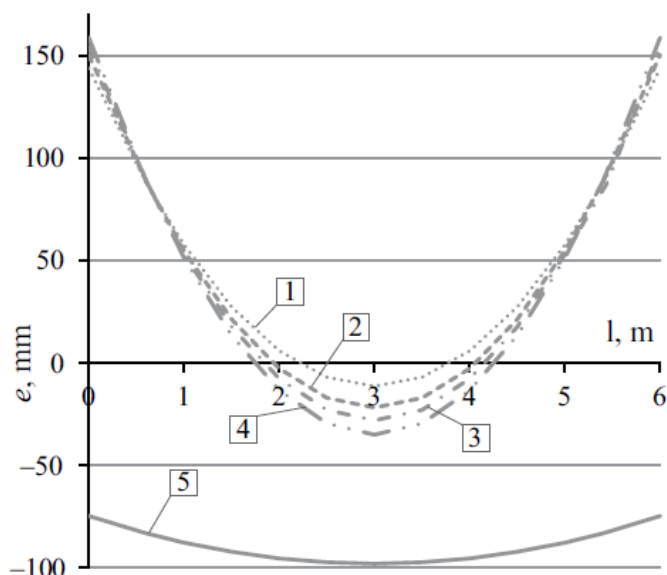
Tai lemia, jog dėl plyšių ribojimo didėja arba mažėja išankstinio įtempimo jėga. Didėjant išankstinio įtempimo jėgai ekscentricitetas mažėja, mažėjant išankstinio įtempimo jėgai ekscentricitetas didėja. Todėl projektuojant reikia gerai įvertinti įvairias situacijas, kurios gali atsirasti gamybos ir eksploatacijos metu. To nepadarius ir parinkus per didelę ar per mažą išankstinio įtempimo jėgą, konstrukcija gali supleišėti ar padidėti jos įlinkis.



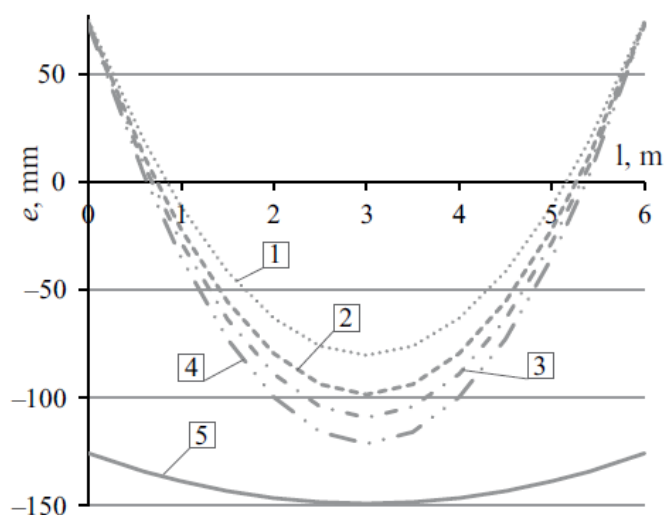
1.10 pav. Armatūros padėtis, kai plyšiai tempiamojoje zonoje leidžiami gamybos ir naudojimo etapuose: 1 – nėra išankstinio įtempimo nuostolių; 2 – nuostoliai sudaro 10 %; 3 – 15 %; 4 – 20 %; 5 – apatinė armatūros padėtis (Jokūbaitis, 2013)



1.11 pav. Armatūros padėtis, kai plyšiai tempiamojoje zonoje neleidžiami gamybos ir naudojimo etapuose: 1 – nėra išankstinio įtempimo nuostolių; 2 – nuostoliai sudaro 10 %; 3 – 15 %; 4 – 20 %; 5 – apatinė armatūros padėtis (Jokūbaitis, 2013)



1.12 pav. Armatūros padėtis, kai plyšiai tempiamojoje zonoje neleidžiami gamybos etape, bet leidžiami naudojimo etape: 1 – nėra išankstinio įtempimo nuostolių; 2 – nuostoliai sudaro 10 %; 3 – 15 %; 4 – 20 %; 5 – apatinė armatūros padėtis (Jokūbaitis, 2013)



1.13 pav. Armatūros padėtis, kai plyšiai tempiamojoje zonoje leidžiami gamybos etape, bet neleidžiami naudojimo etape: 1 – nėra išankstinio įtempimo nuostolių; 2 – nuostoliai sudaro 10 %; 3 – 15 %; 4 – 20 %; 5 – apatinė armatūros padėtis (Jokūbaitis, 2013)

1.7. Daugiaatramių įtemptojo gelžbetonio sijų skaičiavimas

1.7.1. Esmė ir pranašumai

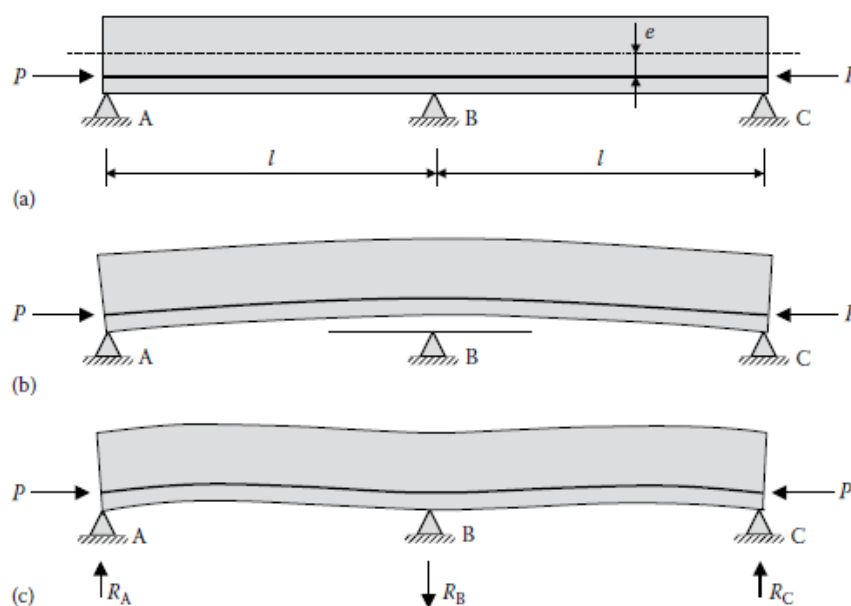
Atliekant dviatramės statiškai išsprendžiamos sijos su iš anksto įtempta armatūra projektavimą didelių problemų nekyla, užtenka apskaičiuoti visas ryšių reakcijas, kurios nesunkiai randamos taikant statinės pusiausvyros lygtis. Tačiau projektuojant triatramę statiškai neišsprendžiamą siją, statinės pusiausvyros lygčių nepakanka rasti atraminėms reakcijoms, kadangi nežinomųjų reakcijų

skaičius yra didesnis už pusiausvyros lygčių skaičių. Tokiu atveju tenka ieškoti dar papildomų geometrinių darnos lygčių, kad būtų įvertintos deformacijos ir poslinkiai. Be to, kai konstrukcija yra statiškai neišsprendžiama, kyla nemažai keblumų, o tai reiškia, kad projektuotojas turi atsižvelgti ne tik į kritinį pjūvį, bet ir į visos sijos elgseną (Burgoyne, 2005).

Iš anksto įtempto gelžbetonio daugiaatramės sijos turi keletą pranašumų prieš paprastas iš anksto įtemptas sijas. Statikškai nesprenžiamų sistemų pagrindinis pranašumas yra tai, kad kiti elementai gali padėti kompensuoti netektis, patiriamas viename ar keliuose elementuose, kurie tampa nestabilūs arba patiria deformacijas. Tai reiškia, kad visa sistema gali išlikti stabilioje būsenoje, nes kiti elementai palaiko sistemą, net jei kai kurie elementai yra pažeisti arba deformuoti (Marčiukaitis, 2012). Taip pat tokio pat skerspjūvio sijos pasižymi didesne laikomąja galia nei paprastosios dviatramės sijos bei mažesnėmis deformacijomis esant tam pačiam apkrovos lygiui. Taigi dėl mažesnio stiprumo poreikio ir didesnio bendrojo standumo, galima naudoti mažesnę skerspjūvį. Dar vienas iš pranašumų, jog suteikus iš anksto įtemptos armatūros profiliui banguotą formą, jis gali atlaikyti tiek teigiamą, tiek neigiamą momentą.

1.7.2. Įrašų nuo išankstinio apgniuždymo apskaičiavimas

Įtempiant armatūrą gelžbetoninėje konstrukcijoje, kuri nėra statikškai sprendžiama, įtemptos armatūros gniuždymo jėga sukelia vidines deformacijas konstrukcijoje, o šios deformacijos priklauso nuo įvairių faktorių. Vidinės įrašos priklauso nuo išankstinio įtempimo jėgos dydžio P_0 , armatūros padėties skerspjūvyje, atrėmimo sąlygų. Nagrinėjant konstrukciją su trimis atramomis (žr. 1.14 pav., c) matoma, jog B atrama neleidžia sijai išlinkti. Šitas atramos suvaržymas lemia nežinomos reakcijos atsiradimą R_B .



1.14 pav. Triatramės sijos schema (Gilbert et al., 2016)

Kadangi konstrukcijoje atsiranda priešingos krypties reakcija, ši reakcija sukelia antrinį momentą M_2 . Antrinio momento sukeliamas įlinkis turi sutapti su išlinkiu. O pirminis momentas M_1 randamas paprastai $M_1 = P_0 \cdot e$. Jį sukelia išankstinis apgniuždymas. Norint rasti tikrąją konstrukcijos lenkimo momentą reikia sudėti pirminį ir antrinį lenkimo momentus, t. y.:

$$M_p = M_1 + M_2. \quad (1.13)$$

Šlyties jėgas, kurias sukelia išankstinis gelžbetoninio elemento įtempimas, taip pat galima suskirstyti į pirminius ir antrinius komponentus. Pirminė šlyties jėga betone yra lygi išankstinio įtempimo jėgai P padaugintai iš armatūros kampo θ , nagrinėjame skerspjūvyje (Gilbert et al., 2016). Kai skerspjūvyje strypo padėtis yra tiesinė ($\theta = 0$), pirminė skersinė jėga lygi nuliui. Antrinę skersinę jėgą, kaip ir antrinį momentą sukelia pridėta priešingos krypties reakcija. Bendra skersinė jėga lygi pirminės ir antrinės skersinių jėgų sumai, t. y.:

$$V_p = V_1 + V_2. \quad (1.14)$$

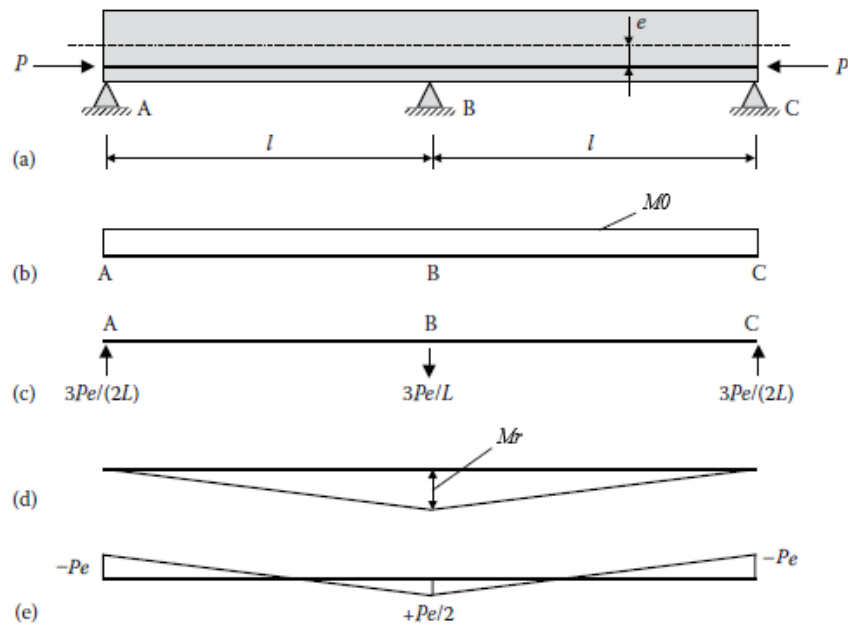
Statiškai neišsprendžiamų iš anksto įtemptų gelžbetoninių elementų įrašos nustatomos taikant statybinės mechanikos metodus. Vadinasi taikant jėgų metodą, kampų pasisukimo metodą ir momentų pasiskirstymo metodą, galima rasti įrašas nuo išankstinio apgniuždymo.

1.7.3. Jėgų metodas

Išankstinio įtempimo poveikis įrašų persiskirstymui geriausiai iliustruojamas jėgų metodu. Jėgų metodas dar vadinamas nuosekliųjų deformacijų metodu. Šis metodas taikomas statiškai neišsprendžiamoms konstrukcijoms, kurių pagrindiniai nežinomieji yra perteklinės jėgos. Perteklinės jėgos gali būti vidinės elemento jėgos arba išorinės atraminės reakcijos. Iš anksto įtemptos gelžbetoninės konstrukcijos atveju perteklinė jėga yra atraminė reakcija. Kadangi, nuo išankstinio apgniuždymo konstrukcija deformuojasi ir bando atitrūkti nuo vidurinės atramos.

Atliekant triatramės sijos su tiesiniu lynų profilių išdėstymu (žr.1.15 pav., a) skaičiavimus, antrinis momentas B atramoje sudaro tempimo įtempimus, viršutinėje skerspjūvio dalyje. Ryšys R_v atramoje turi atlaikyti atsiplėšimo jėgą R_a , kadangi iš anksto įtemptos armatūros įtempimas bando atplėšti siją nuo B atramos. Ši jėga R_a yra lygi kraštinių atramų reakcijų sumai, bet veikia priešinga kryptimi:

$$R_a = \frac{R_v}{2} + \frac{R_v}{2}. \quad (1.15)$$



1.15 pav. Lenkimo momentai nuo iš anksto įtemptos armatūros statškai neišsprendžiamoje sijoje: a – skaičiuotinė schema; b – pirminio momento diagrama; c – reakcijos; d – antrinis momentas; e – suminiai lenkimo momentai (Gilbert et al., 2016)

Pašalinus vidurinę atramą, atsiranda lenkimo momentas (žr. 1.15 pav., b) sukeltas išankstinio įtempimo ir jo ekscentriciteto, jis vadinamas pirminiu momentu:

$$M_0 = P_0 \cdot e. \quad (1.16)$$

Pridėjus vidurinę atramą atsiranda priešingos krypties reakcija R_v , kuri sukelia lenkimo momentą M_A . Šis momentas yra priešingos krypties momentui M_0 . Taip pat jis vadinamas antriniu momentu:

$$M_A = \frac{R_v}{2} \cdot l. \quad (1.17)$$

Suminio momento reikšmė B atramoje apskaičiuojama:

$$M_v = M_A - M_0 = \frac{R_v}{2} \cdot l - P_0 \cdot e. \quad (1.18)$$

Galima apskaičiuoti vidurinės atramos reakciją R_v iš deformacijų pusiausvyros. Pirminio momento sukeliamas išlinkis apskaičiuojamas taip:

$$\delta = \frac{M_0(2l)^2}{8EI}. \quad (1.19)$$

δ privalo būti lygus v_r :

$$v_r = \frac{R_v(2l)^3}{48EI}. \quad (1.20)$$

Sulyginame (1.19 ir 1.20) formules ir gauname (žr. 1.15 pav. d):

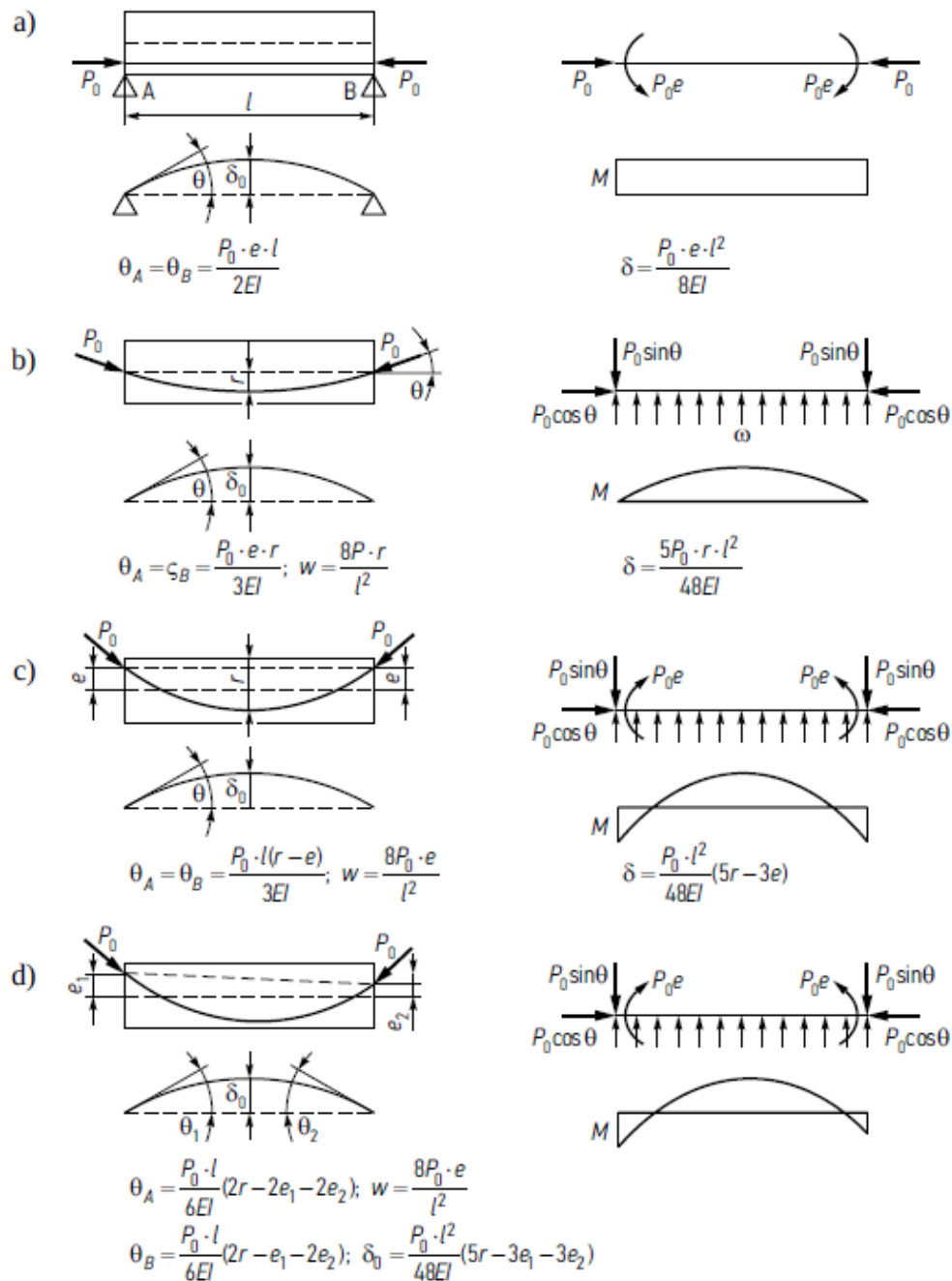
$$R_v = \frac{3M_0}{l} = \frac{3P_0 \cdot e}{l}. \quad (1.21)$$

Suminis lenkimo momentas B atramoje lygus (žr. 1.15 pav., e):

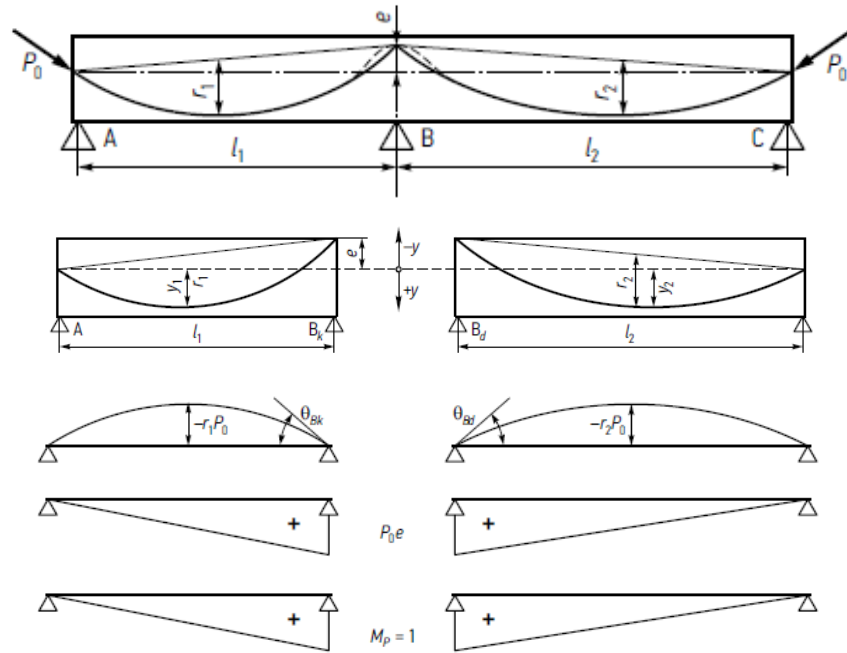
$$M_v = M_A - M_0 = \frac{3P_0 \cdot e}{2l} \cdot l - P_0 \cdot e = 0,5P_0 \cdot e. \quad (1.22)$$

1.7.4. Skerspjūvio pasisukimo kampų metodas

Pasisukimo kampai priklauso nuo kelių faktorių, tokių kaip sijos skerspjūvio geometriniai parametrai, armatūros įtempimo jėga, jos forma, ekscentriciteto dydis bei padėtis skerspjūvio svorio centro atžvilgiu. Iš anksto įtemptų gelžbetoninių sijų deformacijas ir skerspjūvio pasisukimo kampus galima nustatyti taikant medžiagų mechanikos principus. Pastovaus skerspjūvio konstrukcijos atveju yra išvestos empirinės formulės, leidžiančios tiksliai apskaičiuoti išlinkius (įlinkius) bei pasisukimo kampus. 1.16 paveiksle pateiktos skirtingos iš anksto įtemptos armatūros išdėstymo skerspjūvyje situacijos bei pateiktos kampų pasisukimo ir deformacijų formulės (Marčiukaitis, 2012).



1.16 pav. Sijų su tiesine (a) ir paraboline (b, c, d) iš anksto įtempta armatūra ekvivalentinės apkrovos ir deformacijos (Marčiukaitis, 2012)



1.17 pav. Lenkimo momentų diagramos nustatymas skerspjūvio pasisukimo θ kampų metodu (Marčiukaitis, 2012)

Atliekant (žr. 1.17 pav.) statškai nesprendžiamos triatramės sijos skaičiavimus, ji pakeičiama į statškai sprendžiamas dvi dviatrastes sijas. Norint nustatyti daugiaatramės sijos, kuri armuota išlankstyta iš anksto įtempta armatūra, momentus, reikia priimti keletą prielaidų. Visų pirma, triatramės sijos skerspjūvio geometriniai rodikliai per visą ilgį vienodi. Taip pat priimame, jog iš anksto įtemptos armatūros kreivis nedidelis ir išankstinio apgniuždymo jėga konstanta per visą elemento ilgį. Lynai atramose (žr. 1.17 pav.) užinkaruoti ties sijos svorio centru, o B atramoje ekscentricitetas lygus e . Šitokių dviatramių sijų (žr. 1.17 pav.) momentus randame pagal tokias formules:

$$M_{da} = -r_1 P_0, \quad (1.23)$$

$$M_{ka} = -r_2 P_0, \quad (1.24)$$

$$M_{Ba} = P_0 \cdot e. \quad (1.25)$$

Kairės sijos pasisukimo kampas (žr. 1.17 pav.) B atramoje randamas:

$$\theta_{Bk} = \frac{M}{EI} = \frac{1}{2} \left(-\frac{2}{3} l_1 r_1 P_0 \right) \frac{1}{EI} + \frac{2}{3} \frac{l_1}{2} P_0 \cdot e \frac{1}{EI} = \frac{P_0 l_1}{3EI} (e - r_1). \quad (1.26)$$

Taip pat randamas ir dešinės sijos pasisukimo kampas (žr. 1.17 pav.) B atramoje:

$$\theta_{Bd} = \frac{P_0 l_2}{3EI} (e - r_2). \quad (1.27)$$

Iš 1.17 paveikslėlio matyti, kad momentas M_p sukels tam tikrą kampinį pasisukimą:

$$\theta_{pk} = \frac{l_1}{3EI} M_p. \quad (1.28)$$

Analogiškai momentas M_p sukelia pasisukimo kampą ir dešinėje pusėje:

$$\theta_{pd} = \frac{l_2}{3EI} M_p. \quad (1.29)$$

Tokių visų pasisukimo kampų suma turėtų būti lygi nuliui:

$$\theta_{Bk} + \theta_{Bd} + \theta_{pk} + \theta_{pd} = 0. \quad (1.30)$$

Išstatę duotas formules (1.26 – 1.29) gauname:

$$\frac{P_0 l_1}{3EI} (e - r_1) + \frac{P_0 l_2}{3EI} (e - r_2) + \frac{l_1}{3EI} M_p + \frac{l_2}{3EI} M_p = 0. \quad (1.31)$$

Iš šios nelygybės matyti, jog nežinomas yra momentas veikiantis B atramoje M_p :

$$\frac{M_p}{3EI} (l_1 + l_2) = -\frac{P_0}{3EI} [(e - r_1)l_1 + (e - r_2)l_2]. \quad (1.32)$$

Pertvarę lygybę gauname:

$$M_p = P_0 \left[\frac{-e(l_1 + l_2) + l_1 r_1 + l_2 r_2}{l_1 + l_2} \right]. \quad (1.33)$$

Lygybę galima dar supaprastinti, kadangi $l_1 + l_2 = l$, tai:

$$M_p = P_0 \left[\frac{l_1 r_1 + l_2 r_2}{l} - e \right]. \quad (1.34)$$

Bendras lenkimo momentas:

$$M_B = M_{Ba} + M_p. \quad (1.35)$$

Išstatę ir supaprastinę formulę gauname:

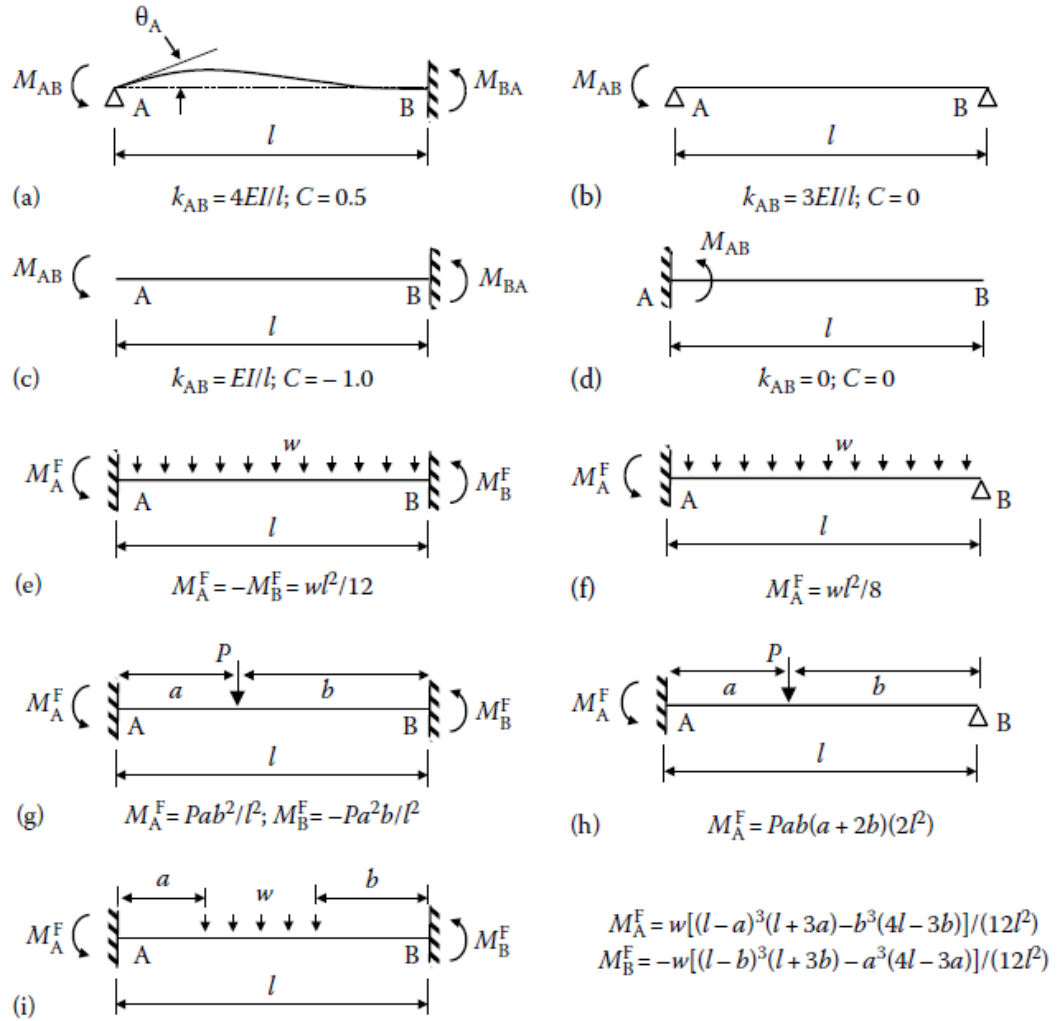
$$M_B = P_0 \frac{l_1 r_1 + l_2 r_2}{l}. \quad (1.36)$$

1.7.5. Momentų persiskirstymo metodas

Iš daugelių literatūroje (Gilbert et al., 2016; Bhatt, 2011; Marčiukaitis, 2012; Naaman, 2004) sutinkamų teorinių metodų konstrukcijos lenkimo momentams nustatyti populiariausias yra momentų persiskirstymo metodas. Momentų persiskirstymas – tai Hardy Cross'o sukurta metodika, skirta statiškai nesprendžiamų sijų ir rėmų analizei (Gilbert et al., 2016). Momento pasiskirstymo metodu gautų rezultatų tikslumo laipsnis priklauso nuo nuoseklių aproksimacijų skaičiaus arba iteracijų proceso. Be to, jis priskiriamas prie poslinkio metodo, taikomo atliekant struktūrinę analizę.

Sprendžiant statiškai nesprendžiamas iš anksto įtemptas sijas reikia žinoti medžiagų savybes, skerspjūvio geometrines charakteristikas, armatūros išankstinio įtempimo jėgą ir jos išdėstymą skerspjūvyje. Atliekant skaičiavimus iš pradžių, apskaičiuojamas kiekvieno elemento, įtvirtinimo jungties sukamasis standumas. Tuomet konstrukcijos visi mazgai yra užfiksuojami nuo sukimosi įsivaizduojamais standžiais įtvirtinimais. Tokiu atveju sijos atramose veikia lenkimo momentas nuo išorinių apkrovų. Toliau jeigu atlaisviname įsivaizduojamą standų įtvirtinimą, momentai tame mazge iš abiejų pusių bando išsilyginti. Toks atramų atlaisvinimas keičia momentus ties visomis atramomis. Šie atsirandantys papildomi momentai dar vadinami išlyginamaisiais momentais. Kiekviena atrama

iš eilės atlaisvinama, išlyginama ir vėl užstandinama, o procesas kartojamas tol, kol neišlyginti momentai kiekviename mazge tampa nereikšmingi. Norint rasti šiuos momentus galima pasinaudoti (žr. 1.18 pav.) pavaizduotomis schemomis ir pateiktomis formulėmis.



1.18 pav. Sutelktieji momentai ir momentų pasikeitimo perdavimas kitam sijos galui (Gilbert et al., 2016)

Nagrinėjant (žr. 1.18 pav., a) schemeje pavaizduotą siją, nuo sukamojo momento atlaisvinant A atramą ir veikiant momentui M_{AB} strypas deformuojasi, kaip parodyta schemeje. Taip pat kitoje B atramoje atsiranda M_{BA} momentas. Tokiu atveju momentas M_{AB} lygus:

$$M_{AB} = k_{AB}\theta_A, \quad (1.37)$$

čia: k_{AB} – standumo koeficientas; θ_A – momento perdavimo koeficientas.

Momentas B atramoje:

$$M_{BA} = CM_{AB}, \quad (1.38)$$

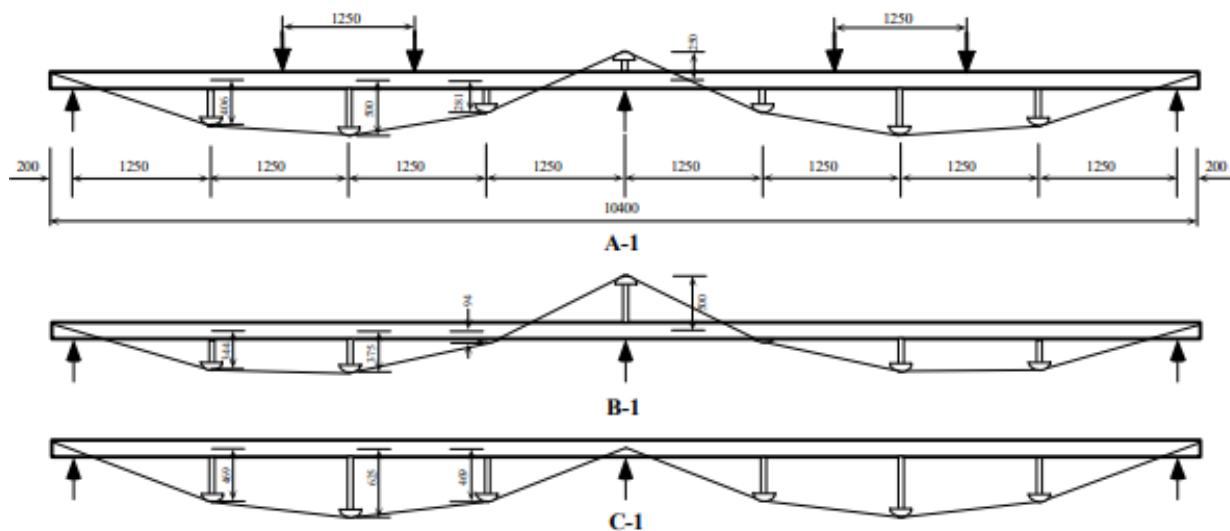
čia:

C – išlyginamųjų momentų koeficientas. Jei abu galai įtvirtinti standžiai $C = 0,5$, jei vienas galas laisvai atremtas $C = 0$.

1.7.6. Teorinių tyrimų analizė

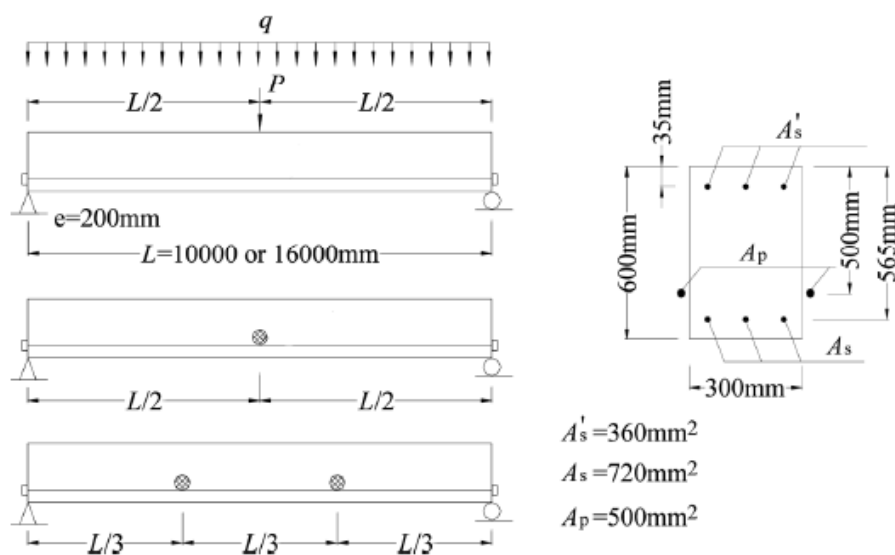
Lin'as ir Keith Thornton'as tyrė antrinio momento persiskirstymą daugiaatramėse iš anksto įtempto betono sijose. Autorių tikslas buvo atkreipti dėmesį į rimtą tuometinę problemą –antrinių momentų egzistavimą. Kaip teigia autoriai, ACI statybos kodeksas 1972 metais nenurodydavo tikslaus sprendimo ar metodo, kuriuo būtų galima įvertinti antrinį momentą. Dėl šios priežasties Lin'as ir Keith Thornton'as atliko teorinį tyrimą ir nustatė, jog skaičiuojant veikiantį lenkimo momentą būtina įvertinti antrinį lenkimo momentą, atsirandantį dėl išankstinio įtempimo. Tačiau, jei momentai su visišku momentų persiskirstymu naudojami skaičiuojant laikomąją galią daugiaatramėse sijose, tada antriniai momentai gali būti ignoruojami arba įtraukti, kadangi rezultatai bus tokie patys (Lin & Keith Thornton, 1972).

Witchukreangkrai'is et al. atliko analitinį tyrimą, kurio metu buvo siekiama išsiaiškinti antrinio momento ir momento persiskirstymo ryšį. Analitiniam tyrimui atlikti buvo pasirinktos 3 sijos (žr. 1.19 pav.), iš kurių B-1 suprojektuota tokia, jog iš anksto įtempta armatūra sudarytų minimalų momentą, o A-1 ir C-1 tokios, jog antrinis momentas būtų reikšmingas. Atlikus tyrimą buvo nustatyta, jog antrinis momentas ir momentų persiskirstymas vienodai susiję su kritinio pjūvio santykiniais posūkiais ties centrine atrama. Didesnis antrinis momentas lemia didesnę skerspjuvio ties centrine atrama pasisukimo jėgą, todėl esant ribiniam momentui persiskirstomas didesnis momentas. Be to, nustatyta, kad skaičiuojant ribinį momentą iš anksto įtemptos sijos su dideliu lyno ekscentricitetu, antrinis momentas esant ribiniam momentui neturėtų būti visiškai įtraukiamas. Taip yra todėl, kad atsiradus įtrūkiams ties centrine atrama antrinis momentas greičiausiai bus pastovus, nebelieka suvaržyto santykinio pasisukimo ties centrine atrama (Witchukreangkrai et al., 2003).



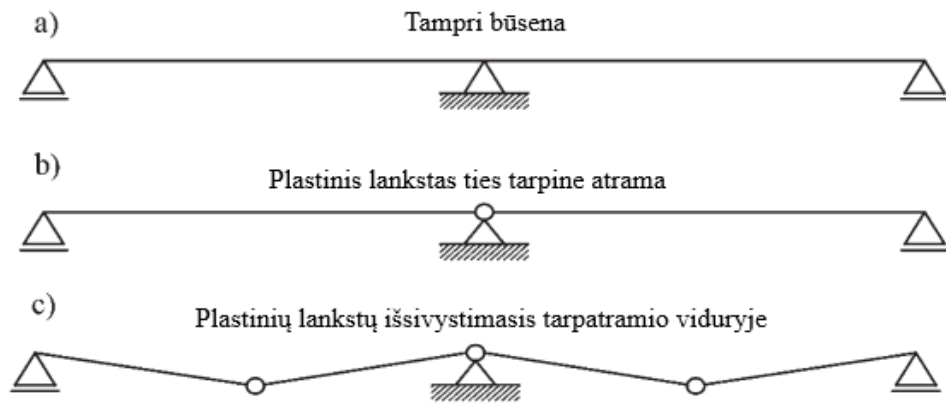
1.19 pav. Lynų išdėstymo schema (Witchukreangkrai et al., 2003)

Tiejiong Lou'as et al. atliko tyrimą, kuriuo buvo siekiama įvertinti iš anksto įtemptų sijų antrosios eilės poveikį, pasinaudojant netiesine analize. Skaitinei analizei atlikti naudojama dviatramė sija su tiesia horizontalia armatūra, kurios ekscentricitetas per visą tarpatramį 200 mm (žr. 1.20 pav.). Be to, palyginimui naudojama atitinkama nesurišta iš vidaus įtempto betono sija. Šio tyrimo tikslas – kuo geriau suprasti antrosios eilės poveikius iš anksto įtemptoms betoninėms sijoms. Tiejiong Lou'as et al. nustatė, jog antrosios eilės efektai turi didelę įtaką iš anksto įtemptų betoninių sijų atsako charakteristikoms. Taip pat minima, jog, esant tam tikram apkrovos lygiui, antriniai poveikiai lemia didesnes sijos deformacijas ir didesnius įtempius armatūroje. Be to, autoriai pamini, jog antriniai momentai tiesiškai pasiskirsto per visą tarpatramį. Dėl šio pastebėjimo Tiejiong Lou'as et al. patvirtina siūlomo metodo patikimumą apskaičiuojant antrinius momentus (Tiejiong Lou et al., 2010).



1.20 pav. Tyrime naudojamų sijų schemas (Tiejiong Lou et al., 2010)

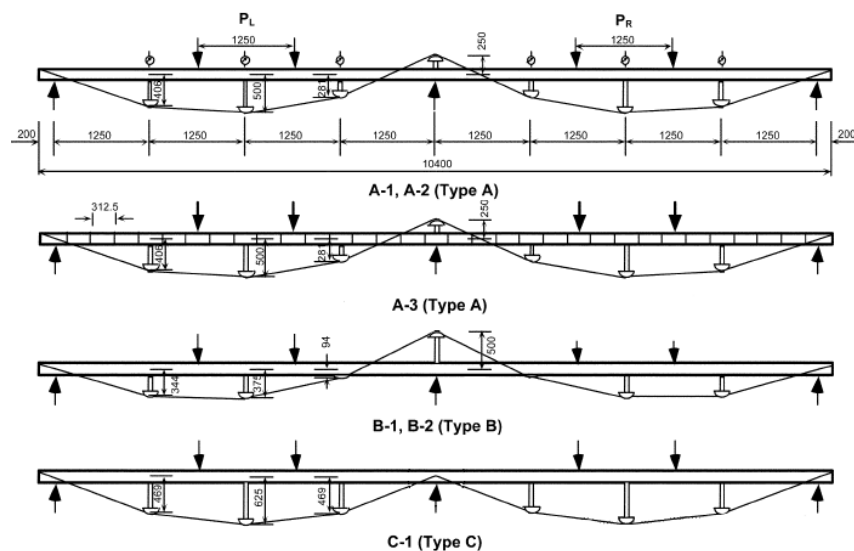
Halvonik'as et al. tyrė statiskai nesprendžiamas konstrukcijas su iš anksto įtempta armatūra, kuri sukelia antrinius poveikius. Tyrimui atlikti buvo bandoma dviejų tarpatramių sija, kuri dirbo tamprioje būsenoje (žr. 1.21 pav. a) po išankstinės įtempimo jėgos perdavimo. Palaipsniui didinant išorines jėgas ir pasiekus vidurinės atramos laikomąją galią, joje atsirado plastinis lankstas (žr. 1.21 pav. b), tai yra atsirado plyšys, kuris lemia visos sijos laikomosios galios įrašų persiskirstymą. Toliau didinant apkrovą išorinę apkrovą, tarpatramiuose susidarė antrasis plastinis lankstas (žr. 1.21 pav. c) ir šiuo metu buvo pasiektas kinematinis mechanizmas. Tai yra šis etapas buvo laikomas konstrukcijos griūtimi. Atliekant skaičiavimus galutinėje momentų formulėje neįtraukti jokie antriniai lenkimo momentai, kadangi buvo daroma prielaida, kad antriniai poveikiai yra apkrovos pusėje. Šie skaičiavimai buvo atliekami norint palyginti teoriniu būdu gautus lenkimo momentus su atlikto eksperimento (1.7.7 skirsnis) (Halvonik et al., 2018).



1.21 pav. Tyrime naudotos sijos schema (Halvonik et al., 2018)

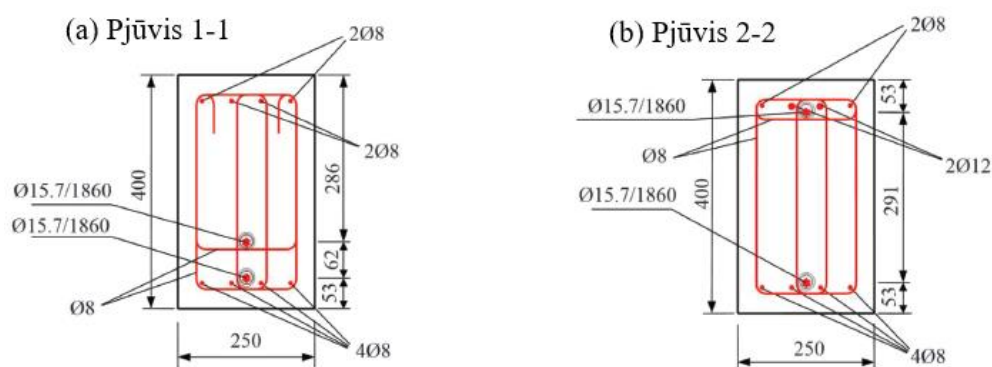
1.7.7. Eksperimentinių tyrimų analizė

Thiru Aravithan‘as et al. eksperimente tiriama antrinio momento įtaka momento persiskirstymui. Šiame tyrime atlikta serija eksperimentų, kurių metu iš viso buvo bandomos devynios sijos. Bandymų seriją sudarė šešios triatramės sijos (žr. 1.22 pav.) ir trys dviatramės sijos. Autoriai pamini, jog antrinių momentų, atsirandančių dėl išankstinio įtempimo, poveikis didžiausias C tipo sijoje, o mažiausias B tipo sijoje. Atlikę eksperimentinį tyrimą Thiru Aravithan‘as et al. teigia, jog atsižvelgiant į momentų persiskirstymą, vidurinio tarpatramio pjūviuose persiskirstymas buvo neigiamas, o atraminiame pjūvyje, esant simetrinei apkrovai teigiamas. Momentų persiskirstymo dydžiui įtakos turi lynų išdėstymas ir apkrovimo schema kiekviename tarpatramyje. Simetriškai apkrautose sijos momentų persiskirstymas mažėja su antriniu momentu beveik tiesiškai, o nesimetriškos apkrovos atveju momentų persiskirstymas yra nereikšmingas (Thiru Aravithan et al., 2005).

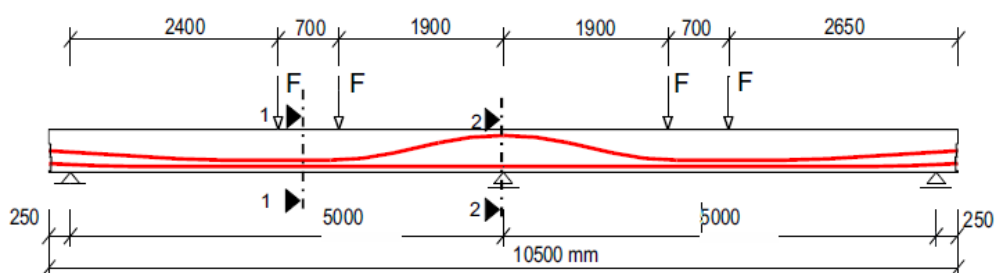


1.22 pav. Eksperimente naudotų sijų lynų išdėstymo schemas (Thiru Aravithan et al., 2005)

Halvonik'as et al. atliko eksperimentinį tyrimą, kuriame buvo nagrinėjamos 6 iš anksto įtemptos daugiaatramės sijos, kurių skerspjūvio matmenys buvo vienodi. Sijos armuotos paprasta armatūra ir dviem iš anksto įtemptais lynais (žr. 1.23 pav.), kurių formos skerspjūvyje skyrėsi. Pirmasis lynas buvo beveik tiesus ir jo geometrija sukėlė didžiausią antrinį poveikį. Antrasis lynas buvo suprojektuotas taip, kad būtų pasiektas mažai reikšmingas antrinis poveikis (žr. 1.24 pav.). Tyrimo autoriai nustatė, jog antrinis iš ankstinio įtempimo efektas daugiaatramėse sijose turi nuolatinę įtaką konstrukcijai. Todėl jie turi būti priimti visuose poveikių deriniuose, naudojamų tikrinant ar kontroliuojant konstrukcijas. Halvonik'as et al. teigia, jog projektuotojas turėtų nepasikliauti antrinių efektų sukeltų vidinių jėgų persiskirstymu konstrukcijos plastinės ar netiesinės analizės atveju, kai atliekama saugos ribinio būvio patikra. Taip pat, autoriai teigia, jog antrinis poveikis niekur nedingo konstrukcijai pasiekus ribinę lenkimo momento reikšmę (Halvonik et al., 2018).



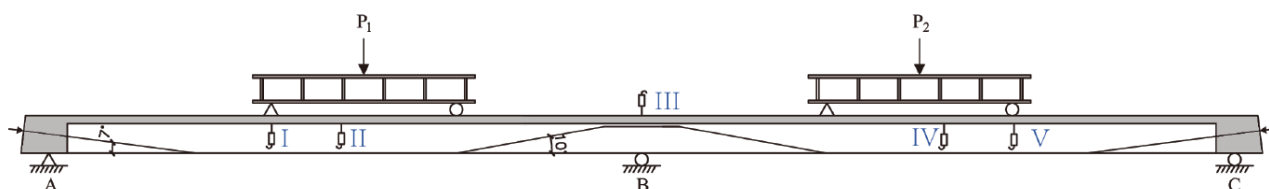
1.23 pav. Eksperimentinio tyrimo skerspjūvio pjūviai: a – tarpatramio viduryje; b – vidurinėje atramoje (Halvonik et al., 2018)



1.24 pav. Lynų išdėstymo schema (Halvonik et al., 2018)

Ning Duan'as et al. atliko eksperimentinį tyrimą, kurio metu siekė išsiaiškinti kokį poveikį turi iš anksto įtempta armatūra statiskai neišsprendžiamoms sijoms, bei vieną iš pagrindinių problemų, kaip tas turi įtakos lenkimo momentų persiskirstymui. Eksperimente buvo tiriamos dvi sijos, kuriose naudojami du iš anksto įtempti lynai (žr. 1.25 pav.). Lynai išdėstomi taip, kad iš anksto įtemptų lynų forma atitiktų išorinės apkrovos sukiamą lenkimo momentų diagramą ir kad būtų sumažintas antrinis poveikis, kurį sukelia iš anksto įtemptų lynų ekscentricitetas. Tyrėjai nustatė, jog tarp antrinio lenkimo momento ir iš anksto įtemptos armatūros įtempių yra tiesinė priklausomybė. Ning Duan'as

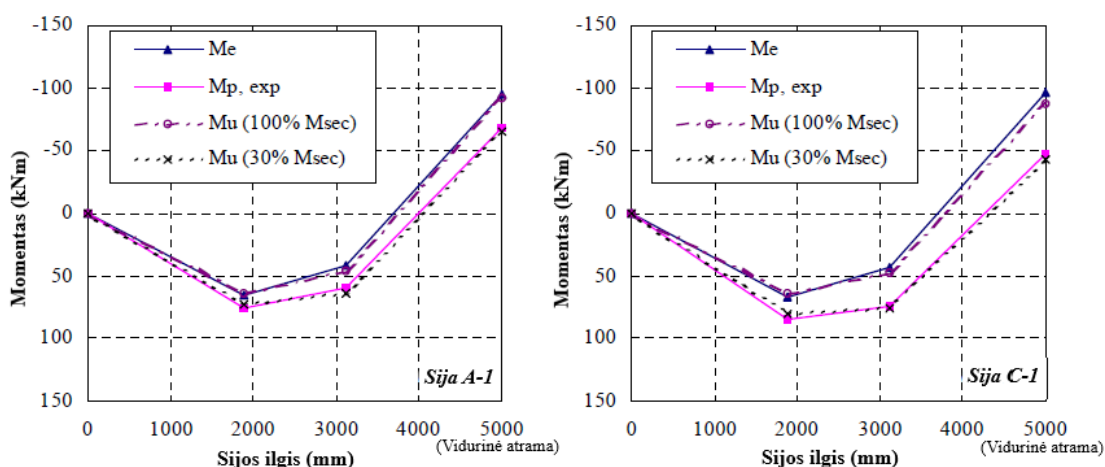
et al. teigia, jog armatūros pozicija skerspjūvyje, bei armatūros ekscentricitetas turi didelę įtaką lenkimo momento dydžiui. Autoriai pastebi, jog antrinis atramos lenkimo momentas didėja didėjant apkrovai pagal trijų pakopų vystymosi dėsnį. Taip pat tyrime aprašomas ir lenkimo momento persiskirstymo koeficientas, kuriuo keičiama momentų vertė apskaičiuota tampriuoju teoriniu metodu, siekiant užtikrinti, kad ji būtų artima tikrosioms konstrukcijos jėgoms. Atlikus eksperimentą nustatyta, jog antrinis lenkimo momentas turi įtakos momento persiskirstymo koeficientui, šis įtakos dydis siekė nuo 15,8 % iki 28,9 % (Ning Duan et al., 2022).



1.25 pav. Dviejų tarpatramių T tipo sija: I –V valdymo blokai (Ning Duan et al., 2022)

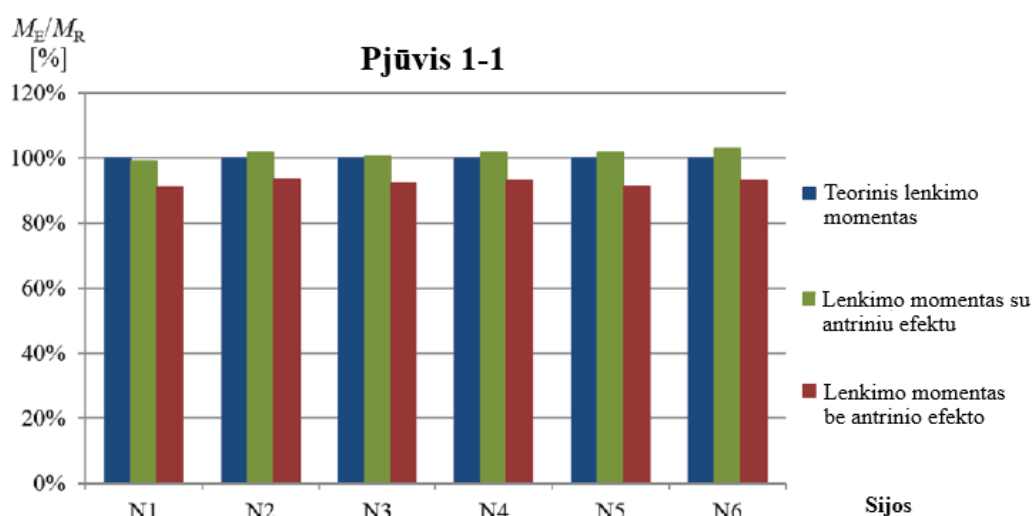
1.7.8. Teorinių ir eksperimentinių tyrimų palyginimas

Witchukreangkrai'o et al. atliktoje teorinių tyrimų analizėje, kurios metu buvo siekiama išsiaiškinti antrinio momento ir momento persiskirstymo ryšį, gautus rezultatus lygina su Thiru Aravithan'o et al. atlikto eksperimento rezultatais (Thiru Aravithan et al., 1999). Apskaičiuotų momentų rezultatai lyginami su momentais gautais atlikus tampriąją analizę ir su faktiniais momentais, užfiksuotais atliekant eksperimentinius tyrimus (žr. 1.26 pav.). Iš duotų grafikų matyti, kad ribiniai momentai atsižvelgiant į 100 % antrinį momentą ($M_u(100\% M_{sec})$) labai skiriasi nuo bandymo metu nustatytų momentų ($M_{P,exp}$). Šis skirtumas atsirado, kadangi buvo prognozuojamas mažesnis momentas tarpatramio viduryje ir didesnis momentas vidurinėje atramoje. Tačiau, kaip matoma iš grafikų vertinant antrinį momentą 30 % ($M_u(30\% M_{sec})$), apskaičiuoti momentai sutapo su bandymo rezultatais (Witchukreangkrai et al., 2003).

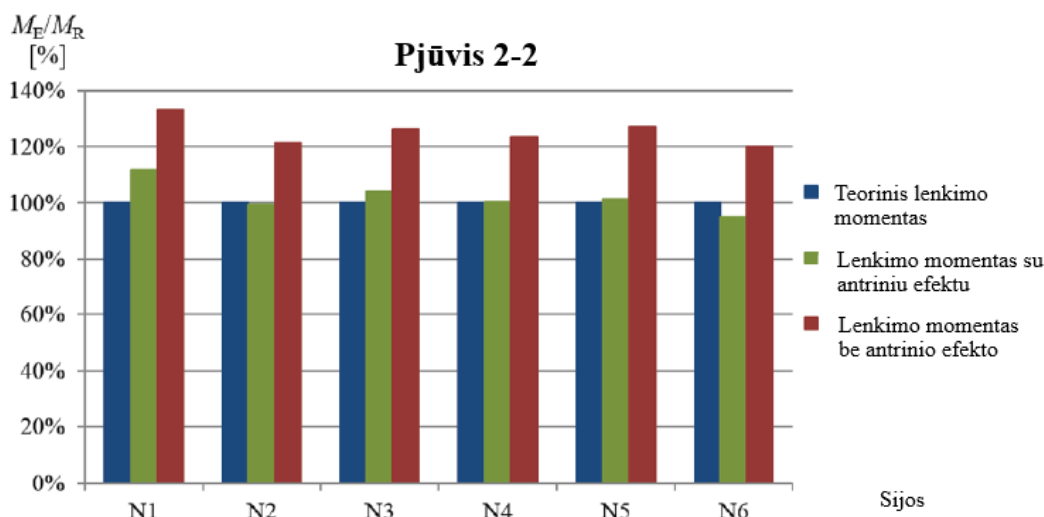


1.26 pav. Lenkimo momentų pasiskirstymas išilgai tarpatramio (Witchukreangkrai et al., 2003)

Halvonik'as et al. tyrime atliko teorinių ir eksperimentinių tyrimų analizę, kurioje lygino apskaičiuotus su gautais eksperimentinio tyrimo metu lenkimo momentais (be antrinio momento ir su antriniu momentu). Gautų rezultatų palyginimas parodytas 1.27 ir 1.28 paveiksluose. Iš grafikų matyti, jog visų sijų lenkimo momentai su antriniais efektais, gautais eksperimentinių tyrimu metu, yra artimesni apskaičiuotiems teoriniams lenkimo momentams, nei momentai be antrinių poveikių. Pjūvyje 1-1 vidutinis skirtumas tarp teorinio lenkimo momento ir eksperimentinio lenkimo momento be antrinių poveikių lygus 7,9 %, o su antriniais efektais skirtumas sumažėjo iki 0,4 %. Pjūvyje 2-2 skirtumas tarp teorinio ir eksperimentinio lenkimo momento be antrinių poveikių buvo dar ryškesnis, šie momentai skyrėsi 27,4 %, o su antriniais efektais skirtumas siekė 5,5 % (Halvonik et al., 2018).



1.27 pav. Teorinių ir eksperimentinių tyrimų rezultatų palyginimas pjūvyje 1-1 (Halvonik et al., 2018)



1.28 pav. Teorinių ir eksperimentinių tyrimų rezultatų palyginimas pjūvyje 2-2 (Halvonik et al., 2018)

1.8. Skyriaus išvados

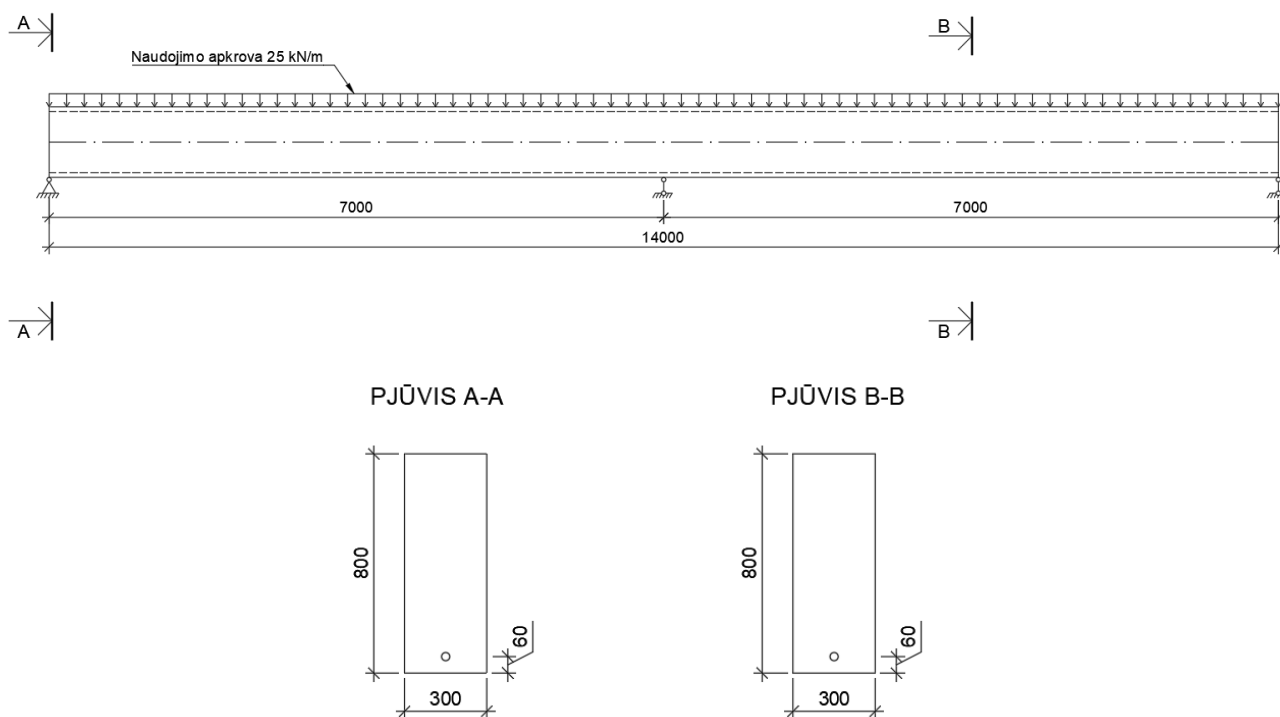
1. Statiškai neišsprendžiamos daugiaatramės sijos sistemos projektavimas reikalauja atsižvelgti ne tik į kritinį pjūvį, bet ir į visos sijos elgseną.
2. Triatramėje statikiškai nesprenžiamose sijose vidurinė atrama varžo sijos išlinkimą, o šis atramos suvaržymas lemia nežinomos reakcijos atsiradimą. Dėl šios reakcijos atsiradimo susidaro antrinis momentas.
3. Statiškai neišsprendžiamų iš anksto įtemptų gelžbetoninių elementų įrąžos gali būti nustatomos taikant statybinės mechanikos metodus, tokius kaip jėgų metodas, kampų pasisukimo metodas ar momentų pasiskirstymo metodas.
4. Vidinės įrąžos priklauso nuo daugelio veiksnių, tokių kaip išankstinio įtempimo jėgos dydis, armatūros padėtis skerspjūvyje, atrėmimo sąlygos.
5. Iš anksto įtemptos armatūros padėtis yra labai svarbi triatramės sijos projektavimo ir konstravimo proceso dalis. Jei armatūros padėtis yra netinkamai parinkta, tai gali sukelti konstrukcijos susilpnėjimą ir mažinti jos galimybes atlaikyti išorines apkrovas.
6. Projektuojant daugiaatrames statikiškai nesprenžiamas sijas būtina įvertinti atsirandantį antrinį momentą, kadangi jis sumažina arba padidina veikiantį momentą vidurinėje atramoje.

2. ANALITINIAI SKAIČIAVIMAI

Šiame skyriuje nagrinėjama iš anksto įtemptos armatūros padėties įtaka lenkimo momentų pasiskirstymui triatramėse sijose atliekant analitinius skaičiavimus. Darbe tiriamos šešios sijos su skirtingais įtemptais lynais per sijos ilgį. Antrinių momentų apskaičiavimui naudojamas kampų pasisukimo metodas. Buvo atlikta lyginamoji analizė, kurioje palyginami įrašų tarpatramyje ir vidurinėje atramoje nuo skirtingų įtemptų lynų rezultatai. Taip pat atlikta parametrinė analizė keičiant išankstinio apgniuždymo jėgos dydį bei keičiant išankstinio apgniuždymo jėgos ekscentricitetą. Be to buvo atlikta dar vienos papildomos sijos analizė siekiant palyginti gautus analitinių skaičiavimų rezultatus su rezultatais, gautais Halvonik'o et al. eksperimentinio tyrimo metu.

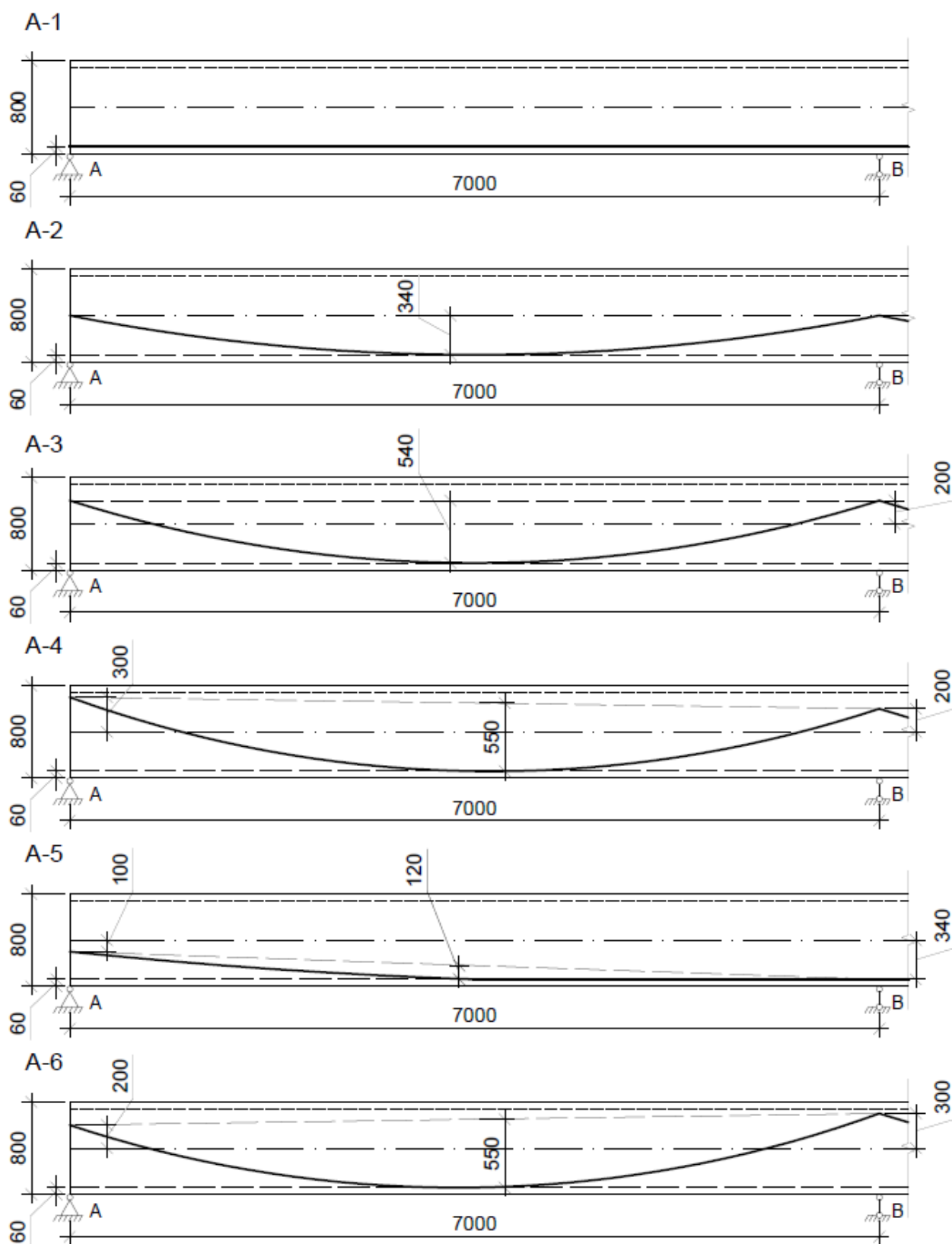
2.1. Tiriamos konstrukcijos

Šios analizės tikslas buvo išnagrinėti šešias triatrames gelžbetonines sijas, kurių skerspjūvių matmenys $h=800$ mm ir $b=300$ mm, o tarpatramių ilgiai yra po 7 m ir bendras ilgis – 14 m. Sijos armuotos Y1860S7-15.7 išilginiais įtemptais lynais, o betono klasė yra C45/55. Taip pat buvo parinkta pradinė naudojimo apkrova – 25 kN/m, bei išankstinio apgniuždymo jėga, kuri lygi 200 kN. Sijos skaičiuotinė schema ir skerspjūvio pjūviai pavaizduoti 2.1 paveiksle.



2.1 pav. Skaičiuojamoji triatramės sijos schema ir skerspjūvio pjūviai

Visų šešių analizuojamų sijų skaičiuojamos schemas su skirtingomis lynų formomis, kurios įvertina skirtingą sijos elgseną, pavaizduotos 2.2 paveiksle. Skirtingi sijos žymimos nuo A-1 iki A-6.

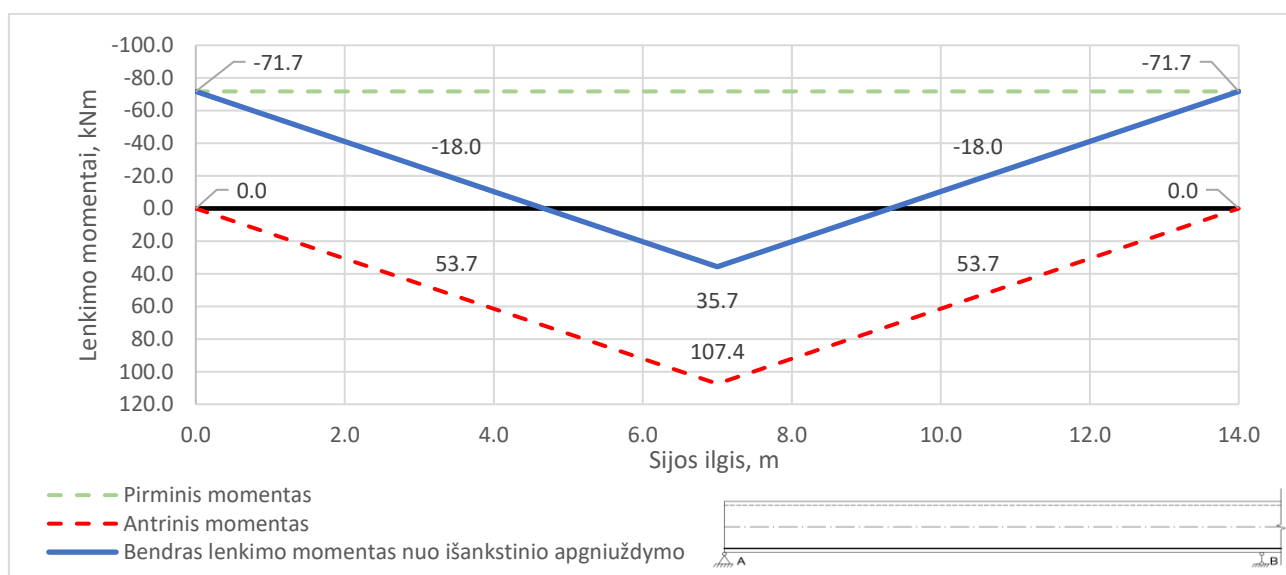


2.2 pav. Šešių sijų nuo A-1 iki A-6 skaičiuojamosios schemas su skirtingais įtemptos armatūros išdėstymais per sijos ilgį

2.2. Sijų analitiniai skaičiavimai

Analitiniais šešių sijų skaičiavimams naudojamas kampų pasisukimo metodas. Taikant kampų pasisukimo metodą randamas momentas nuo iš ankstinio apgniuždymo jėgos. Šis momentas susideda iš pirminio ir antrinio momento. Pirminis momentas – lenkimo momentas nuo išankstinio apgniuždymo jėgos. Antrinis momentas – lenkimo momentas, sukiamas dėl vidurinėje atramoje atsiradusios priešingos krypties reakcijos kraštinių atramų atžvilgiu. Susumavus pirminį ir antrinį lenkimo momentus, gaunama bendra lenkimo momentų diagrama nuo išankstinio apgniuždymo.

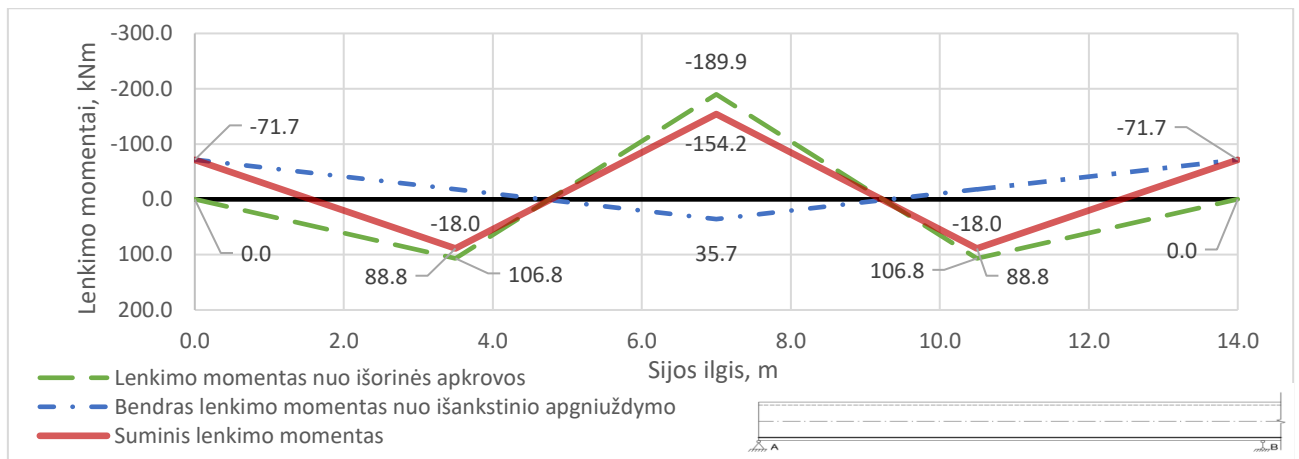
Naudojant sijos A-1 įtemptos armatūros išdėstymo schemą gaunami pirminiai momentai, antriniai momentai ir bendras lenkimo momentas nuo išankstinio apgniuždymo. Šie rezultatai parodyti 2.3 paveiksle.



2.3 pav. Sijos A-1 gauti lenkimo momentai tik nuo išankstinio apgniuždymo

Nagrinėjant 2.3 paveiksle pateiktus lenkimo momentų rezultatus pastebima, jog išankstinis apgniuždymas A-1 sijoje sukelia -71,7 kNm pirminius momentus, kurie per sijos ilgį pasiskirsto vienodai. Išankstinis apgniuždymas A-1 sijoje taip pat sukelia antrinius momentus, kurie nuo A atramos iki B atramos didėja nuo 0 kNm iki 107,4 kNm. Susumavus pirminius ir antrinius momentus gaunami bendri lenkimo momentai nuo išankstinio apgniuždymo. Iš diagramoje (žr. 2.3 pav.) pavaizduotų bendrų lenkimo momentų rezultatų matyti, jog A atramoje gauti momentai yra lygūs -71,7 kNm, tarpatramio viduryje yra lygūs -18 kNm, o B atramoje yra lygūs 35,7 kNm. Iš rezultatų matyti, jog A atramoje ir tarpatramio viduryje susidaro neigiami lenkimo momentai, o B atramoje teigiami.

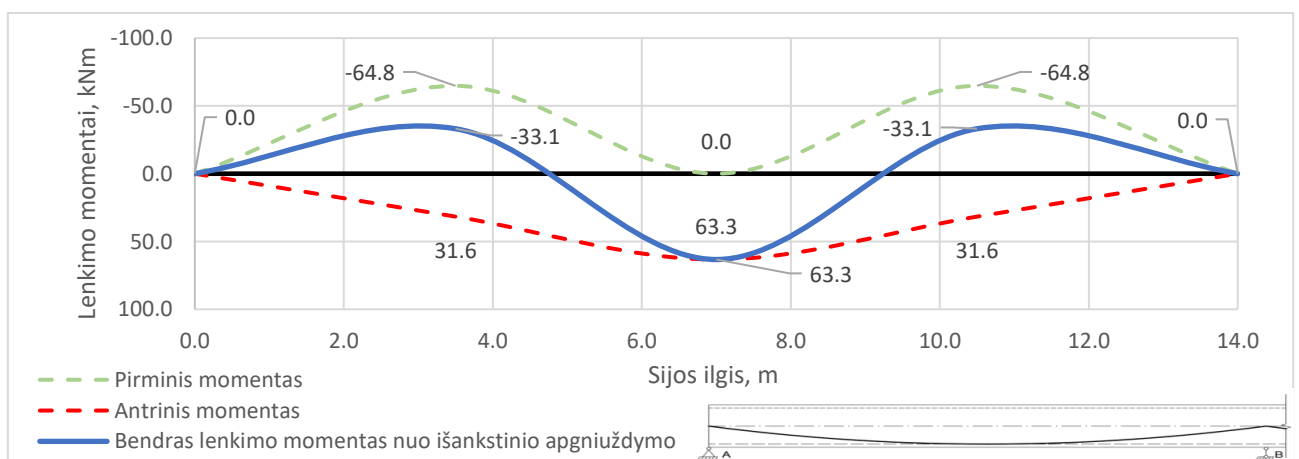
Taikant sijos A-1 įtemptos armatūros išdėstymo schemą gaunami lenkimo momentai nuo išorinės apkrovos, bendri lenkimo momentai nuo išankstinio apgniuždymo ir suminiai lenkimo momentai. Šie rezultatai parodyti 2.4 paveiksle.



2.4 pav. Sijos A-1 gauti lenkimo momentai nuo išankstinio apgniuždymo ir išorinės apkrovos

Analizuojant 2.4 paveiksle pateiktus rezultatus pastebima, jog lenkimo momentai nuo išorinės apkrovos triatramėje sijoje gaunami tokie: A atramoje lenkimo momentas nesusidaro, tarpatramio viduryje lenkimo momentas yra lygus 106,8 kNm, o B atramoje susidaro neigiamas lenkimo momentas, kuris lygus -189,9 kNm. Lenkimo momentai nuo išorinės apkrovos yra vienodi visoms sijoms nuo A-1 iki A-6. Suminiai lenkimo momentai gaunami susumavus išorinės apkrovos sukeltus lenkimo momentus su lenkimo momentais nuo išankstinio apgniuždymo. Iš 2.4 paveikslo akivaizdžiai matyti, jog susumavus išorinės apkrovos sukeltus lenkimo momentus su lenkimo momentais nuo išankstinio apgniuždymo, išorinės apkrovos sukelti lenkimo momentai sumažėja, t. y. išankstinis apgniuždymas A-1 sijoje sumažina lenkimo momentus nuo išorinės apkrovos, ir gaunama suminė lenkimo momentų diagrama. Naudojant sijos A-1 variante pateiktą įtemptos armatūros išdėstymą, išankstinis apgniuždymas sumažina išorinės apkrovos sukeltus lenkimo momentus B atramoje 18,8 %, o tarpatramio viduryje – 16,85 %.

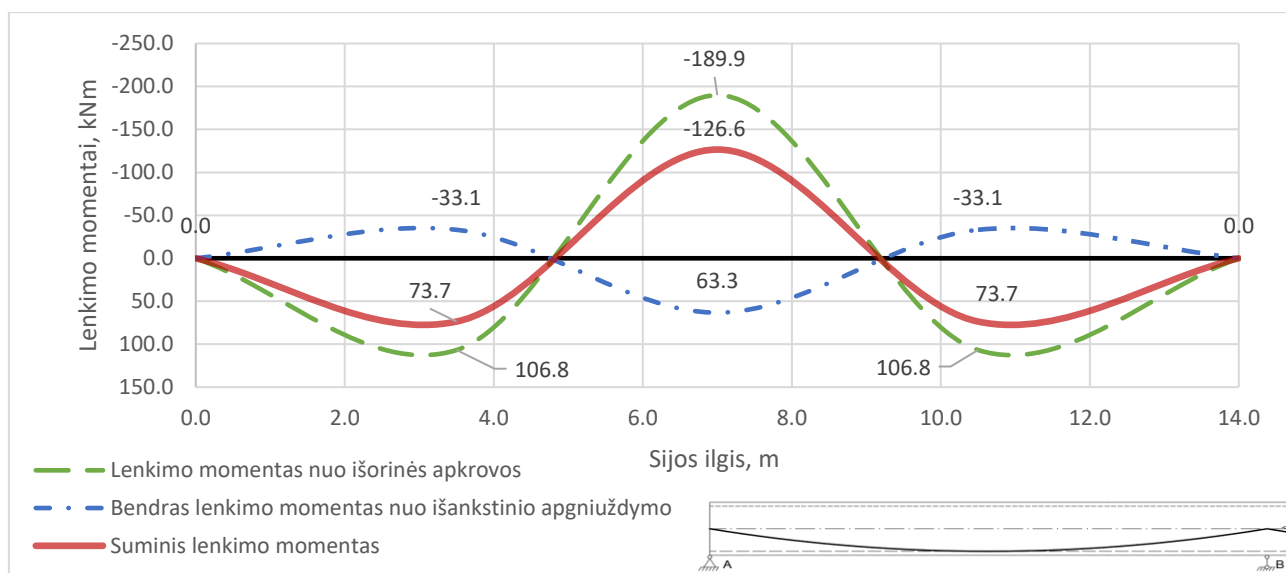
Naudojant sijos A-2 iš anksto įtemptos armatūros išdėstymo schemą gaunami pirminiai momentai, antriniai momentai ir bendras lenkimo momentas nuo išankstinio apgniuždymo. Šie rezultatai parodyti 2.5 paveiksle.



2.5 pav. Sijos A-2 gauti lenkimo momentai tik nuo išankstinio apgniuždymo

Analizuojant 2.5 paveiksle pateiktus lenkimo momentų rezultatus pastebima, jog išankstinis apgniuždymas A-2 sijoje sukelia $-64,8$ kNm pirminį momentą tik tarpatramio viduryje, kadangi A atramoje ir B atramoje ekscentricitetas lygus nuliui, o tarpatramio viduryje lynas nuleistas žemiau svorio centro, todėl ten susidaro pirminis momentas. Išankstinis apgniuždymas A-2 sijoje taip pat sukelia antrinius momentus, kurie nuo A atramos iki B atramos didėja nuo 0 kNm iki $63,3$ kNm. Iš diagramoje (žr. 2.5 pav.) pavaizduotų bendrų lenkimo momentų rezultatų matyti, jog A atramoje lenkimo momentas nesusidaro, tačiau tarpatramio viduryje lenkimo momentas yra lygus $-33,1$ kNm, o B atramoje lenkimo momentas – lygus $63,3$ kNm. Lyginant sijos A-2 lenkimo momentų rezultatus nuo išankstinio apgniuždymo su sijos A-1 rezultatais pastebima, jog B atramoje lenkimo momentas nuo išankstinio apgniuždymo padidėjo $43,6$ %, o tarpatramio viduryje – $45,6$ %.

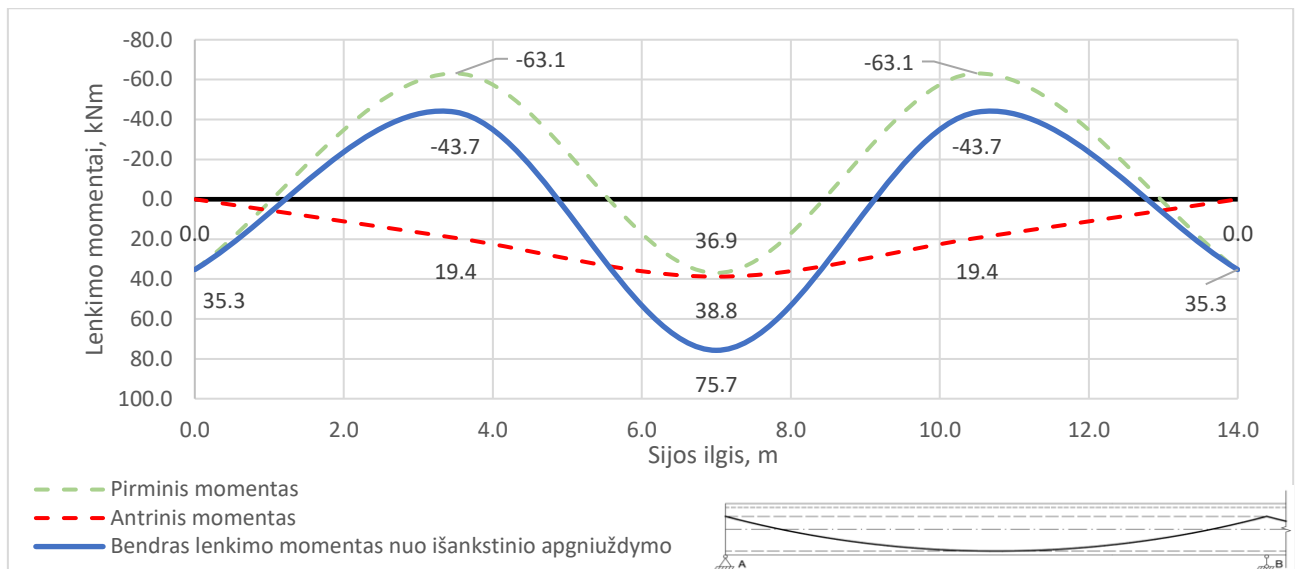
Taikant sijos A-2 iš anksto įtemptos armatūros išdėstymo schemą gaunami lenkimo momentai nuo išorinės apkrovos, bendri lenkimo momentai nuo išankstinio apgniuždymo ir suminiai lenkimo momentai. Šie rezultatai parodyti 2.6 paveiksle.



2.6 pav. Sijos A-2 gauti lenkimo momentai nuo išankstinio apgniuždymo ir išorinės apkrovos

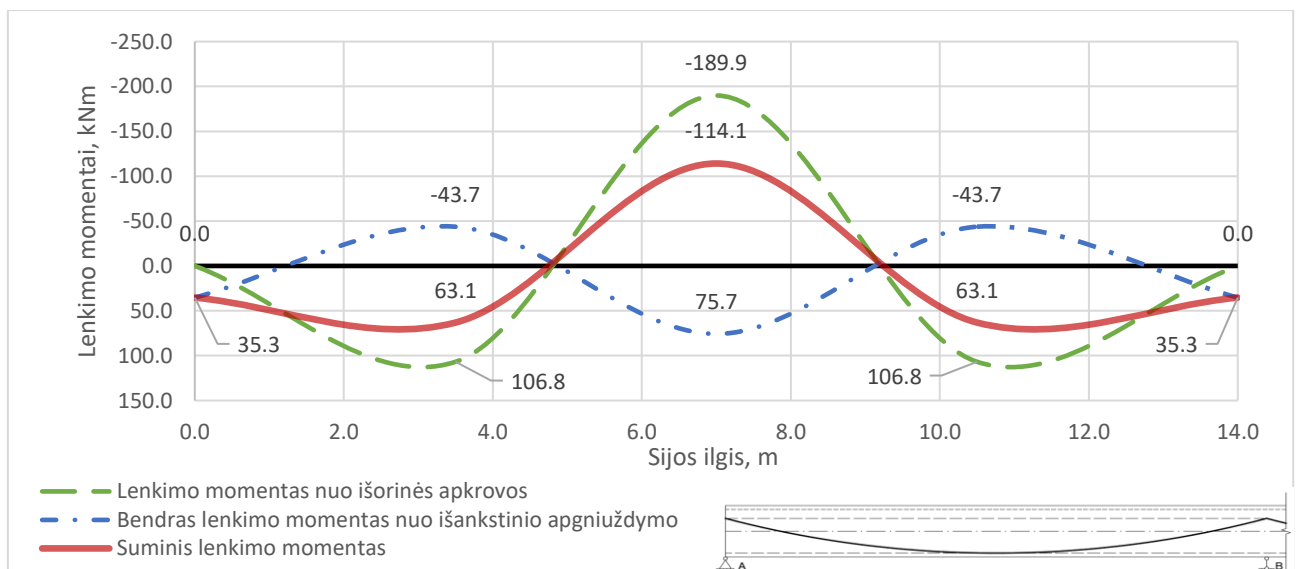
Analizuojant 2.6 paveiksle pateiktus suminius lenkimo momentų rezultatus galima pastebėti, jog susumavus išorinės apkrovos sukeltus lenkimo momentus su lenkimo momentais nuo išankstinio apgniuždymo, išorinės apkrovos sukelti lenkimo momentai sumažėja, t. y. išankstinis apgniuždymas A-2 sijoje sumažina lenkimo momentus nuo išorinės apkrovos, ir gaunama suminė lenkimo momentų diagrama. Naudojant sijos A-2 variante pateiktą įtemptos armatūros išdėstymą, išankstinis apgniuždymas sumažina išorinės apkrovos sukeltus lenkimo momentus B atramoje $33,3$ %, o tarpatramio viduryje – 31 %.

Naudojant sijos A-3 įtemptos armatūros išdėstymo schemą gaunami 2.7 paveiksle pavaizduoti lenkimo momentai nuo išankstinio apgniuždymo.



2.7 pav. Sijos A-3 gauti lenkimo momentai tik nuo išankstinio apgniuždymo

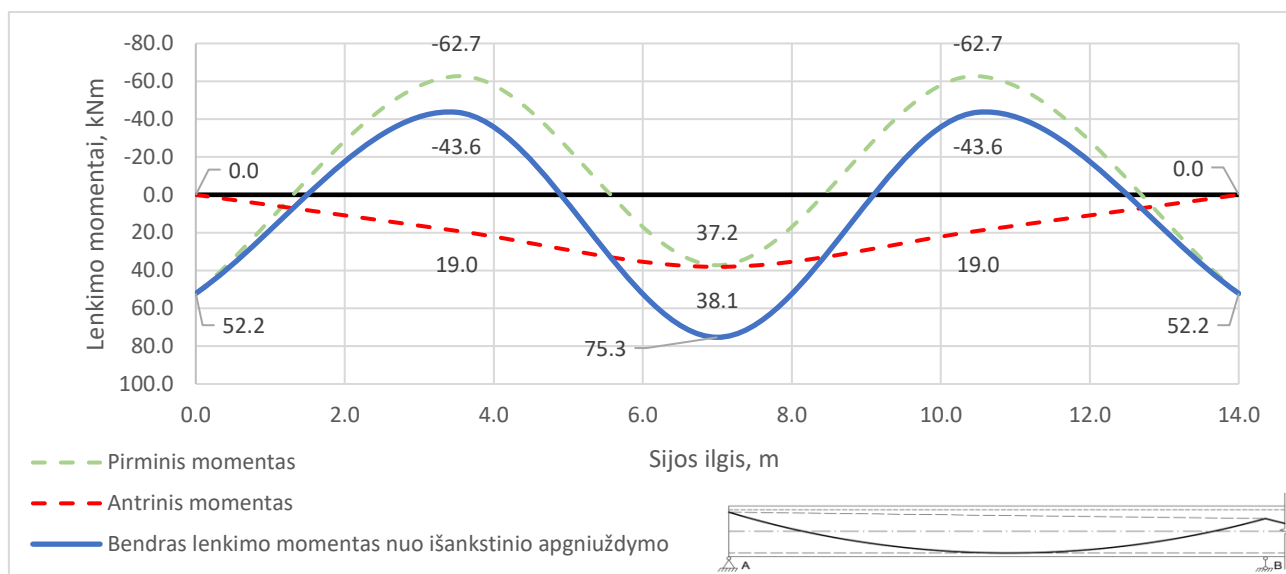
Nagrinėjant 2.7 paveiksle pateiktus pirminių momentų rezultatus matyti, kad išankstinis apgniuždymas A-3 sijoje inicijuoja A atramoje pirminį momentą, kuris lygus 35,3 kNm, B atramoje – 36,9 kNm pirminį momentą ir tarpatrio viduryje – pirminį momentą lygų -63,1 kNm. Taip pat pateiktame 2.7 paveiksle galima pamatyti, antrinių momentų rezultatus, kurie nuo A atramos iki B atramos didėja nuo 0 kNm iki 38,8 kNm. Iš pateiktų paveiksle rezultatų matyti, kad gauti bendri lenkimo momentai nuo išankstinio apgniuždymo A atramoje yra lygūs 35,3 kNm, tarpatrio viduryje – lygūs -43,7 kNm, o B atramoje – lygūs 75,7 kNm. Iš rezultatų matyti, jog A atramoje ir B atramoje susidaro teigiami bendri lenkimo momentai nuo išankstinio apgniuždymo, o tarpatrio viduryje neigiami. Lyginant sijos A-3 lenkimo momentų rezultatus nuo išankstinio apgniuždymo su sijos A-1 rezultatais pastebima, jog B atramoje lenkimo momentas nuo išankstinio apgniuždymo padidėjo 52,8 %, o tarpatrio viduryje – 58,8 %.



2.8 pav. Sijos A-3 gauti lenkimo momentai nuo išankstinio apgniuždymo ir išorinės apkrovos

Taikant sijos A-3 įtemptos armatūros išdėstymo schemą gaunami 2.8 paveiksle pavaizduoti suminiai lenkimo momentai. Analizuojant 2.8 paveiksle pateiktus suminius lenkimo momentų rezultatus galima pastebėti, jog išorinės apkrovos sukelti lenkimo momentai yra sumažinami lenkimo momentų nuo išankstinio apgniuždymo. Naudojant sijos A-3 variante pateiktą įtemptos armatūros išdėstymą, išankstinis apgniuždymas sumažina išorinės apkrovos sukeltus lenkimo momentus B atramoje 39,9 %, o tarpatramio viduryje – 40,9 %.

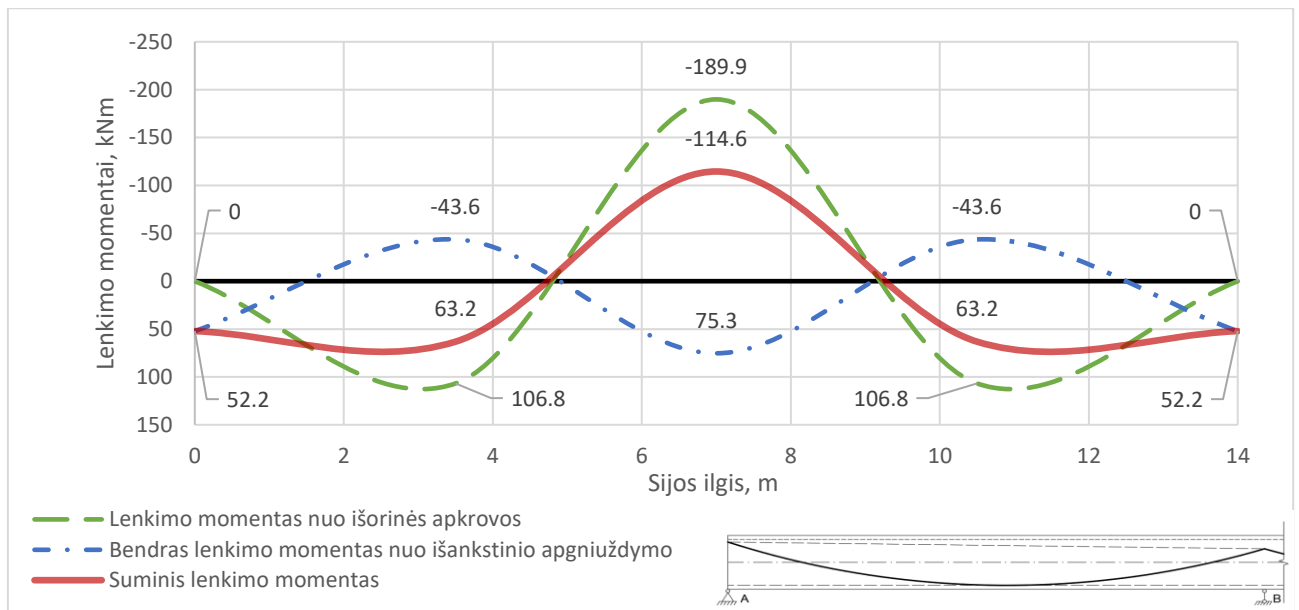
Naudojant sijos A-4 iš anksto įtemptos armatūros išdėstymo schemą gaunami 2.9 paveiksle pavaizduoti lenkimo momentai nuo išankstinio apgniuždymo.



2.9 pav. Sijos A-4 gauti lenkimo momentai tik nuo išankstinio apgniuždymo

Analizuojant 2.9 paveiksle pateiktus duomenis galima pamatyti, jog taikant sijos A-4 įtemptos armatūros išdėstymo schemą gaunami pirminiai momentai, kurie A atramoje lygūs 52,2 kNm, B atramoje lygūs 37,2 kNm, o tarpatramio viduryje lygūs -62,7 kNm. Sijoje A-4 taip pat sukeliama ir antriniai momentai, kurie nuo A atramos iki B atramos didėja nuo 0 kNm iki 38,1 kNm. Iš pateiktų 2.9 paveiksle rezultatų matyti, jog bendri lenkimo momentai nuo išankstinio apgniuždymo, susumavus pirminius ir antrinius momentus, A atramoje yra lygūs 52,2 kNm, tarpatramio viduryje – lygūs -43,6 kNm, o B atramoje – lygūs 75,3 kNm. Iš rezultatų matyti, jog A atramoje ir B atramoje susidaro teigiami bendri lenkimo momentai nuo išankstinio apgniuždymo, o tarpatramio viduryje neigiami. Lyginant sijos A-4 lenkimo momentų rezultatus nuo išankstinio apgniuždymo su sijos A-1 rezultatais pastebima, jog B atramoje lenkimo momentas nuo išankstinio apgniuždymo padidėjo 52,6 %, o tarpatramio viduryje – 58,7 %.

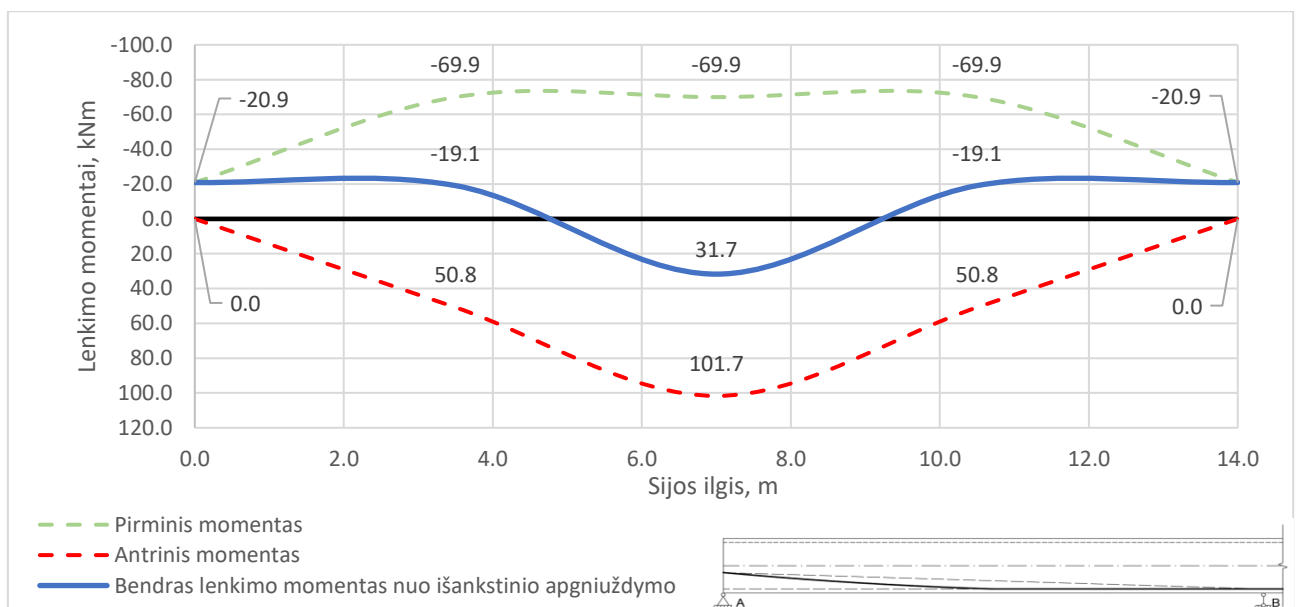
Taikant sijos A-4 iš anksto įtemptos armatūros išdėstymo schemą gaunami 2.10 paveiksle pavaizduoti suminiai lenkimo momentai.



2.10 pav. Sijos A-4 gauti lenkimo momentai nuo išankstinio apgniuždymo ir išorinės apkrovos

Analizuojant 2.10 paveiksle pateiktus suminius lenkimo momentų rezultatus galima pastebėti, jog susumavus išorinės apkrovos sukeltus lenkimo momentus su lenkimo momentais nuo išankstinio apgniuždymo, išorinės apkrovos sukelti lenkimo momentai sumažėja. Naudojant sijos A-4 įtemptos armatūros išdėstymo schemą, išankstinis apgniuždymas sumažina išorinės apkrovos sukeltus lenkimo momentus B atramoje 39,7 %, o tarpatriamio viduryje – 40,8 %.

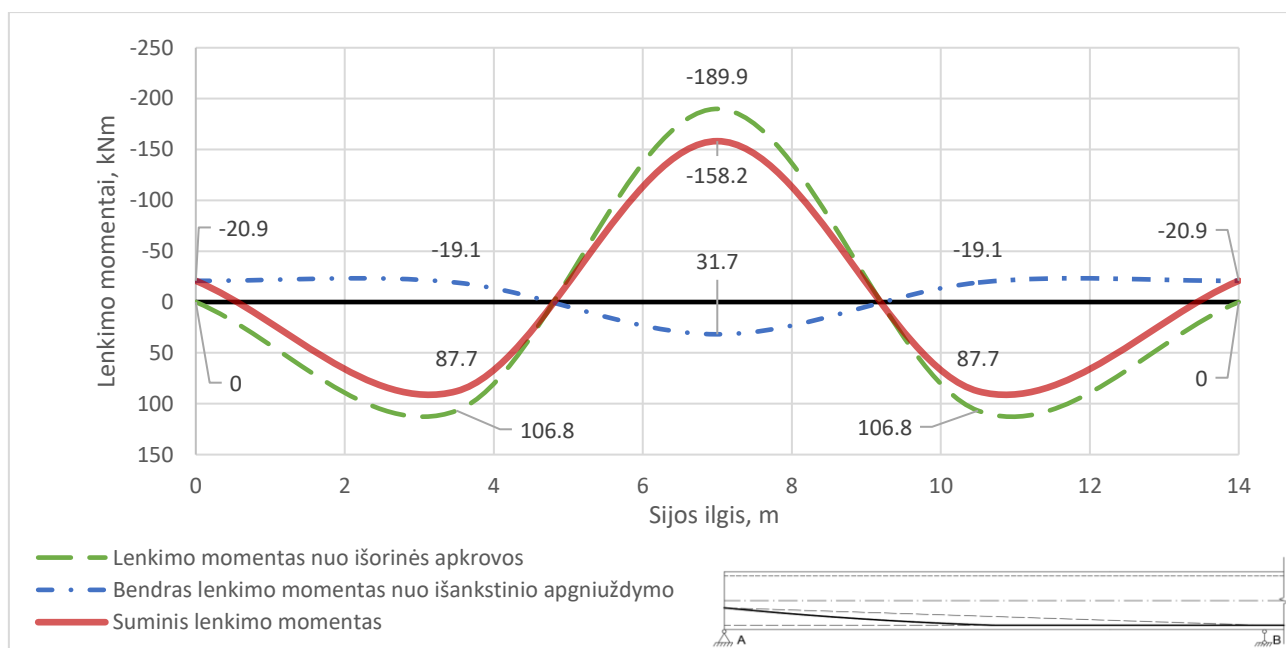
Naudojant sijos A-5 įtemptos armatūros išdėstymo schemą gaunami 2.11 paveiksle pavaizduoti lenkimo momentai nuo išankstinio apgniuždymo.



2.11 pav. Sijos A-5 gauti lenkimo momentai tik nuo išankstinio apgniuždymo

Nagrinėjant 2.11 paveiksle pateiktus lenkimo momentų rezultatus pastebima, jog išankstinis apgniuždymas A-5 sijoje sukelia A atramoje -20,9 kNm pirminį momentą, B atramoje -69,9 kNm pirminį momentą ir tarpatramio viduryje -69,9 kNm pirminį momentą. Taip pat pateiktame 2.11 paveiksle galima pamatyti, antrinių momentų rezultatus, kurie nuo A atramos iki B atramos didėja nuo 0 kNm iki 101,7 kNm. Iš pateiktų 2.11 paveiksle rezultatų matyti, jog bendri lenkimo momentai nuo išankstinio apgniuždymo, susumavus pirminius ir antrinius momentus, A atramoje yra lygūs -20,9 kNm, tarpatramio viduryje – lygūs -19,1 kNm, o B atramoje – lygūs 31,7 kNm. Iš gautų rezultatų matyti, jog B atramoje sukeliama teigiami bendri lenkimo momentai nuo išankstinio apgniuždymo, o A atramoje ir tarpatramio viduryje neigiami. Lyginant sijos A-5 lenkimo momentų rezultatus nuo išankstinio apgniuždymo su sijos A-1 rezultatais pastebima, jog B atramoje lenkimo momentas nuo išankstinio apgniuždymo sumažėjo 11,2 %, o tarpatramio viduryje padidėjo 5,76 %.

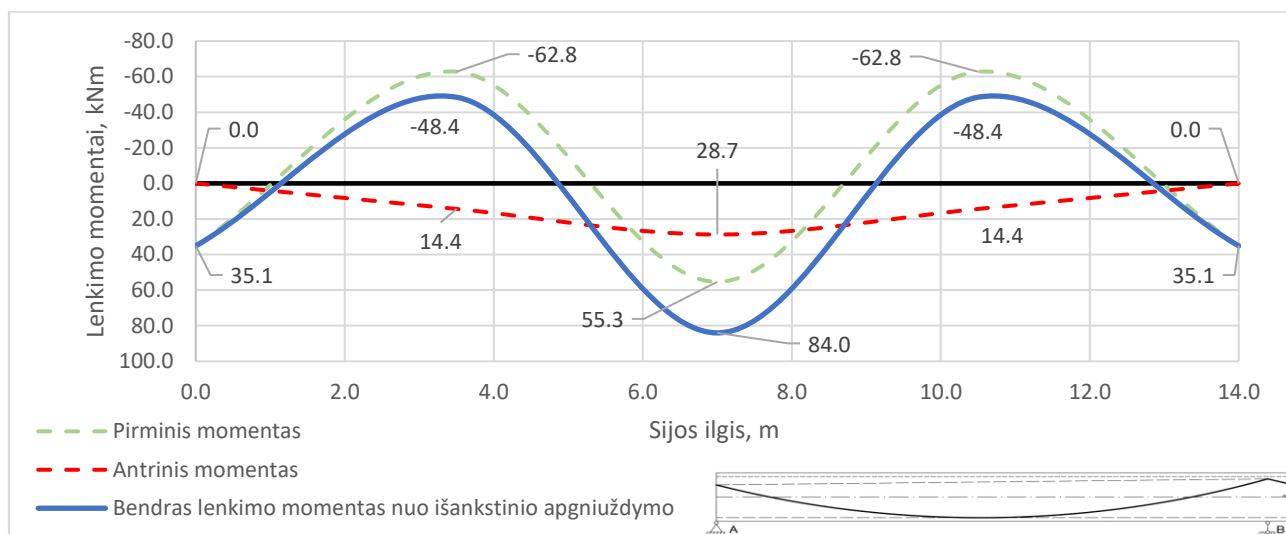
Taikant sijos A-5 įtemptos armatūros išdėstymo schemą gaunami 2.12 paveiksle pavaizduoti suminiai lenkimo momentai.



2.12 pav. Sijos A-5 gauti lenkimo momentai nuo išankstinio apgniuždymo ir išorinės apkrovos

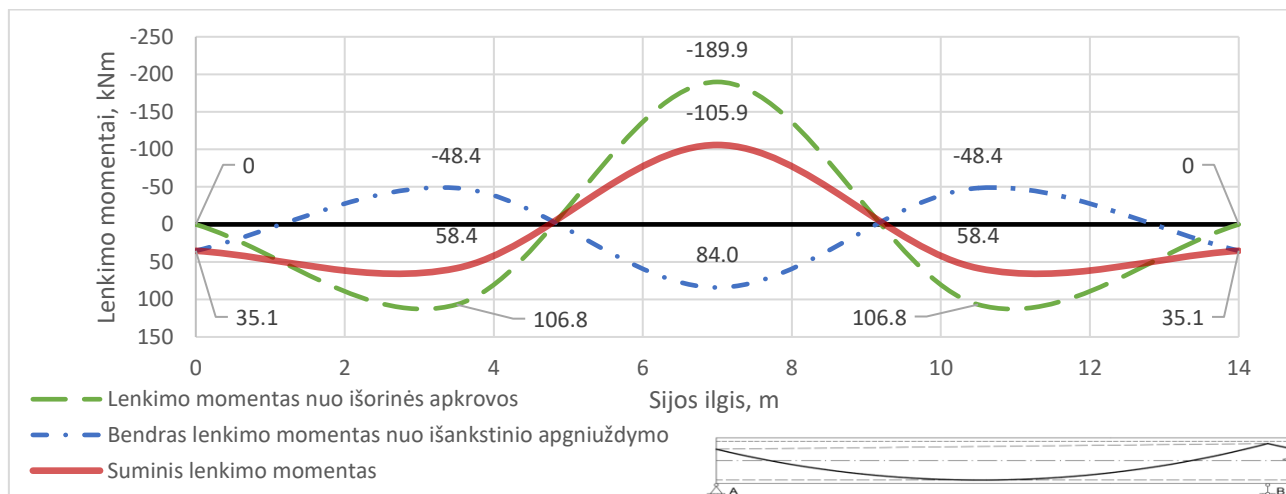
Nagrinėjant 2.12 paveiksle pateiktus suminius lenkimo momentų rezultatus pastebima, kad susumavus išorinių apkrovų sukeltus lenkimo momentus su lenkimo momentais, atsirandančiais dėl išankstinio apgniuždymo, išorinės apkrovos lenkimo momentai sumažėja. Tai yra išankstinis apgniuždymas sijos A-5 atveju sumažina lenkimo momentus, kuriuos sukelia išorinė apkrova, ir taip gaunama suminė lenkimo momentų diagrama. Taikant sijos A-5 iš anksto įtemptos armatūros išdėstymo schemą gaunama, jog išankstinis apgniuždymas sumažina išorinės apkrovos sukeltus lenkimo momentus B atramoje 16,7 %, o tarpatramio viduryje – 17,9 %.

Taikant sijos A-6 iš anksto įtemptos armatūros išdėstymo schemą gaunami 2.13 paveiksle pavaizduoti lenkimo momentai nuo išankstinio apgniuždymo.



2.13 pav. Sijos A-6 gauti lenkimo momentai tik nuo išankstinio apgniuždymo

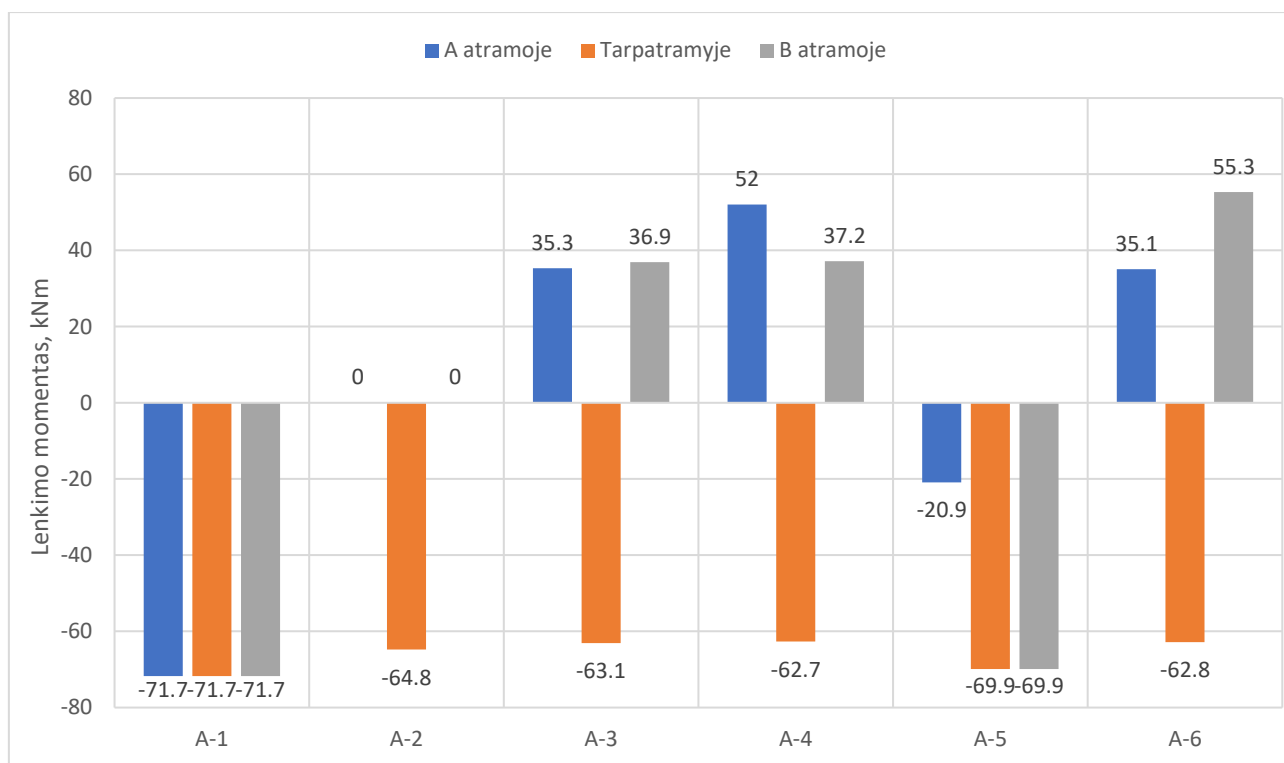
Nagrinėjant 2.13 paveiksle pateiktus pirminių momentų rezultatus matyti, kad išankstinis apgniuždymas A-6 sijoje inicijuoja A atramoje pirminį momentą, kuris lygus 35,1 kNm, B atramoje – 55,3 kNm pirminį momentą ir tarpatramio viduryje – pirminį momentą lygų -62,8 kNm. Išankstinis apgniuždymas A-6 sijoje taip pat sukelia antrinius momentus, kurie nuo A atramos iki B atramos didėja nuo 0 kNm iki 28,7 kNm. Iš pateiktų 2.13 paveiksle rezultatų matyti, kad gauti bendri lenkimo momentai nuo išankstinio apgniuždymo A atramoje yra lygūs 35,1 kNm, tarpatramio viduryje – lygūs -48,4 kNm, o B atramoje – lygūs 84 kNm. Iš gautų bendrų lenkimo momentų rezultatų matyti, jog A atramoje ir B atramoje susidaro teigiami bendri lenkimo momentai nuo išankstinio apgniuždymo, o tarpatramio viduryje neigiami. Lyginant sijos A-6 lenkimo momentų rezultatus nuo išankstinio apgniuždymo su sijos A-1 rezultatais pastebima, jog B atramoje lenkimo momentas nuo išankstinio apgniuždymo padidėjo 57,5 %, o tarpatramio viduryje – 62,8 %.



2.14 pav. Sijos A-6 gauti lenkimo momentai nuo išankstinio apgniuždymo ir išorinės apkrovos

Taikant sijos A-6 iš anksto įtemptos armatūros išdėstymą gaunami lenkimo momentai nuo išorinės apkrovos, bendri lenkimo momentai nuo išankstinio apgniuždymo ir suminiai lenkimo momentai. Šie rezultatai parodyti 2.14 paveiksle. Naudojant A-6 variante pateiktą įtemptos armatūros išdėstymą, išankstinis apgniuždymas sumažina išorinės apkrovos sukeltus lenkimo momentus B atramoje 44,2 %, o tarpatramio viduryje – 45,3 %.

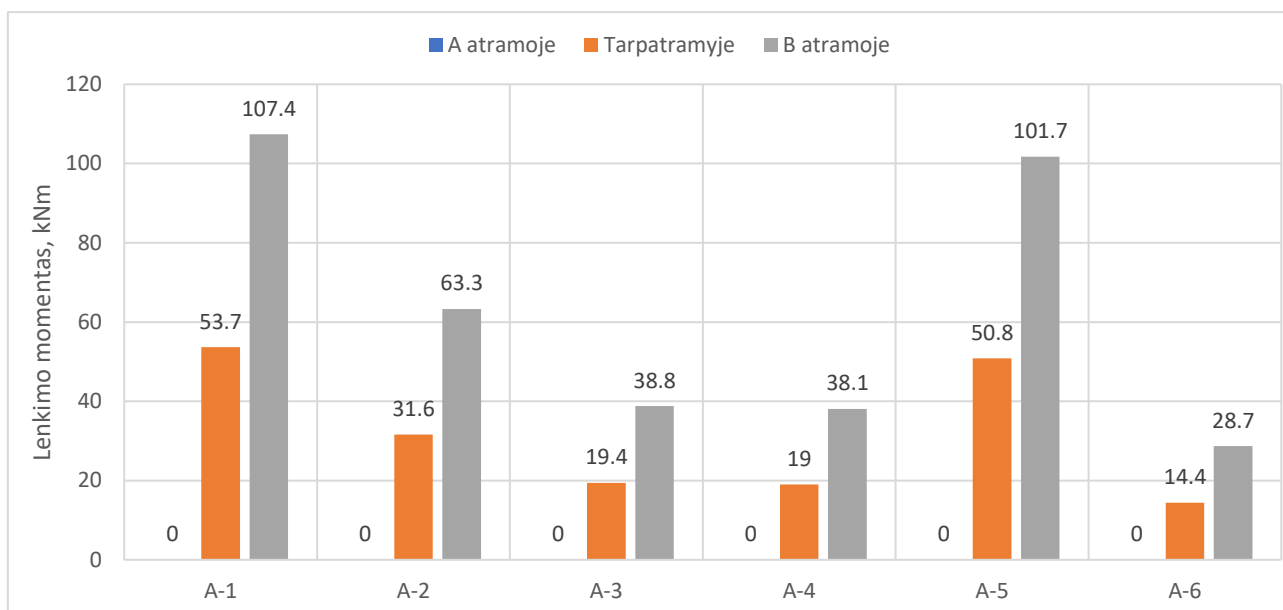
Taikant skirtingus sijų (nuo A-1 iki A-6) įtemptos armatūros išdėstymo variantus gaunami skirtingi pirminiai momentai, dėl išankstinio apgniuždymo. Rezultatų palyginimas pateikiamas 2.15 paveiksle. Iš grafike pavaizduotų rezultatų matyti, jog didžiausias neigiamas pirminis momentas, visuose nagrinėjamuose sijos pjūviuose, gaunamas sijos A-1 atveju. Taip pat galima pastebėti, jog sijos A-2 atveju atramose pirminis lenkimo momentas nesusidaro. Didžiausias teigiamas pirminis momentas B atramoje susidaro sijos A-6 atveju, o A atramoje didžiausias teigiamas pirminis momentas sijos A-4 atveju. Skirtingas sijų armatūros padėčių išdėstymas skerspjūvyje labai lemia pirminio momento dydį.



2.15 pav. Pirminiai momentai sijų nuo A-1 iki A-6

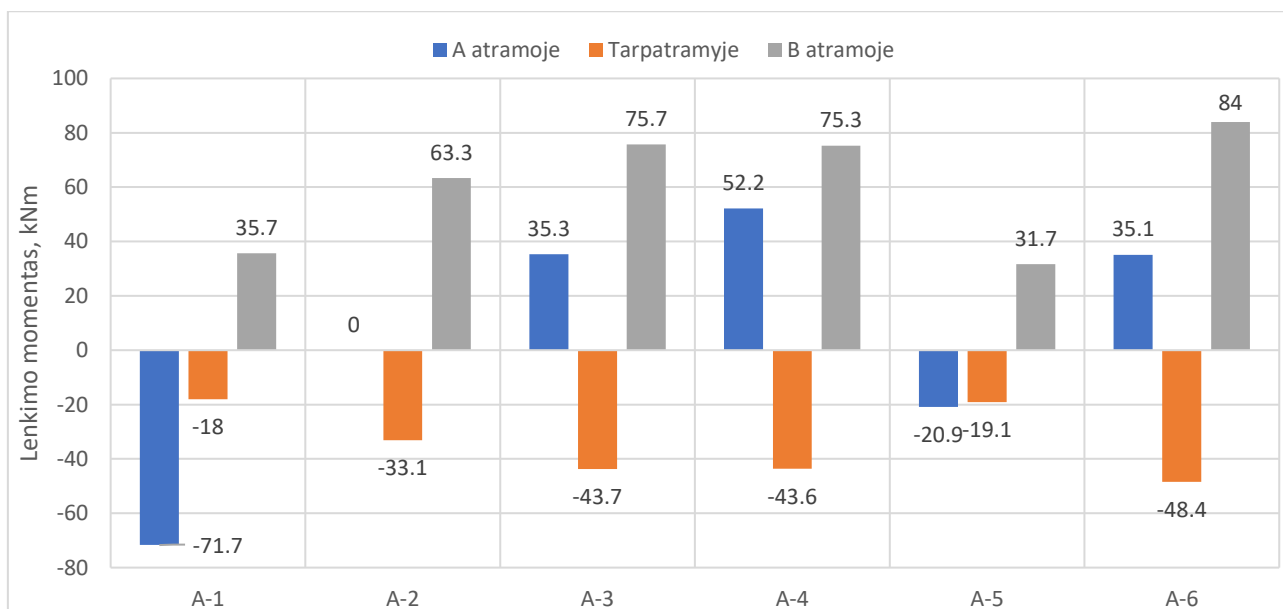
Nagrinėjant skirtingus sijų (nuo A-1 iki A-6) įtemptos armatūros padėčių variantus gaunami skirtingi antriniai momentai, dėl išankstinio apgniuždymo ir B atramoje atsiradusios priešingos krypties reakcijos kraštinių atramų atžvilgiu. Rezultatų palyginimas pateikiamas 2.16 paveiksle. Kaip galima pastebėti rezultatuose, A atramoje antriniai momentai nesusidaro visais skirtingais sijų atvejais. Taip pat pastebima, jog nagrinėjamų sijų atvejais didžiausi antriniai momentai susidaro B atramoje. Lyginant skirtingus sijų variantus pastebima, jog didžiausi antriniai momentai susidaro

sijoje A-1 ir sijoje A-5, o tai lemia, jog šių atvejų armatūros išdėstymas B atramoje buvo apačioje ties apsauginiu betono sluoksniu, kai kitų variantų atvejų lynai ties B atrama buvo pakelti aukščiau. Dar iš pateiktų rezultatų galima pastebėti, jog tarpatramyje susidaro per pus mažesnis antrinis momentas nei B atramoje.



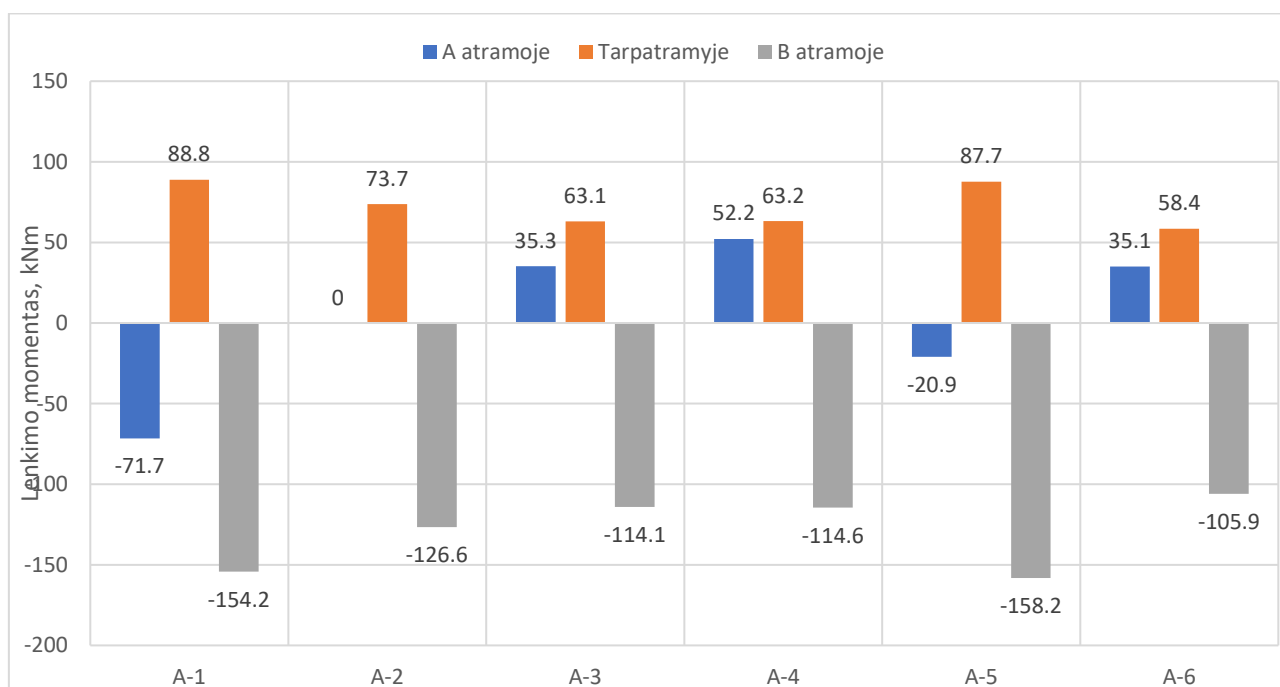
2.16 pav. Antriniai momentai sijų nuo A-1 iki A-6

Susumavus pirminius ir antrinius momentus gaunami bendri lenkimo momentai nuo išankstinio apgniuždymo. Taigi, nagrinėjant skirtingus sijų (nuo A-1 iki A-6) lynų išdėstymus skerspjūvyje gaunami ir skirtingi bendri lenkimo momentai, kurie pateikiami 2.17 paveiksle.



2.17 pav. Bendri lenkimo momentai nuo išankstinio apgniuždymo sijų nuo A-1 iki A-6

Iš pateiktos diagramos (žr. 2.17 pav.) galima matyti, jog susumavus pirminius ir antrinius momentus gaunami skirtingi bendri lenkimo momentai nuo išankstinio apgniuždymo, tam įtakos turi skirtingos sijų (nuo A-1 iki A-6) armatūros išdėstymo situacijos. Didžiausią bendrą lenkimo momentą B atramoje ir tarpatriamio viduryje sukelia sijos A-6 armatūros išdėstymas. A atramoje didžiausias bendras lenkimo momentas sukeliamas sijos A-1 atveju. Mažiausi bendri lenkimo momentai susidaro sijos A-5 atveju, kas reiškia, jog šios sijos armatūros išdėstymas mažiausiai turi įtakos suminio lenkimo momento sumažinimui nuo išorinės apkrovos. Sija A-3 ir sija A-4 sukelia panašius bendrus lenkimo momentus, tačiau sijos A-4 atveju sukeliamas didesnis bendras lenkimo momentas A atramoje. Taip pat, galima pastebėti, jog A atramoje sijos A-2 atveju nesukeliamas lenkimo momentas.



2.18 pav. Suminiai lenkimo momentai sijų nuo A-1 iki A-6

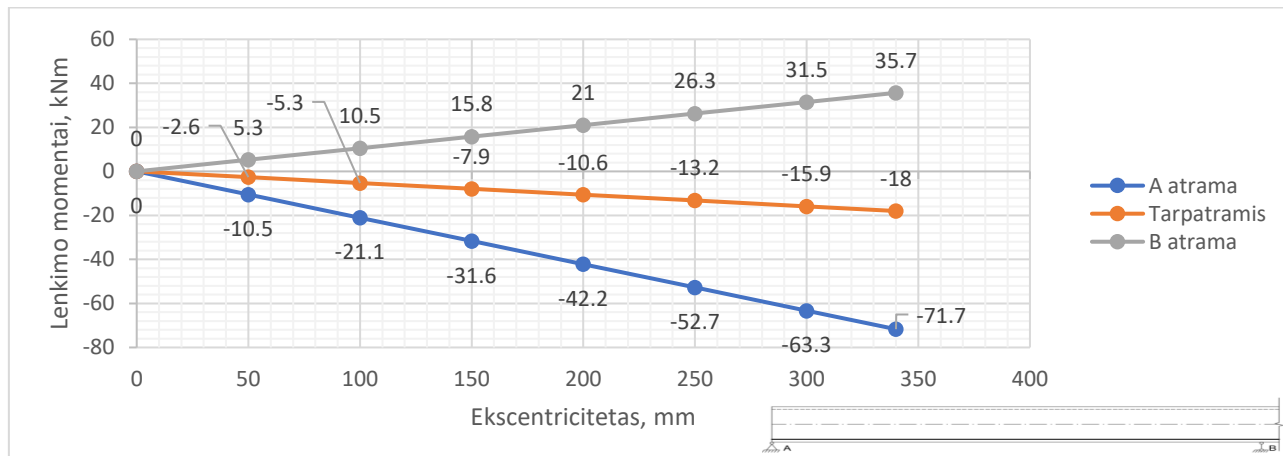
Nagrinėjamas (žr. 2.18 pav.) grafikas, kuriame pateikiami suminiai lenkimo momentų rezultatai. Suminiai lenkimo momentai gaunami sudedant lenkimo momentus nuo išankstinio apgniuždymo ir lenkimo momentus nuo išorinės apkrovos. Analizuojant gautus rezultatus pastebima, jog mažiausi suminiai lenkimo momentų rezultatai B atramoje gaunami sijos A-6 atveju, o didžiausi sijos A-1 ir sijos A-5 atvejais. Todėl galima teigti, jog norint, kad B atramoje būtų sumažinimas kuo daugiau suminis lenkimo momentas, armatūros išdėstymas B atramoje turėtų būti kuo aukščiau. Nagrinėjant tarpatriamio suminius lenkimo momentų rezultatus, matoma ta pati situacija, kaip ir B atramoje, sijos A-6 atveju gaunamas mažiausias suminis lenkimo momentas, o didžiausi suminiai lenkimo momentai gaunami sijos A-1 ir sijos A-5 atvejais. A atramoje didžiausias suminis lenkimo momentas susidaro sijos A-1 atveju, o sijos A-2 atveju nesudaro lenkimo momentas A atramoje.

2.3. Analitinė parametrinė analizė

Atlikta parametrinė analizė šešių sijų (nuo A-1 iki A-6), su skirtingais armatūros išdėstymais. Parametrinė analizė buvo atlikta norint įvertinti išankstinio apgniuždymo jėgos ekscentriciteto ir išankstinio apgniuždymo jėgos įtaką lenkimo momentams. Parametrinė analizė atlikta su prieš tai nagrinėtomis sijomis.

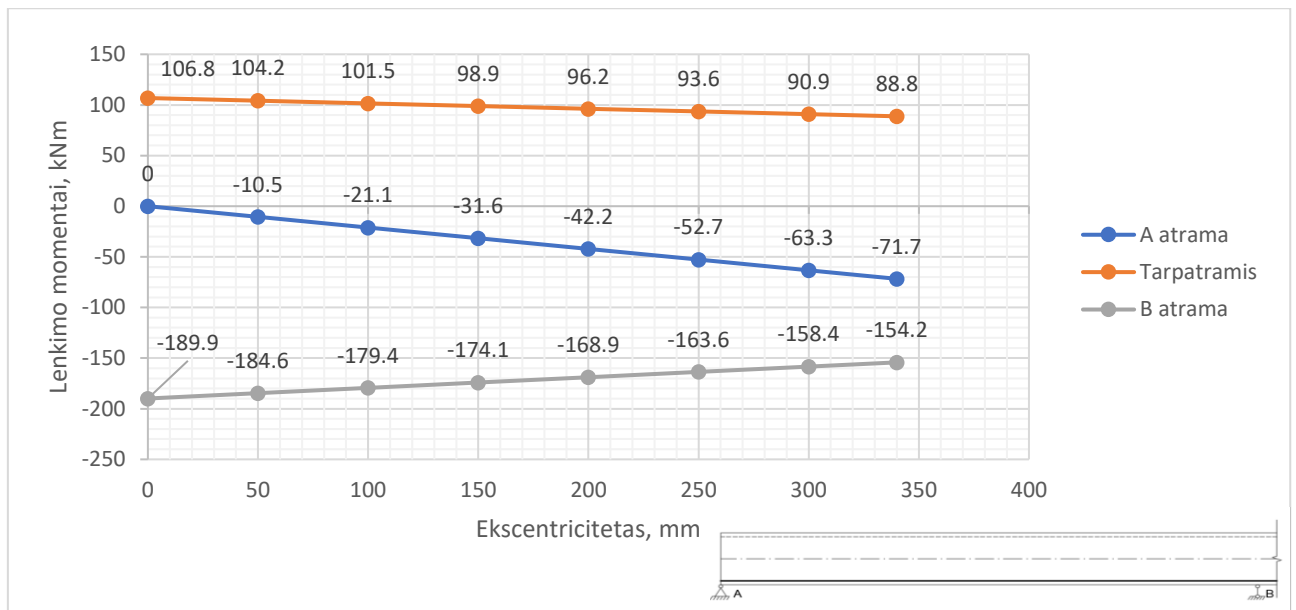
Išankstinio apgniuždymo jėgos ekscentriciteto įtaka

Atsižvelgiant į iš anksto įtemptos armatūros padėtį nagrinėjama apgniuždymo jėgos ekscentriciteto keitimo įtaka lenkimo momentų dydžiui. Ekscentricitetas buvo keičiamas nuo 0 iki 340 mm. Iš pradžių nagrinėjami lenkimo momentų rezultatai tik nuo išankstinio apgniuždymo (žr. 2.19 pav.). Nustatyta, jog keičiant armatūros padėtį lenkimo momentai nuo išankstinio apgniuždymo A atramoje, B atramoje ir tarpatramio viduryje kinta tiesiškai, sijos A-1 atveju. Pakeitus ekscentriciteto reikšmę nuo 50 mm iki 340 mm lenkimo momentas nuo išankstinio apgniuždymo A atramoje padidėjo 85,4 %, B atramoje – 85,6 %, o tarpatramyje – 85,2 %.



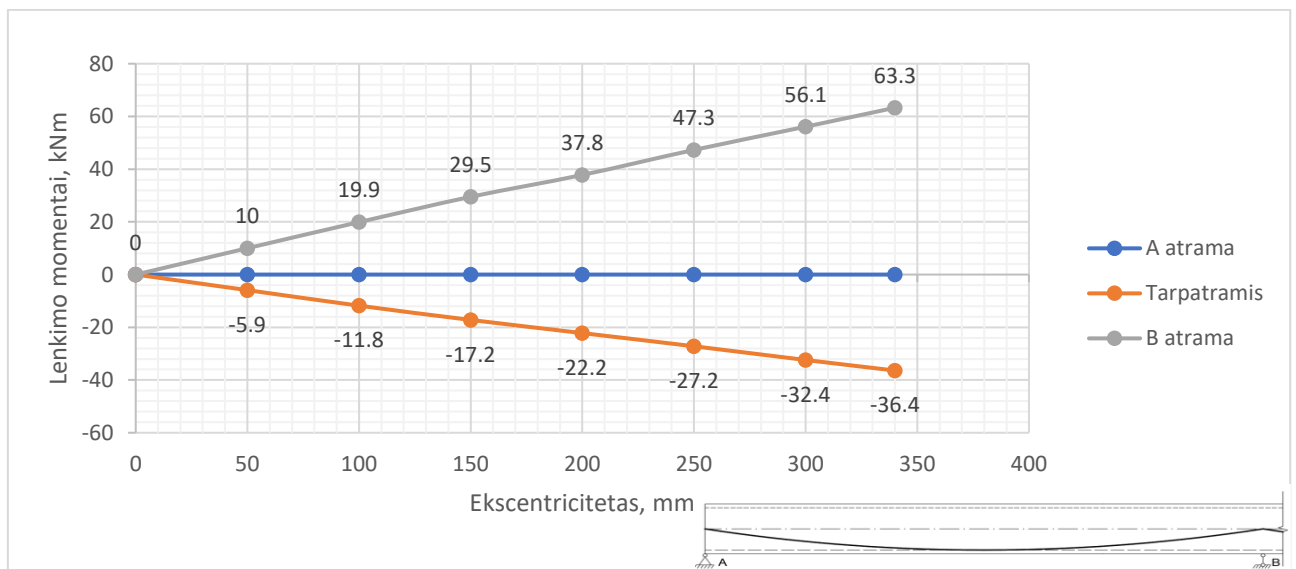
2.19 pav. Sijos A-1 lenkimo momentų kitimas (tik nuo išankstinio apgniuždymo) keičiant išankstinio apgniuždymo jėgos ekscentricitetą

Analizuojama (žr. 2.20 pav.) kokią įtaką turi armatūros padėtis, o tuo pačiu ir apgniuždymo jėgos ekscentricitetas suminiams lenkimo momentams (suma išankstinio apgniuždymo momentų ir išorinės apkrovos lenkimo momentų). Šiuo atveju rezultatai taip pat kinta tiesine priklausomybe. Iš grafike (žr. 2.20 pav.) pavaizduotų rezultatų matyti, jog pakeitus išankstinio apgniuždymo jėgos ekscentriciteto dydį nuo 50 mm iki 340 mm suminis lenkimo momentas tarpatramyje sumažėjo 14,8 %. Nagrinėjant suminį lenkimo momentą A atramoje matyti, jog niekas nepasikeitė nuo 2.19 paveiksle pateiktų rezultatų ir A atramoje liko tokie patys suminiai lenkimo momentai. Kadangi išorinė apkrova A atramoje lygi nuliui, todėl šį momentą lemia tik išankstinio apgniuždymo sukeltas lenkimo momentas. Iš grafiko matyti, jog B atramoje suminis lenkimo momentas sumažėjo 16,5 %.



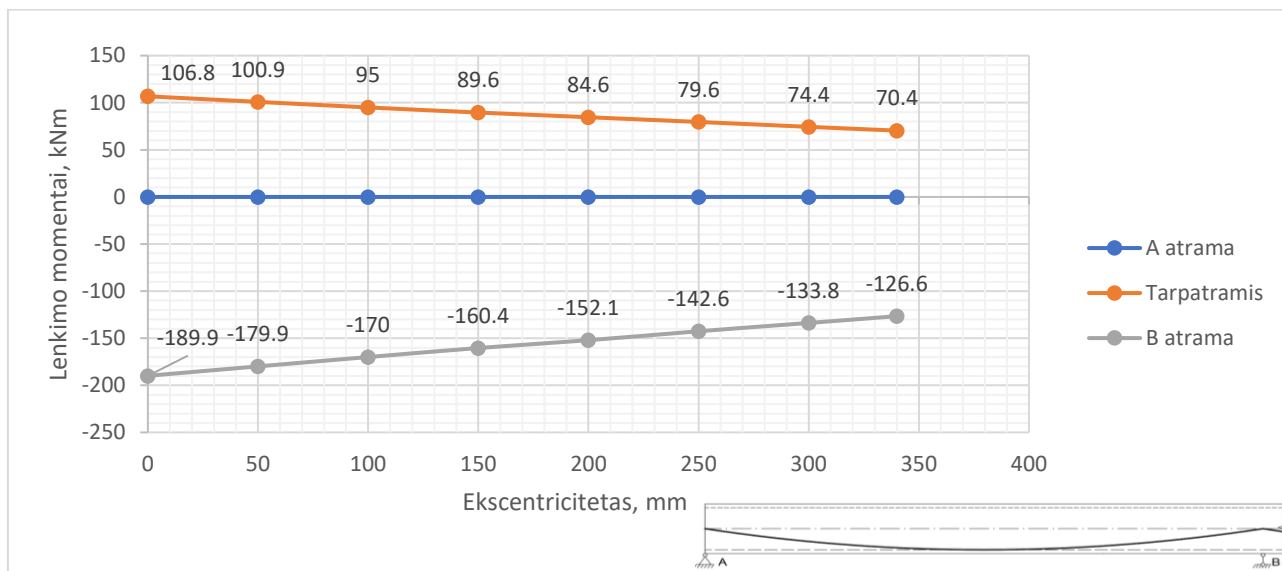
2.20 pav. Sijos A-1 lenkimo momentų kitimas (suminis lenkimo momentas) keičiant išankstinio apgniuždymo jėgos ekscentricitetą

Analizuojant sijos A-2 išankstinio apgniuždymo jėgos ekscentriciteto keitimą per skerspjūvio aukštį pastebima, jog lenkimo momentai nuo išankstinio apgniuždymo kinta tik tarpatramyje ir B atramoje, kadangi buvo keičiamas tik ekscentricitetas sijos tarpatramio viduryje nuo 0 iki 340 mm (žr. 2.21 pav.). Kintant išankstinio apgniuždymo jėgos ekscentriciteto reikšmei lenkimo momentas nuo išankstinio apgniuždymo B atramoje padidėjo 84,20 % ir tarpatramio viduryje – 83,79 %. Taip pat ir šiuo armatūros išdėstymo atveju ekscentricitetui kintant lenkimo momentai nuo išankstinio apgniuždymo didėja tiesiškai.

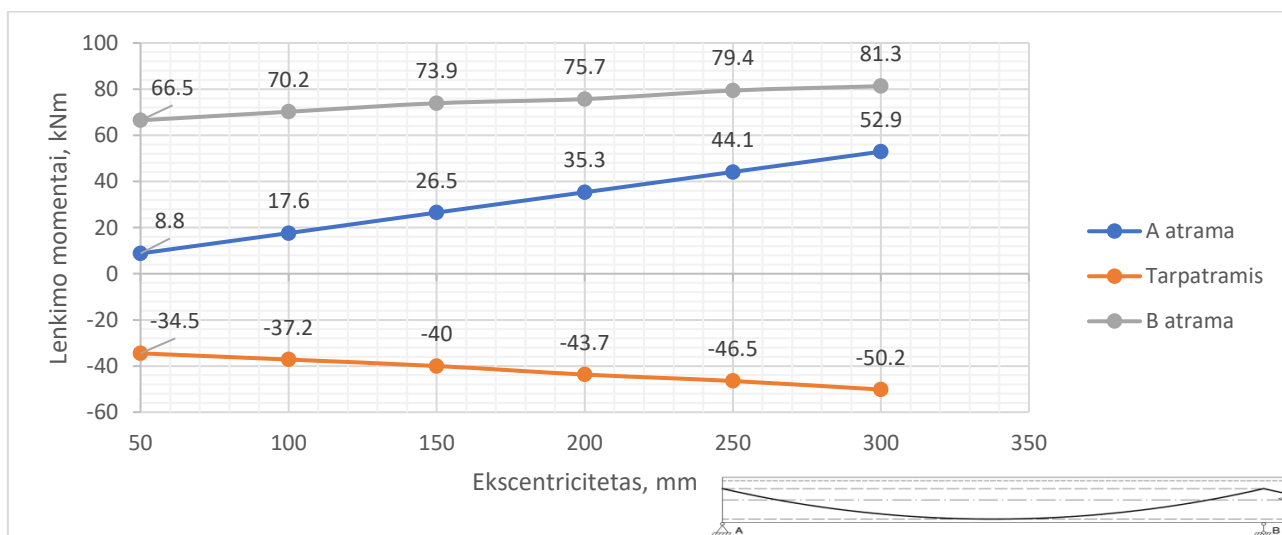


2.21 pav. Sijos A-2 lenkimo momentų kitimas (tik nuo išankstinio apgniuždymo) keičiant išankstinio apgniuždymo jėgos ekscentricitetą

Nagrinėjant 2.22 paveiksle pateiktus rezultatus matyti, kaip kinta sijos A-2 suminiai lenkimo momentai, kuriuos sudaro išankstinio apgniuždymo ir išorinės apkrovos lenkimo momentai. Šios sijos A-2 atveju taip pat keičiamas išankstinio apgniuždymo jėgos ekscentriciteto dydis tose pačiose rėžiuose. Iš šio grafiko akivaizdžiai matyti, jog kintant ekscentricitetui tarpatramio viduryje suminis lenkimo momentas A atramoje nesikeičia, nes lynas išdėstytas A atramoje ties svorio centru. Tačiau suminis lenkimo momentas tarpatramio viduryje sumažėja 34,08 %, o B atramoje – 33,33 %.

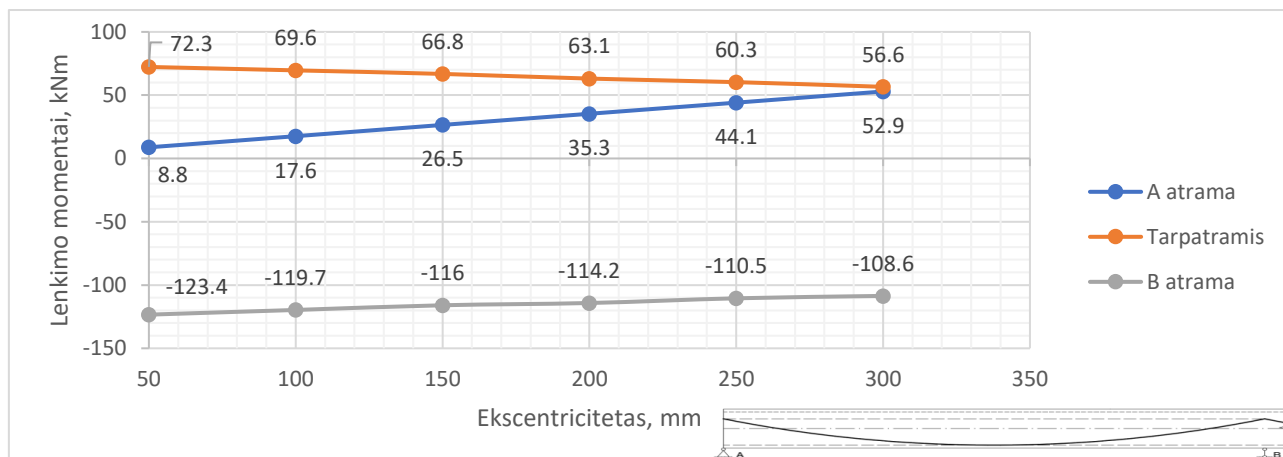


2.22 pav. Sijos A-2 lenkimo momentų kitimas (suminis lenkimo momentas) keičiant išankstinio apgniuždymo jėgos ekscentricitetą



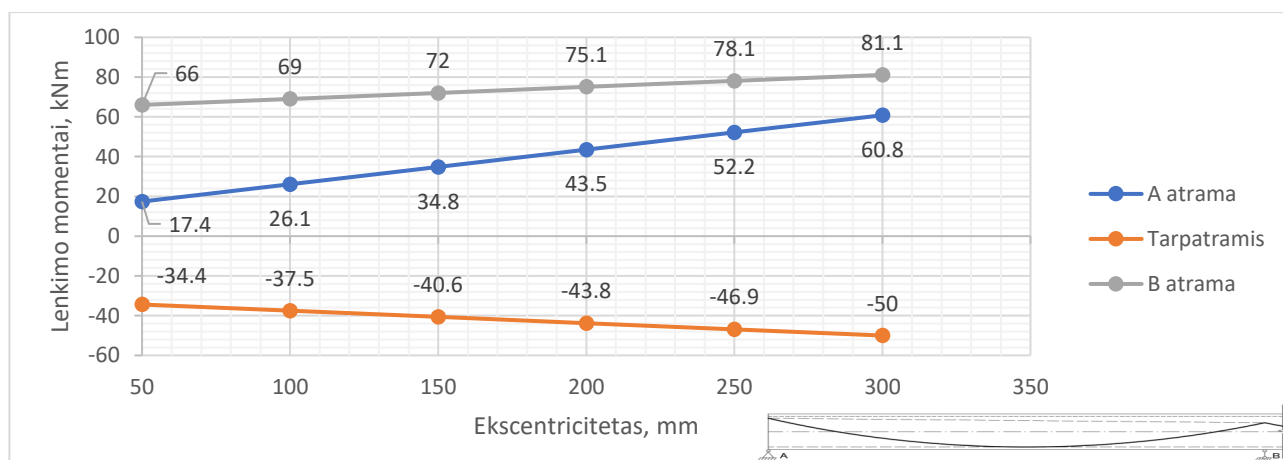
2.23 pav. Sijos A-3 lenkimo momentų kitimas (tik nuo išankstinio apgniuždymo) keičiant išankstinio apgniuždymo jėgos ekscentricitetą

Nagrinėjant 2.23 paveiksle pateiktus sijos A-3 lenkimo momentų nuo išankstinio apgniuždymo rezultatus pastebima, jog visuose nagrinėjamuose pjūviuose keičiant išankstinio apgniuždymo jėgos ekscentriciteto dydį keitėsi lenkimo momentai nuo išankstinio apgniuždymo. Ekscentricitetas buvo keičiamas A atramoje ir B atramoje nuo 50 mm iki 300 mm. Pakeitus sijos A-3 išankstinio apgniuždymo jėgos ekscentriciteto reikšmes lenkimo momentai nuo išankstinio apgniuždymo A atramoje padidėjo 83,36 %, B atramoje – 18,20 %, o tarpatramio viduryje – 31,27 %. Iš gautų rezultatų matyti, jog sijos A-3 atveju didžiausią įtaką išankstinio apgniuždymo jėgos ekscentriciteto keitimas turi lenkimo momentui nuo išankstinio apgniuždymo A atramoje.



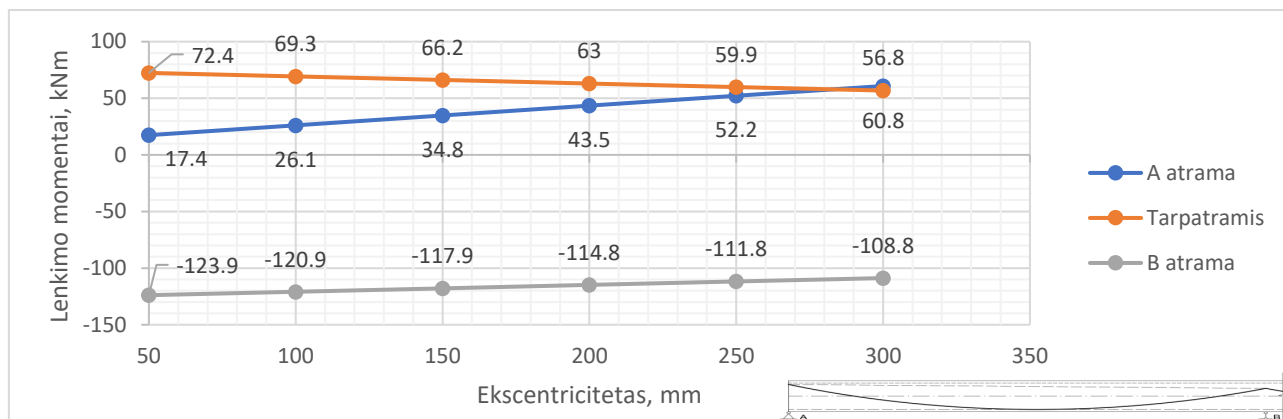
2.24 pav. Sijos A-3 lenkimo momentų kitimas (suminis lenkimo momentas) keičiant išankstinio apgniuždymo jėgos ekscentricitetą

Analizuojant 2.24 paveiksle pateiktus suminius lenkimo momentų rezultatus nuo keičiamo išankstinio apgniuždymo jėgos ekscentriciteto pastebima, jog A atramoje rezultatai nesikeičia nuo 2.23 paveiksle pateiktų rezultatų, kadangi išorinė apkrova A atramoje nesudaro lenkimo momento. Iš gautų rezultatų matyti, jog sijos A-3 išankstinio apgniuždymo jėgos ekscentriciteto keitimas sumažina suminį lenkimo momentą B atramoje 11,99 %, o tarpatramio viduryje – 21,72 %.



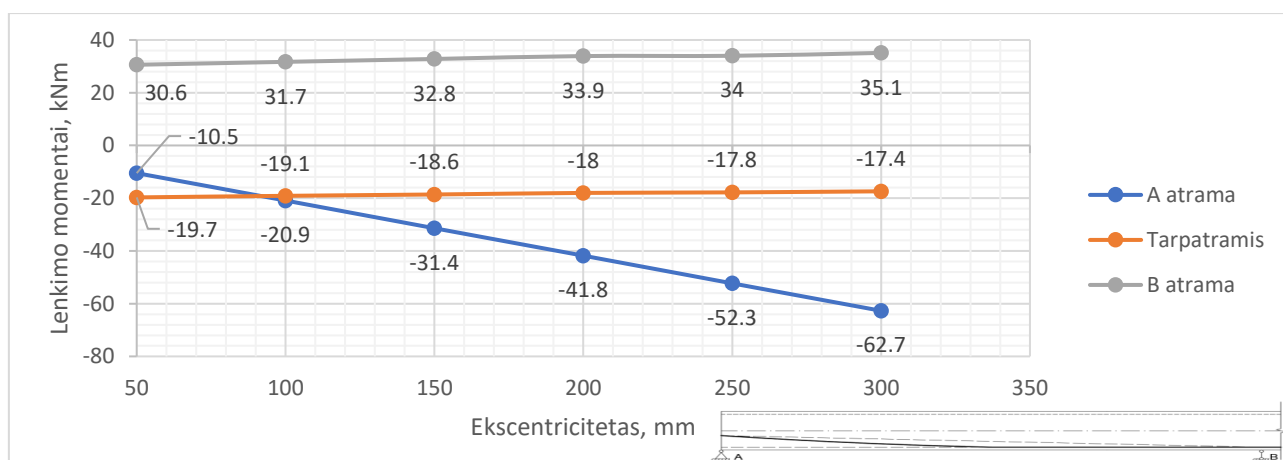
2.25 pav. Sijos A-4 lenkimo momentų kitimas (tik nuo išankstinio apgniuždymo) keičiant išankstinio apgniuždymo jėgos ekscentricitetą

Nagrinėjamas sijos A-4 armatūros išdėstymas, kuris šiuo atveju A atramoje pakeltas aukščiau per 50 mm, nei B atramoje (žr. 2.25 pav.). Sijos A-4 atveju išankstinio apgniuždymo jėgos ekscentricitetas buvo keičiamas nuo 50 mm iki 300 mm. Analizuojant 2.25 paveiksle pateiktus rezultatus pastebima, jog pakeitus sijos A-4 išankstinio apgniuždymo jėgos ekscentriciteto reikšmes lenkimo momentai nuo išankstinio apgniuždymo A atramoje padidėjo 71,38 %, B atramoje – 18,62 %, o tarpatramio viduryje – 31,20 %. Iš gautų rezultatų matyti, jog sijos A-4 atveju didžiausią įtaką išankstinio apgniuždymo jėgos ekscentriciteto keitimas turi lenkimo momentui nuo išankstinio apgniuždymo A atramoje.



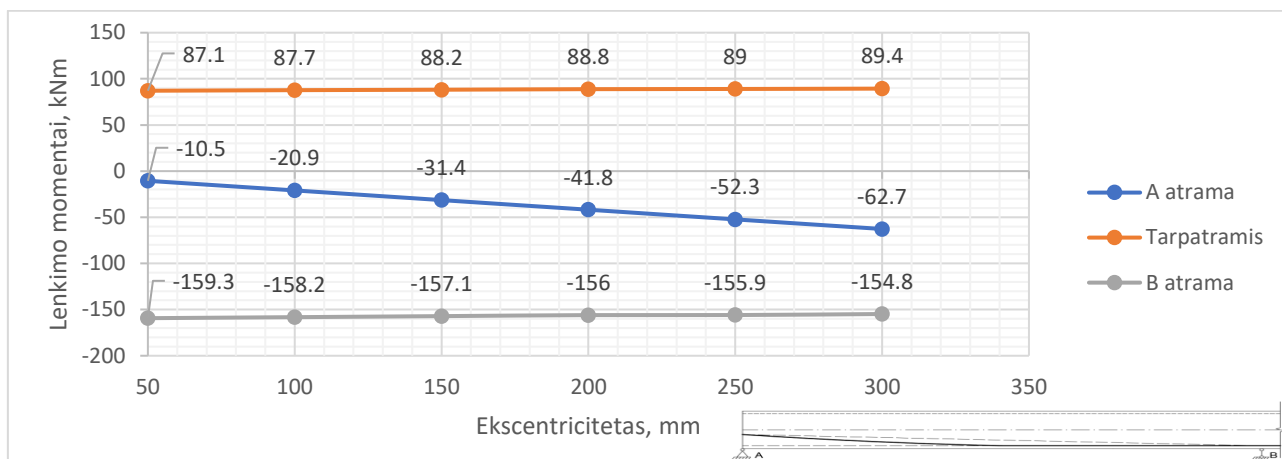
2.26 pav. Sijos A-4 lenkimo momentų kitimas (suminis lenkimo momentas) keičiant išankstinio apgniuždymo jėgos ekscentricitetą

Analizuojant 2.26 paveiksle pateiktus suminius lenkimo momentų rezultatus, nuo keičiamo išankstinio apgniuždymo jėgos ekscentriciteto, pastebima, jog A atramoje rezultatai nesikeičia nuo 2.25 paveikslo rezultatų, kadangi išorinė apkrova A atramoje nesudaro lenkimo momento. Iš gautų rezultatų matyti, jog sijos A-4 atveju išankstinio apgniuždymo jėgos ekscentriciteto keitimas sumažina suminį lenkimo momentą B atramoje 12,19 %, o tarpatramio viduryje – 21,55 %.



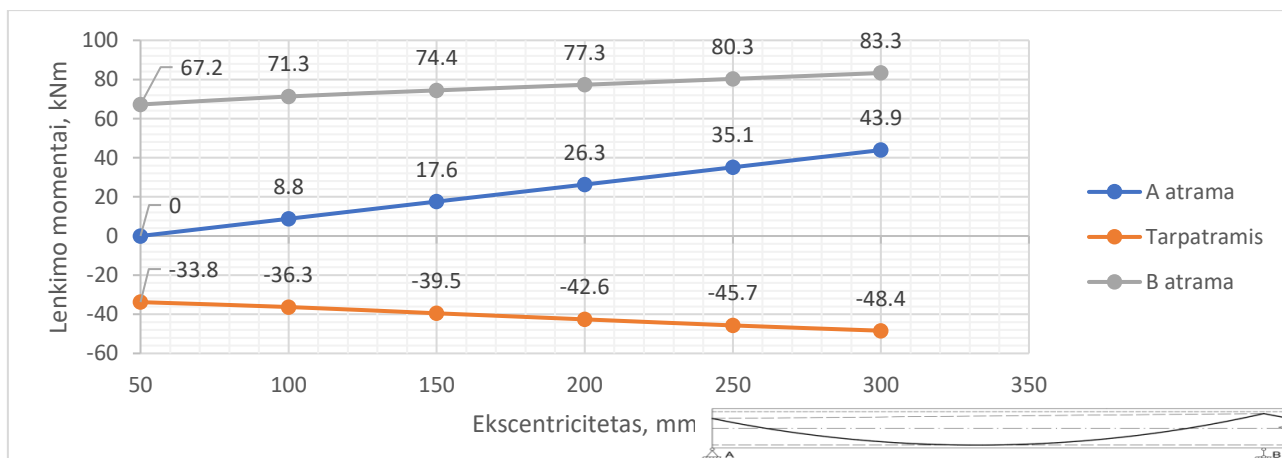
2.27 pav. Sijos A-5 lenkimo momentų kitimas (tik nuo išankstinio apgniuždymo) keičiant išankstinio apgniuždymo jėgos ekscentricitetą

Analizuojami 2.27 paveiksle parodyti sijos A-5 gauti lenkimo momentų nuo išankstinio apgniuždymo rezultatai. Šios sijos A-5 atveju išankstinio apgniuždymo jėgos ekscentricitetas keičiamas tik A atramoje nuo 50 mm iki 300 mm. Iš gautų rezultatų matyti, jog rezultatai B atramoje ir tarpatriamio viduryje pakito labai mažai. B atramoje lenkimo momentas nuo išankstinio apgniuždymo sumažėjo 11,68 %, o tarpatriamio viduryje padidėjo 12,82 %. Didžiausias rezultatų pokytis gautas A atramoje, kurioje lenkimo momentas nuo išankstinio apgniuždymo padidėjo 83,25 %.



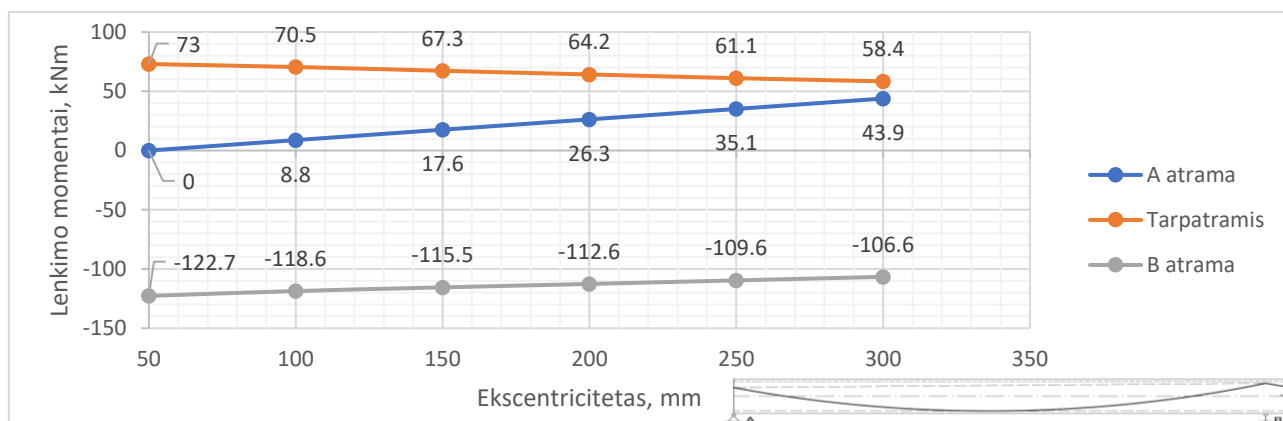
2.28 pav. Sijos A-5 lenkimo momentų kitimas (suminis lenkimo momentas) keičiant išankstinio apgniuždymo jėgos ekscentricitetą

Nagrinėjami 2.28 paveiksle parodyti suminio lenkimo momento rezultatai, gauti keičiant sijos A-5 išankstinio apgniuždymo jėgos ekscentricitetą. Kaip ir visuose prieš tai sijų variantuose A atramoje rezultatai nesikeičia, dėl išorinės apkrovos, kuri lygi nuliui A atramoje. Analizuojant rezultatus B atramoje ir tarpatriamio viduryje matyti, jog lenkimo momentų nuo išankstinio apgniuždymo kitimas dėl armatūros padėties labai mažas. B atramoje suminis lenkimo momentas sumažėjo 2,82 %, o tarpatriamio viduryje padidėjo – 2,57 %.



2.29 pav. Sijos A-6 lenkimo momentų kitimas (tik nuo išankstinio apgniuždymo) keičiant išankstinio apgniuždymo jėgos ekscentricitetą

Nagrinėjamas sijos A-6 armatūros išdėstymas, kuris šiuo atveju B atramoje pakeltas aukščiau per 50 mm, nei A atramoje (žr. 2.29 pav.). Sijos A-6 atveju išankstinio apgniuždymo jėgos ekscentricitetas buvo keičiamas nuo 50 mm iki 300 mm. Analizuojant 2.29 paveiksle pateiktus rezultatus pastebima, jog pakeitus sijos A-6 išankstinio apgniuždymo jėgos ekscentriciteto reikšmes lenkimo momentai nuo išankstinio apgniuždymo A atramoje padidėjo 79,95 %, B atramoje – 30,16 %, o tarpatriamio viduryje – 19,45 %. Iš gautų rezultatų matyti, jog sijos A-6 atveju didžiausią įtaką išankstinio apgniuždymo jėgos ekscentriciteto keitimas turi lenkimo momentui nuo išankstinio apgniuždymo A atramoje.



2.30 pav. Sijos A-6 lenkimo momentų kitimas (suminis lenkimo momentas) keičiant išankstinio apgniuždymo jėgos ekscentricitetą

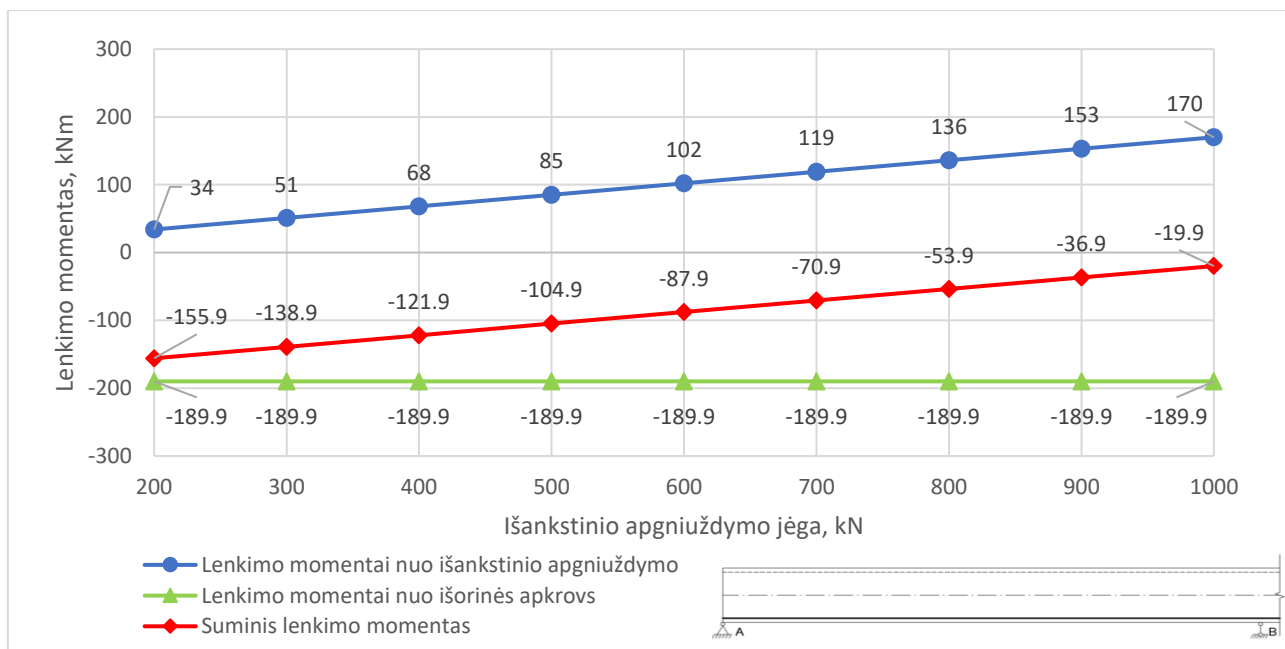
Analizuojant 2.30 paveiksle pateiktus suminius lenkimo momentų rezultatus, nuo keičiamo išankstinio apgniuždymo jėgos ekscentriciteto, pastebima, jog A atramoje rezultatai nesikeičia nuo 2.29 paveikslo rezultatų, kadangi išorinė apkrova A atramoje nesudaro lenkimo momento. Iš gautų rezultatų matyti, jog sijos A-6 atveju išankstinio apgniuždymo jėgos ekscentriciteto keitimas sumažina suminį lenkimo momentą B atramoje 13,12 %, o tarpatriamio viduryje – 20 %.

Apibendrinant visų šešių sijų (nuo A-1 iki A-6) gautus rezultatus (žr. 2.19 pav. – 2.30 pav.) galima pastebėti, jog vieniems atvejams išankstinio apgniuždymo jėgos ekscentriciteto keitimas turi didesnę įtaką lenkimo momentų pasikeitimui nei kitiems variantams. Nagrinėjant lenkimo momentus sukeltus tik nuo išankstinio apgniuždymo, išankstinio apgniuždymo jėgos ekscentriciteto keitimas didžiausią įtaką turi sijos A-1 ir sijos A-2 atvejams. Rezultatai pasikeitė apytiksliai 85 %. Mažiausią įtaką išankstinio apgniuždymo jėgos ekscentriciteto keitimas turi sijos A-5 ir sijos A-6 atvejams, kurių rezultatai apytiksliai pasikeitė nuo 12 % iki 19 %. Analizuojant suminių lenkimo momentų rezultatus pastebima, jog išankstinio apgniuždymo jėgos ekscentriciteto keitimas labai mažą įtaką turi sijai A-5. Šios sijos rezultatai pakinta apie 3 %. Suminiam lenkimo momentui didžiausią įtaką išankstinio apgniuždymo jėgos ekscentriciteto keitimas turi sijai A-2, kurios rezultatai pakito apytiksliai 34 %. Sijos A-3, sijos A-4 ir sijos A-6 išankstinio apgniuždymo jėgos ekscentriciteto keitimo įtaka suminiams lenkimo momentams panaši, rezultatai kinta apytiksliai nuo 12 % iki 21 %.

Išankstinio apgniuždymo jėgos įtaka lenkimo momento dydžiui

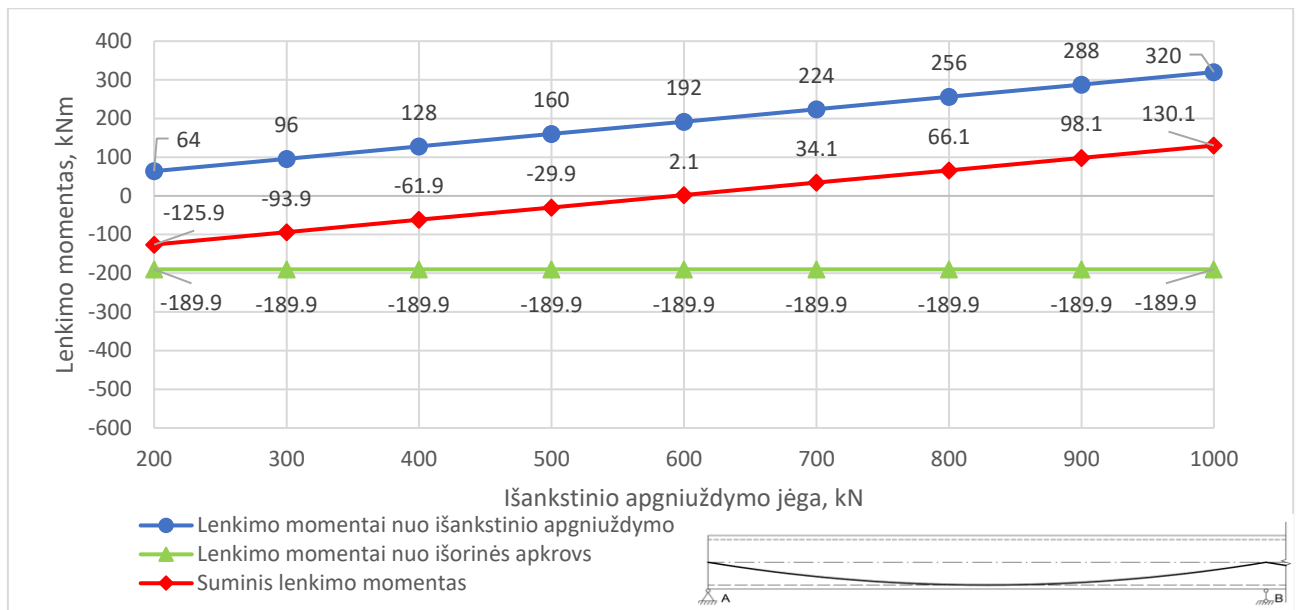
Antrasis nagrinėjamas kintamasis – išankstinio apgniuždymo jėga. Išankstinio apgniuždymo jėga buvo keičiama nuo 200 kN iki 1000 kN. Išorinė apkrova palikta tokia pati, kokia buvo prieš tai nagrinėjamosiose sijose – 25 kN/m. Nagrinėjama tik B atrama, kurios lenkimo momentus labiausiai lemia B atramoje atsiradusi priešingos krypties reakcija kraštinių atramų atžvilgiu. Bandomos tos pačios šešios sijos su skirtingomis įtemptos armatūros išdėstymo situacijomis (žr. 2.2 pav.).

2.31 paveiksle parodyti lenkimo momentų rezultatai B atramoje sijos A-1 atveju. Iš grafiko matyti, jog didinant išankstinio apgniuždymo jėgą nuo 200 kN iki 1000 kN, B atramoje didėja lenkimo momentas nuo išankstinio apgniuždymo. Susumavus išankstinio apgniuždymo rezultatus su išorinės apkrovos sukeltu lenkimo momentu gaunamas suminis lenkimo momentas. Grafike galima pamatyti, jog didinant išankstinio apgniuždymo jėgą suminis lenkimo momentas mažėja ir artėja prie teigiamo suminio lenkimo momento ir sumažėja nuo -155,9 kNm iki -19,9 kNm. Tai yra suminis lenkimo momentas sumažėjo 87,24 %.



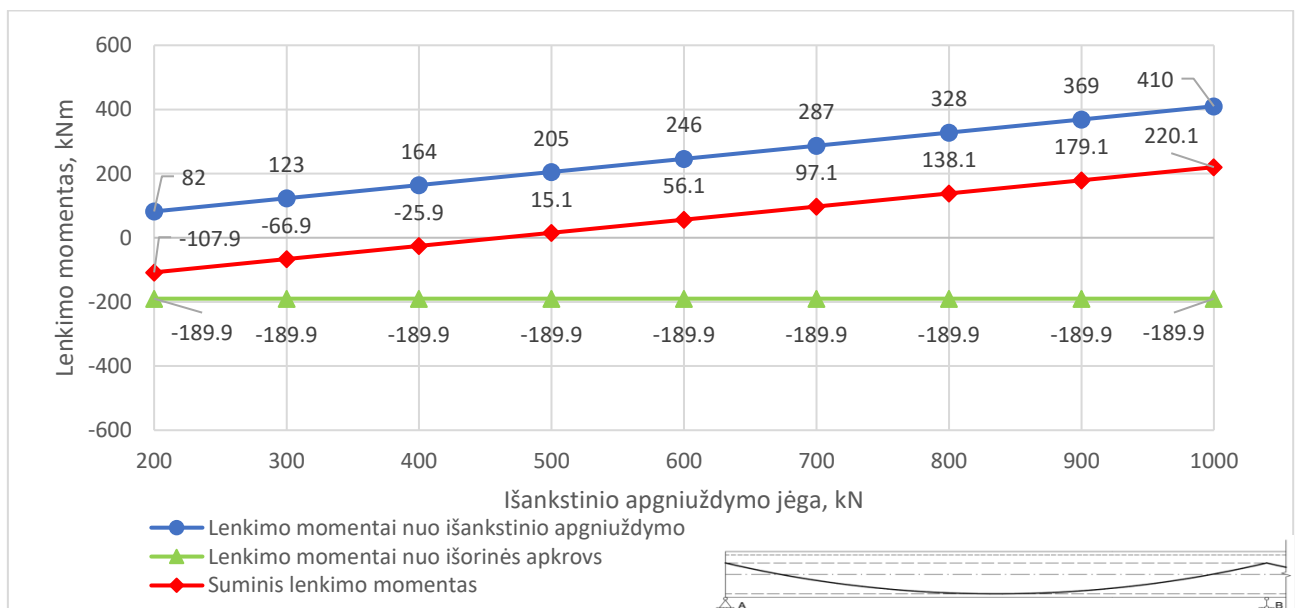
2.31 pav. Sijos A-1 lenkimo momentų kitimas B atramoje keičiant išankstinio apgniuždymo jėgą

Naudojant sijos A-2 įtemptos armatūros išdėstymo schemą gaunami 2.32 paveiksle pavaizduoti lenkimo momentai, B atramoje nuo išankstinio apgniuždymo jėgos keitimo. Iš pateiktos lenkimo momentų diagramos matyti, jog didinant išankstinio apgniuždymo jėgą nuo 200 kN iki 1000 kN, B atramoje didėja lenkimo momentas nuo išankstinio apgniuždymo. Iš grafiko matyti, jog, išankstinio apgniuždymo jėgą padidinus iki 600 kN, suminis lenkimo momentas pasidaro teigiamas, t. y. išankstinio apgniuždymo jėga panaikina išorinės apkrovos sukeltą momentą B atramoje. Pakeitus išankstinio apgniuždymo jėgą nuo 200 kN iki 1000 kN suminis lenkimo momentas padidėjo nuo -125,9 kNm iki 130,1 kNm.



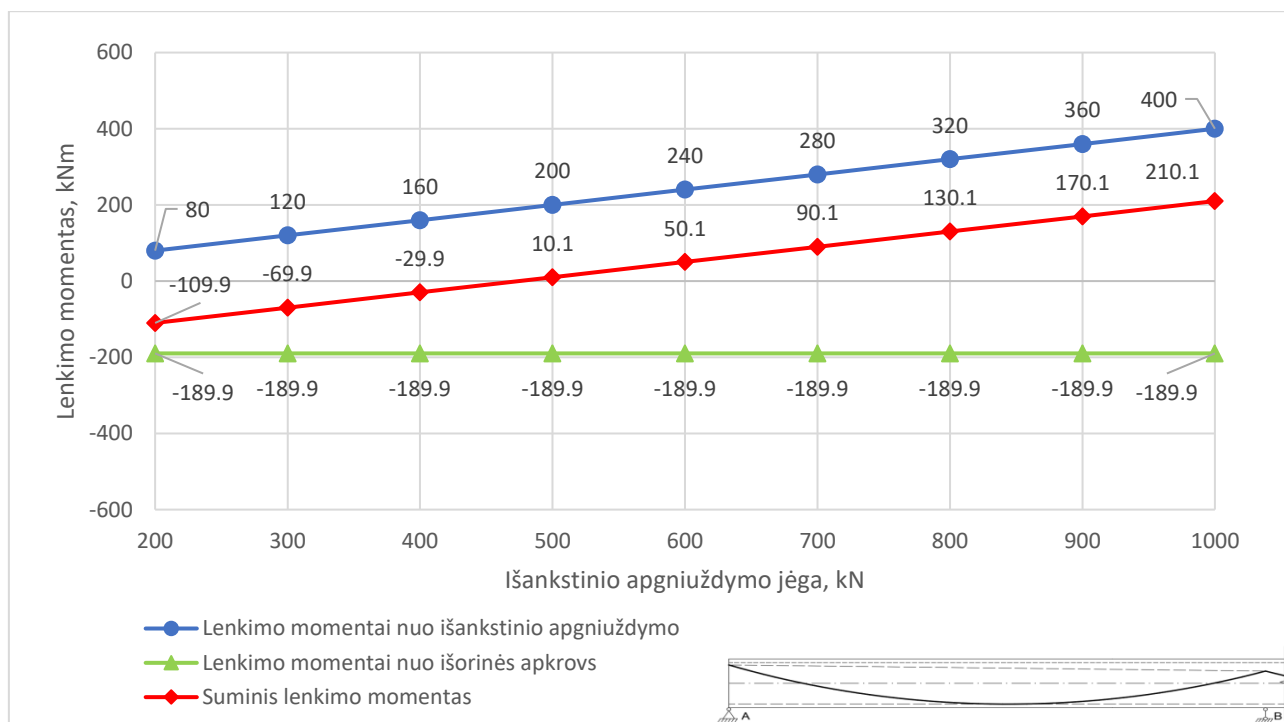
2.32 pav. Sijos A-2 lenkimo momentų kitimas B atramoje keičiant išankstinio apgniuždymo jėgą

Naudojant sijos A-3 įtemptos armatūros išdėstymo schemą gaunami 2.33 paveiksle pavaizduoti lenkimo momentai, B atramoje nuo išankstinio apgniuždymo jėgos keitimo. Iš pateiktos lenkimo momentų diagramos matyti, jog didinant išankstinio apgniuždymo jėgą nuo 200 kN iki 1000 kN, B atramoje didėja lenkimo momentas nuo išankstinio apgniuždymo, o rezultatai kinta nuo 82 kNm iki 410 kNm. Iš diagramos matyti, jog padidinus išankstinio apgniuždymo jėgą iki 500 kN, suminis lenkimo momentas pasidaro teigiamas, o tai reiškia, jog išorinės apkrovos sukeltas lenkimo momentas panaikinamas išankstinio apgniuždymo B atramoje. Taip pat iš grafiko matyti, jog suminis lenkimo momentas padidėjo nuo -107,9 kNm iki 220,1 kNm.



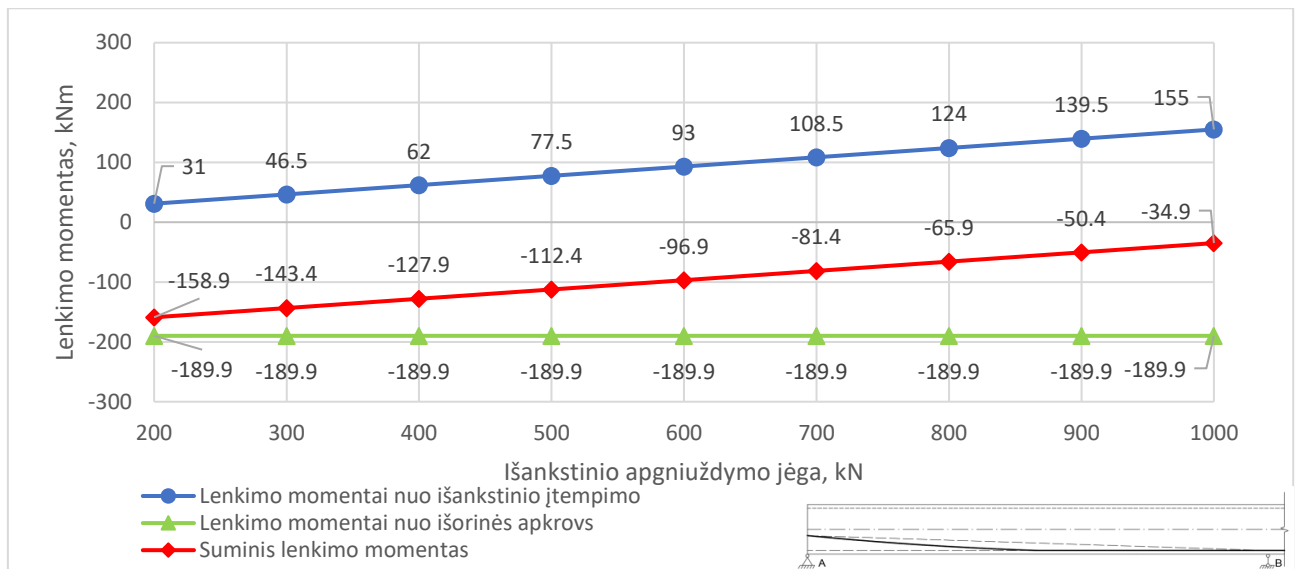
2.33 pav. Sijos A-3 lenkimo momentų kitimas B atramoje keičiant išankstinio apgniuždymo jėgą

Naudojant sijos A-4 įtemptos armatūros išdėstymo schemą gaunami 2.34 paveiksle pavaizduoti lenkimo momentai, B atramoje nuo išankstinio apgniuždymo jėgos keitimo. Iš diagramos matyti, jog didėjant išankstinio apgniuždymo jėgai, B atramoje didėja lenkimo momentas nuo išankstinio apgniuždymo, o rezultatai kinta nuo 80 kNm iki 400 kNm. Taip pat galima pamatyti (žr. 2.34 pav.), jog padidinus išankstinio apgniuždymo jėgą iki 500 kN, suminis lenkimo momentas pasidaro teigiamas. Padidinus išankstinio apgniuždymo jėgą nuo 200 kN iki 1000 kN suminis momentas padidėjo nuo -109,9 kNm iki 210,1 kNm. Iš rezultatų dar galima matyti, jog didinant išankstinio apgniuždymo jėgą šios sijos A-4 atveju buvo panaikintas išorinės apkrovos sukeltas lenkimo momentas.



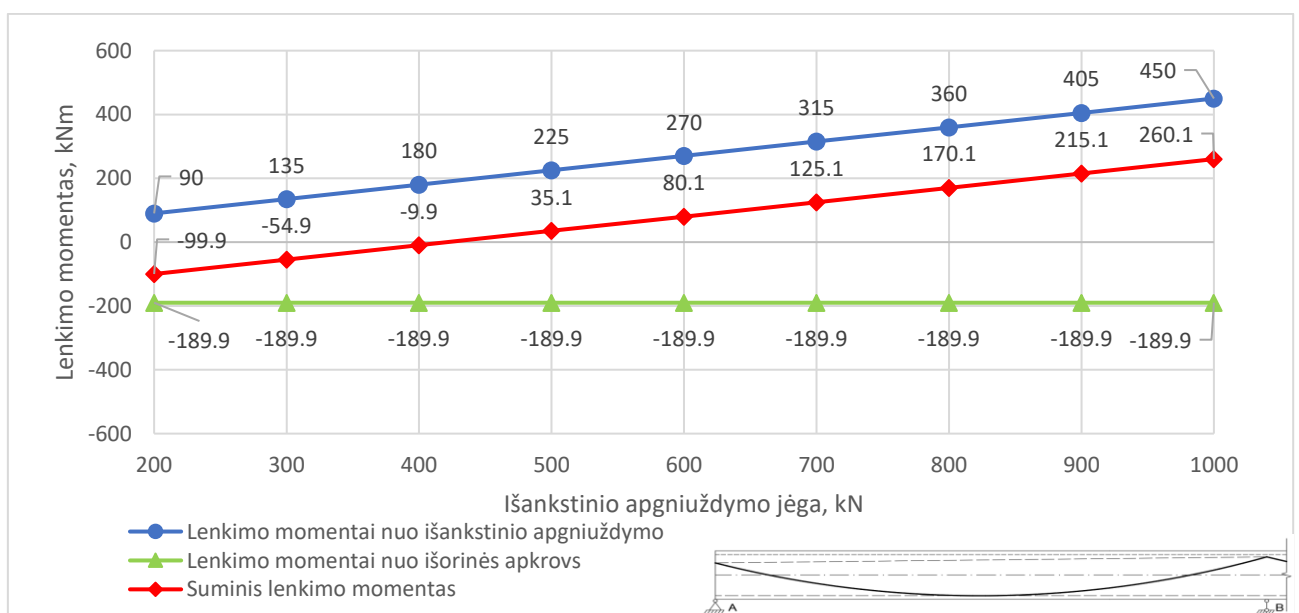
2.34 pav. Sijos A-4 lenkimo momentų kitimas B atramoje keičiant išankstinio apgniuždymo jėgą

Taikant sijos A-5 įtemptos armatūros išdėstymo schemą gaunami 2.35 paveiksle pavaizduoti lenkimo momentai, B atramoje nuo išankstinio apgniuždymo jėgos keitimo. Iš gautų rezultatų galima pamatyti, jog didinant išankstinio apgniuždymo jėgą nuo 200 kN iki 1000 kN, B atramoje didėja lenkimo momentai nuo išankstinio apgniuždymo, o rezultatai kinta nuo 31 kNm iki 155 kNm. Šis padidėjimas nėra toks ryškus kaip sijos A-3 ar sijos A-4, tačiau labai panašus kitimas kaip sijos A-1. Taip pat iš rezultatų galima matyti, jog padidinus išankstinio apgniuždymo jėgą B atramoje iki 1000 kN, lenkimo momentas artėja prie 0 kNm. Suminis lenkimo momentas sumažėja nuo -158,9 kNm iki -34,9 kNm.



2.35 pav. Sijos A-5 lenkimo momentų kitimas B atramoje keičiant išankstinio apgniuždymo jėgą

Analizuojant paskutinę siją A-6 gaunami 2.36 paveiksle parodyti lenkimo momentai, B atramoje nuo išankstinio apgniuždymo jėgos keitimo. Išankstinio apgniuždymo jėga keičiama nuo 200 kN iki 1000 kN. Iš 2.36 paveiksle pateiktų rezultatų galima pamatyti, jog didinant išankstinio apgniuždymo jėgą momentai nuo išankstinio apgniuždymo didėja, o jų rezultatai kinta nuo 90 kNm iki 450 kNm. Šios sijos A-6 įtemptos armatūros išdėstymas sukelia didžiausius lenkimo momentus B atramoje nuo išankstinio apgniuždymo jėgos kėlimo. Taip pat iš 2.36 paveiksle pateiktų rezultatų matyti, jog suminiai lenkimo momentai tampa teigiami, kai išankstinio apgniuždymo jėga pakeliama iki 500 kN. Tai reiškia, jog išankstinio apgniuždymo jėga panaikina išorinės apkrovos sukeltą lenkimo momentą B atramoje. Iš grafiko matyti, jog pakėlus išankstinio apgniuždymo jėgą nuo 200 kN iki 1000 kN suminis lenkimo momentas pasikeitė nuo -99,9 kNm iki 260,1 kNm.



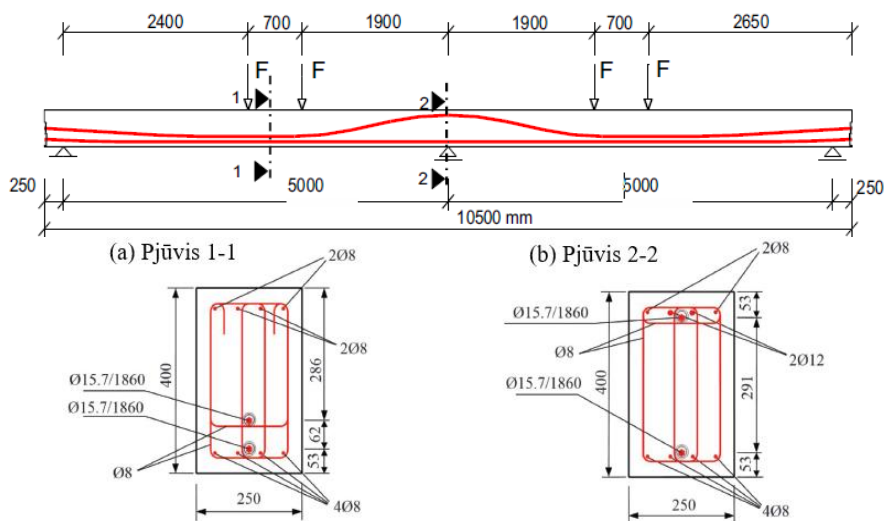
2.36 pav. Sijos A-6 lenkimo momentų kitimas B atramoje keičiant išankstinio apgniuždymo jėgą

Apibendrinant visų šešių sijų gautus rezultatus (žr. 2.31 pav. – 2.36 pav.) galima pastebėti, jog visais atvejais keliant išankstinio apgniuždymo jėgą didėja momentas nuo išankstinio apgniuždymo B atramoje. Nagrinėjant suminius lenkimo momentus matoma, jog sijos A-2, sijos A-3, sijos A-4 ir sijos A-6 atvejais suminis lenkimo momentas iš neigiamo pakyla į teigiamą, t. y. šių sijų atvejais panaikina išorinės apkrovos sukeltą lenkimo momentą, o sijos A-1 ir sijos A-5 atvejais suminis lenkimo momentas sumažėja apytiksliai iki -30 kNm. Didžiausią įtaką suminiam lenkimo momentui turi sija A-6 (žr. 2.36 pav.), kuri momentą padidina iki 260,1 kNm naudojant 1000 kN išankstinio apgniuždymo jėgą. Mažiausią įtaką suminiam lenkimo momentui turi sija A-5 (žr. 2.35 pav.), kuri sumažina lenkimo momentą iki -34,9 kNm naudojant 1000 kN išankstinio apgniuždymo jėgą. Ši parametrinė analizė parodo, jog skirtingai išdėstyta armatūra sijoje reikia skirtingų išankstinio apgniuždymo jėgų norint panaikinti išorinės apkrovos sukeltą lenkimo momentą. Tai yra vieniems variantams užtenka pakelti išankstinio apgniuždymo jėgą iki 500 kN ir išorinės apkrovos sukeltas momentas yra panaikinamas B atramoje, o kitiems variantams neužtenka padidinti išankstinio apgniuždymo jėgos iki 1000 kN, jog būtų panaikintas išorinės apkrovos sukeltas momentas.

2.4. Analitinių ir eksperimentinių rezultatų palyginimas

Tiriamos konstrukcijos aprašymas

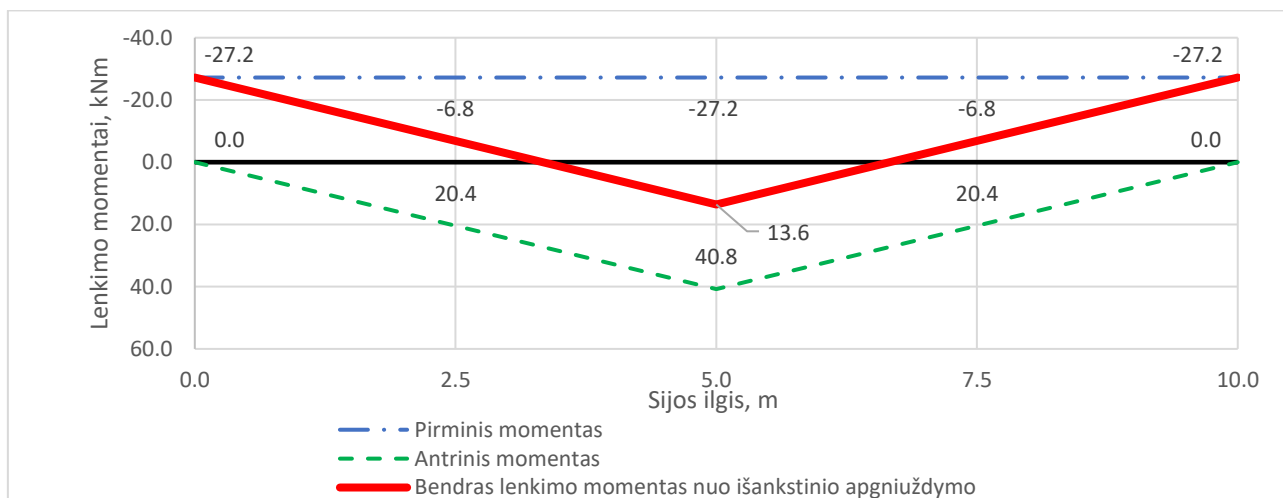
Atliktas analitinis Halvonik'o et al. eksperimentinio tyrimo metu bandytos sijos skaičiavimas, taikant kampų pasisukimų metodą. Šios analizės tikslas buvo patikrinti ar sutampa teorinių skaičiavimų gaunami rezultatai su eksperimentinio tyrimo metu gautais rezultatais. Analizuojamos sijos skerspjūvio matmenys $h=400$ mm ir $b=250$ mm, o tarpatramių ilgiai po 5 m, viso bendras ilgis 10 m. Sija armuota paprasta armatūra ir dviem iš anksto įtemptais lynais, kurių skersmuo 15,7 mm, o betono klasė C40/50. Išankstinio apgniuždymo jėga 200 kN. Sijos skaičiuotinė schema pateikta 2.37 paveiksle.



2.37 pav. Analizuojamos sijos skaičiuotinė schema ir pjūviai 1-1 ir 2-2 (Halvonik et al, 2018)

Sijos analitiniai skaičiavimai

Pagal eksperimento autorius antras lyno išdėstymas, kuris pakyla vidurinėje atramoje į viršų, sukelia minimalų antrinį momentą, todėl jis skaičiavimuose nevertinamas. 2.38 paveiksle parodyti sijos analitinių skaičiavimų rezultatai, apskaičiuoti kampų pasisukimo metodu. Iš grafiko galima pamatyti, jog pirminis momentas per elemento ilgį pasiskirsto vienodai ir sukelia -27,2 kNm pirminį momentą. Antrinis momentas nuo vidurinės atramos iki kraštinės atramos mažėja nuo 40,8 kNm iki 0 kNm. Susumavus pirminį ir antrinį momentus gaunama bendra lenkimo momentų diagrama nuo išankstinio apgniuždymo. Iš pateiktų 2.38 paveiksle rezultatų matyti, kad gauti bendri lenkimo momentai nuo išankstinio apgniuždymo kraštinėje atramoje yra lygūs -27,2 kNm, tarpatramio viduryje – lygūs -6,8 kNm, o vidurinėje atramoje – lygūs 13,6 kNm.

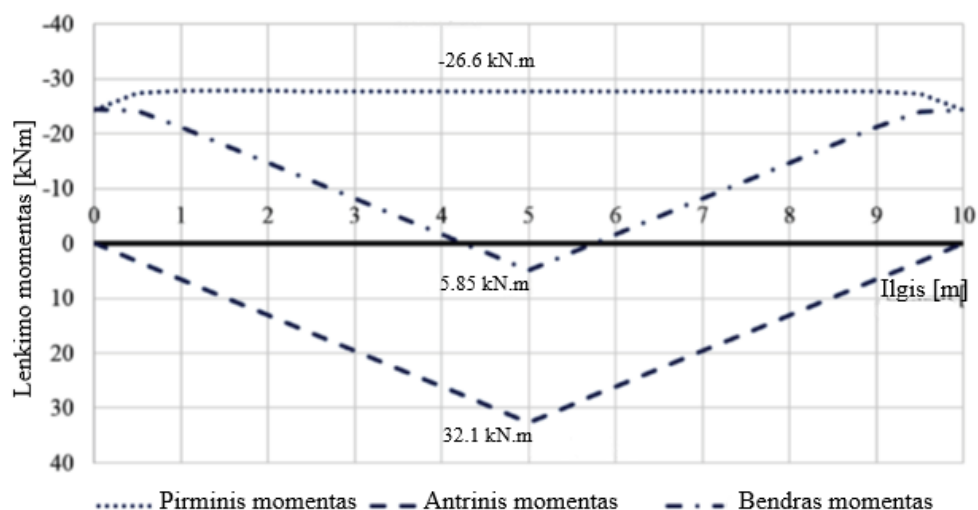


2.38 pav. Analitiniais skaičiavimai gauti lenkimo momentai tik nuo išankstinio apgniuždymo

Taip pat pasinaudojant medžiagų mechanikos formulėmis apskaičiuojami lenkimo momentai nuo išorinės apkrovos. Išorinės apkrovos išdėstymo schema pavaizduota 2.37 paveiksle. Išorinė apkrova keliama palaipsniui iki kol pasiekia 210 kN jėgą. Atlikus skaičiavimus gaunami tokie lenkimo momentai nuo išorinės apkrovos: kraštinėje atramoje lenkimo momentas lygus 0 kNm, tarpatramio viduryje lenkimo momentas lygus 162,5 kNm ir vidurinėje atramoje lenkimo momentas lygus -242,0 kNm.

Halvonik'o et al. eksperimento rezultatai

2.39 paveiksle pavaizduoti Halvonik'o et al. eksperimentinio tyrimo metu gauti lenkimo momentai nuo išankstinio apgniuždymo. Nagrinėjant 2.39 paveiksle pateiktus lenkimo momentų rezultatus pastebima, jog išankstinis apgniuždymas sijoje sukelia -26,6 kNm pirminius momentus, kurie per sijos ilgį pasiskirsto vienodai. Taip pat grafike pateikiami antriniai momentai, kurie nuo kraštinės atramos iki vidurinės atramos didėja nuo 0 kNm iki 32,1 kNm. Iš pateiktų 2.39 paveiksle rezultatų matyti, kad gauti bendri lenkimo momentai nuo išankstinio apgniuždymo kraštinėje atramoje yra lygūs -25 kNm, tarpatramio viduryje – lygūs -10,38 kNm, o vidurinėje atramoje – lygūs 5,85 kNm.

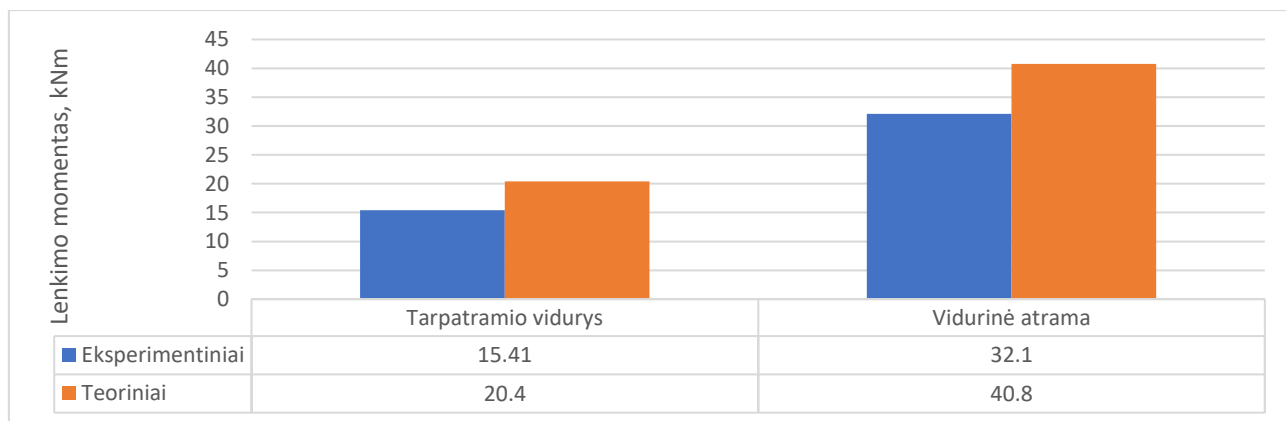


2.39 pav. Halvonik et al. eksperimentinio tyrimo metu gauti lenkimo momentai tik nuo išankstinio apgniuždymo (Halvonik et al, 2018)

Halvonik'o et al. eksperimentinio tyrimo metu taip pat buvo gauti lenkimo momentai tik nuo veikiančios išorinės apkrovos. Atlikus eksperimentinį tyrimą autoriai gavo tokius lenkimo momentus nuo išorinės apkrovos: kraštinėje atramoje lenkimo momentas lygus 0 kNm, tarpatramio viduryje lenkimo momentas lygus 174,9 kNm ir vidurinėje atramoje lenkimo momentas lygus -200,9 kNm.

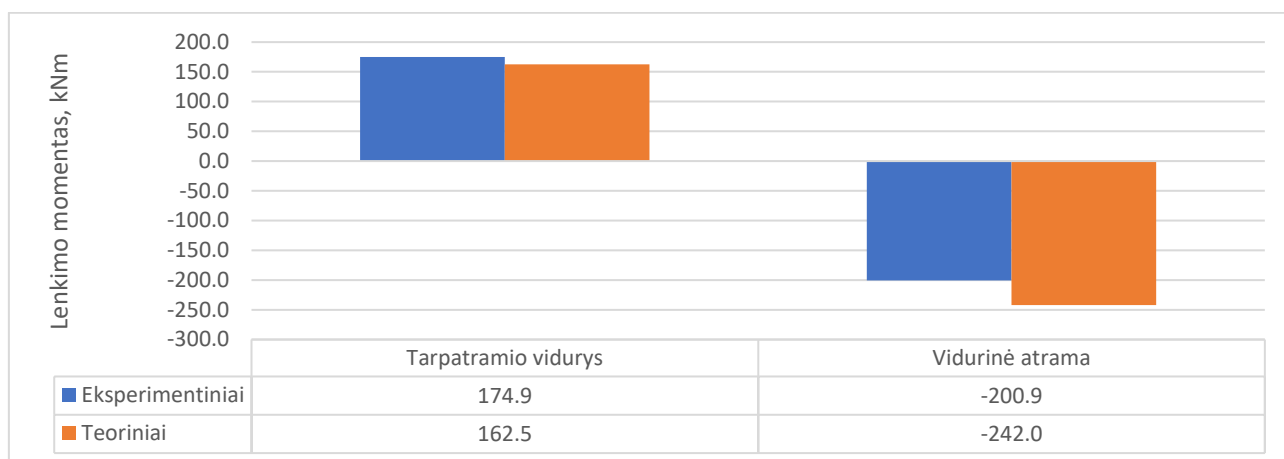
Rezultatų palyginimas

Nagrinėjant 2.40 paveiksle pateiktus antrinius momentus, gautus Halvonik'o et al. eksperimentinio tyrimo metu ir apskaičiuotus analitiniu būdu, pastebima, jog rezultatai nesutampa tarpatramio viduryje ir vidurinėje atramoje. Tarpatramio viduryje antrinis momentas eksperimentinio tyrimo metu gautas 15,41 kNm, o apskaičiavus pagal kampų pasisukimo metodą gautas antrinis momentas lygus 20,4 kNm. Tarpatramio viduryje antrinių momentų rezultatai skiriasi 24,4 %. Vidurinėje atramoje antrinis momentas eksperimentinio tyrimo metu gautas 32,1 kNm, o apskaičiavus pagal kampų pasisukimo metodą gautas antrinis momentas lygus 40,8 kNm. Antrinių momentų rezultatų skirtumas vidurinėje atramoje 21,3 %. Skirtumą tarp rezultatų gali įtakoti lenkimo momentų persiskirstymas atliekant eksperimentą.



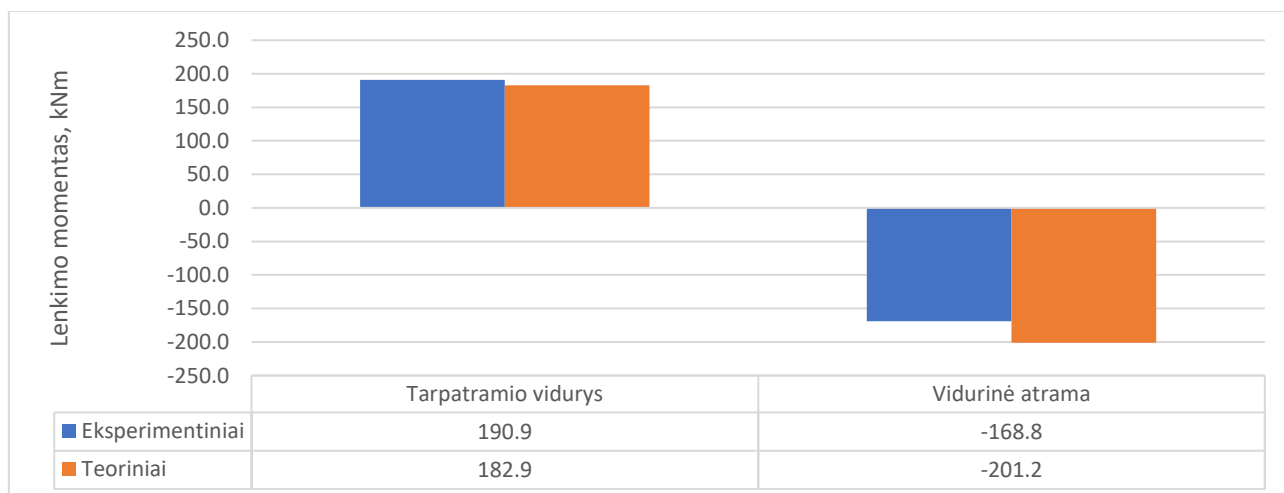
2.40 pav. Halvonik et al. eksperimento ir apskaičiuoti analitiniu būdu antriniai momentai

Analizuojant 2.41 paveiksle pateiktus lenkimo momentus nuo išorinės apkrovos, gautus Halvonik'o et al. eksperimentinio tyrimo metu ir apskaičiuotus pagal išvestas mechanikos formules, pastebima, jog lenkimo momentai nuo išorinės apkrovos skiriasi tarpatramio viduryje ir vidurinėje atramoje. Tarpatramio viduryje skirtumas tarp lenkimo momentų nuo išorinės apkrovos 7,1 %, o vidurinėje atramoje skirtumas tarp lenkimo momentų nuo išorinės apkrovos siekia 17 %. Šių rezultatų skirtumą taip pat gali įtakoti lenkimo momentų persiskirstymas atliekant eksperimentinį tyrimą, kadangi sija buvo bandoma iki suirimo.



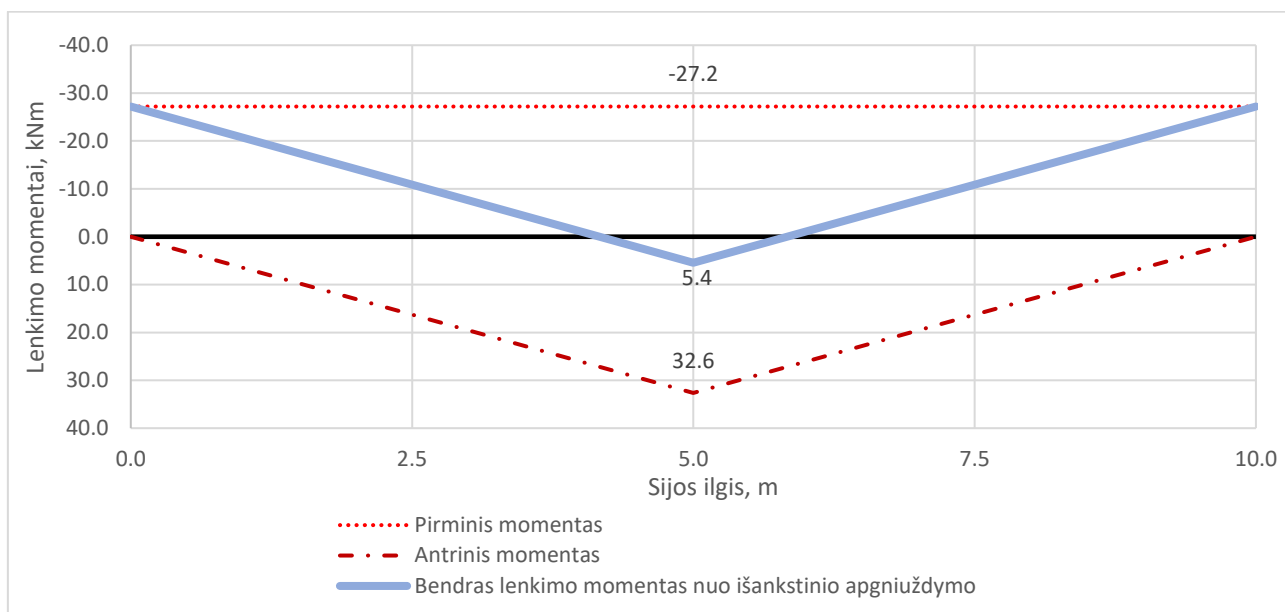
2.41 pav. Halvonik et al. eksperimento ir apskaičiuoti analitiniu būdu išorinės apkrovos sukelti lenkimo momentai

Taip pat lyginami rezultatai susumuojant išorinės apkrovos sukeltus lenkimo momentus su antriniais momentais, rezultatai pateikiami 2.42 paveiksle. Analizuojant 2.42 paveiksle pateiktus rezultatus galima pamatyti, jog Halvonik'o et al. eksperimentinio tyrimu metu gauti suminiai lenkimo momentų rezultatai tarpatramio viduryje skiriasi nuo analitiniu būdu gautų suminių lenkimo momentų 4,2 %, o vidurinėje atramoje suminių lenkimo momentų rezultatų skirtumas siekia 16,1 %.



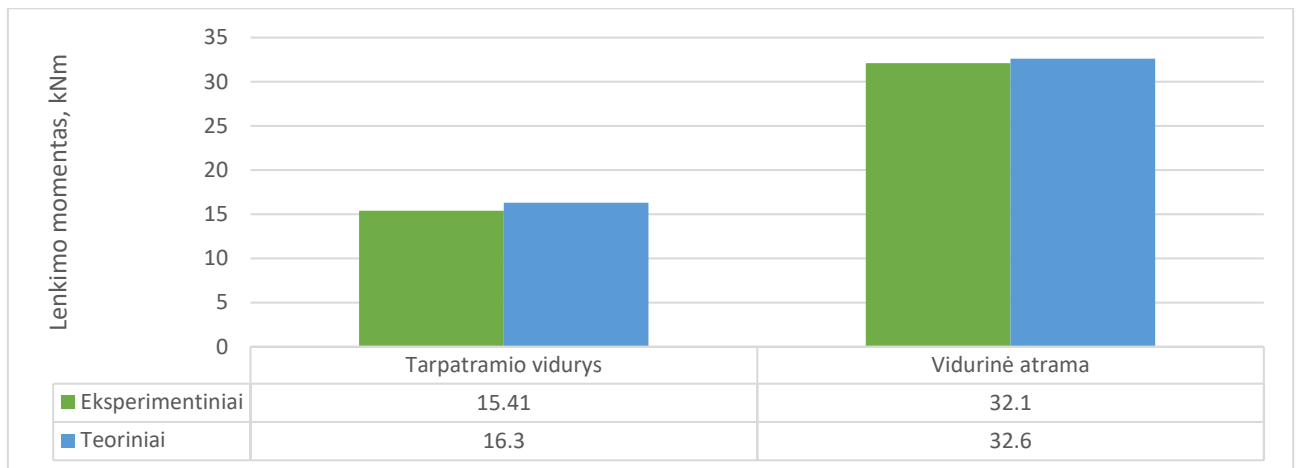
2.42 pav. Halvonik et al. eksperimento ir apskaičiuoti analitiniu būdu gauti suminiai lenkimo momentai

Apibendrinant rezultatus, gautus analitiniais skaičiavimais ir Halvonik'o et al. eksperimentinio tyrimo metu, (žr. 2.40 pav. – 2.42 pav.) galima pastebėti, jog rezultatai nesutampa lyginant antrinius momentus, išorinės apkrovos sukeltus momentus, bei suminius lenkimo momentus. Tai gali turėti įtakos eksperimentinio tyrimo metu įvykstantis lenkimo momentų persiskirstymas, kuris atsiranda dėl to, jog sija bandoma iki suirimo. Norint, kad apskaičiuoti rezultatai ir eksperimentinio tyrimo metu gauti antrinių momentų rezultatai nesiskirtų, galima įvesti α koeficientą, kurį galima naudoti kampų pasisukimo metodo išvestuose formulėse. Koeficiento α reikšmė turėtų būti priimta 0,8. Šį koeficientą galima naudoti tik tuomet, kai sijoje vyktų momentų persiskirstymas. 2.43 paveiksle parodyti sijos analitinių skaičiavimų rezultatai, apskaičiuoti kampų pasisukimo metodu ir įvedus koeficientą α , tik nuo išankstinio apgniuždymo.



2.43 pav. Analitiniais skaičiavimais gauti lenkimo momentai tik nuo išankstinio apgniuždymo įvedus koeficientą α

Gautus antrinius momentų rezultatus, su įvestu koeficientu α , galima palyginti su Halvonik'o et al. atlikto eksperimentinio tyrimo rezultatais (žr. 2.44 pav.). Analizuojant 2.44 paveiksle pateiktus rezultatus galima pamatyti, jog rezultatai minimaliai skiriasi. Tarpatramio viduryje antrinis momentas eksperimentinio tyrimo metu gautas 15,41 kNm, o apskaičiavus pagal kampų pasisukimų metodą ir įvedus į jį koeficientą α gautas antrinis momentas lygus 16,3 kNm. Rezultatai skiriasi 5,4 %. Taip pat nagrinėjant 2.44 paveiksle pateiktus rezultatus galima pastebėti, jog vidurinėje atramoje eksperimentinio tyrimo metu gautas antrinis momentas lygus 32,1 kNm. Apskaičiavus antrinį momentą, vidurinėje atramoje, pagal kampų pasisukimo metodą ir įvedus koeficientą α , gautas antrinis momentas lygus 32,6 kNm. Vidurinės atramos antrinių momentų skirtumas siekia 1,53 %. Skirtumą tarp rezultatų gali lemti išankstinio įtempimo jėgos nuostoliai.



2.44 pav. Halvonik et al. eksperimento ir apskaičiuoti analitiniu būdu bei įvertinus koeficientą α gauti antriniai momentai

2.5. Skyriaus išvados

1. Naudojant skirtingus įtemptos armatūros padėčių variantus gaunami skirtingi pirminiai ir antriniai lenkimo momentai, dėl išankstinio apgniuždymo jėgos poveikio.
2. Trijų atramų sijoje norint sumažinti kuo daugiau lenkimo momentą vidurinėje atramoje reikia, kad iš anksto įtemptos armatūros padėtis būtų kuo aukščiau sijos viršaus atžvilgiu.
3. Išankstinio apgniuždymo jėgos ekscentricitetas skerspjūvyje turi skirtingą įtaką lenkimo momentų pasiskirstymui sijoje. Atlikus skaičiavimus gauta, kad didžiausią įtaką išankstinio apgniuždymo jėgos ekscentriciteto keitimas turi sijai A-1 ir sijai A-2, kai nagrinėjami bendri lenkimo momentai nuo išankstinio apgniuždymo. Keičiant šių sijų apgniuždymo jėgos ekscentricitetą bendri lenkimo momentai nuo išankstinio apgniuždymo pasikeitė apytiksliai 85 %.
4. Tinkamai parinkus sijos įtemptos armatūros išdėstymo schemą ir išankstinio apgniuždymo jėgą, galima efektyviai sumažinti sijoje išorinės apkrovos sukeltus lenkimo momentus.
5. Skirtingiems armatūros išdėstymo variantams sijos skerspjūvyje reikia skirtingų išankstinio apgniuždymo jėgų, kad būtų panaikintas išorinės apkrovos sukeltas lenkimo momentas.
6. Analitinių antrinių momentų apskaičiavimui naudoto kampų pasisukimo metodo rezultatai nesutapo su nagrinėto eksperimentinio tyrimo gautais antrinių momentų rezultatais. Antriniai momentai tarpatramio viduryje skyrėsi 24 %, o vidurinėje atramoje 21 %.
7. Atsižvelgiant į atliktą analizę norint, jog analitinių antrinių momentų rezultatai, naudojant kampų pasisukimo metodą, sutaptų su eksperimentinio tyrimo antriniais momentais, siūloma skaičiavimo metode taikyti pataisos koeficientą α , kuris lygus 0,8. Šiuo atveju tarpatramio viduryje antrinių momentų rezultatai, lyginant eksperimentinio tyrimo su apskaičiuotais analitiniu būdu, skiriasi 5,4 %, o vidurinėje atramoje antrinių momentų skirtumas 1,53 %.

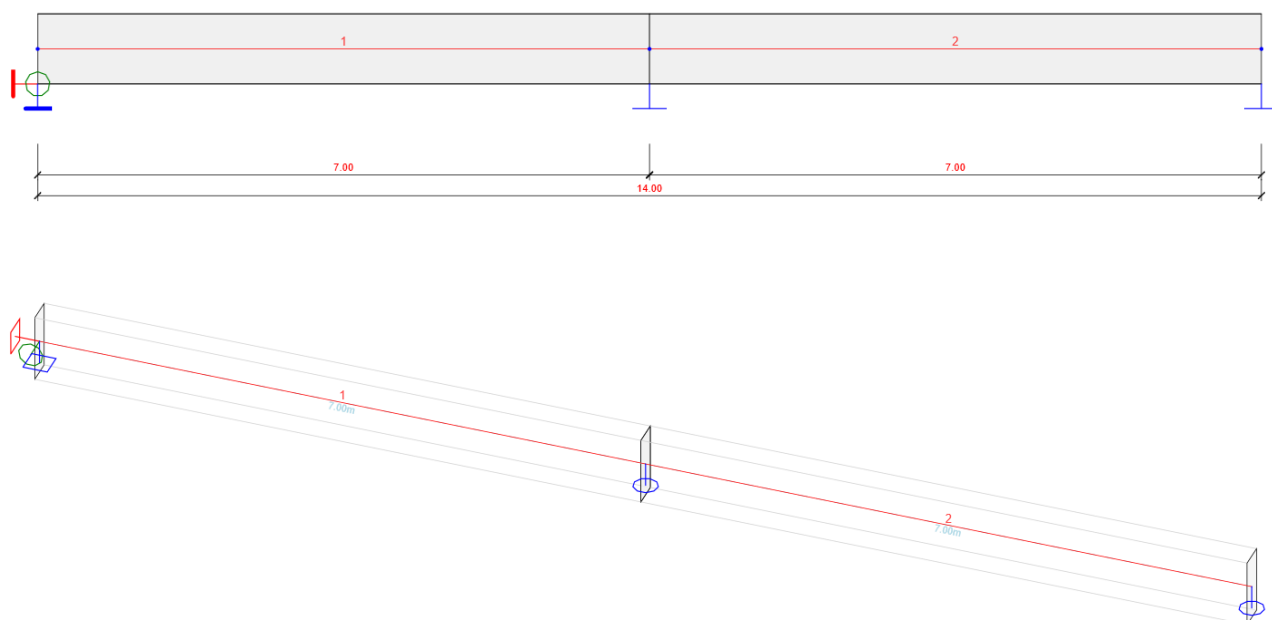
3. SKAITINĖ ANALIZĖ

Šiame skyriuje nagrinėjama iš anksto įtemptos armatūros padėties įtaka lenkimo momentų pasiskirstymui triatramėse sijose atliekant skaitinę analizę. Programine įranga buvo sudaromi ir aprašomi antrame skyriuje nagrinėtų sijų skaičiuojamieji modeliai. Atlikta modelių skaitinė analizė ir palyginti rezultatai su analitiniais skaičiavimais.

3.1. Modeliuojamų konstrukcijų aprašymas

Skaitmeninių sijų modeliai sukurti „IDEA Statica 22.1“ programine įranga, kuri leidžia tiksliai išlankstyti iš anksto įtemptą armatūrą sijos ilgyje. Sumodeliuotos šešios su iš anksto įtempta armatūra sijos, nagrinėtos antrame skyriuje. Visos šešios sijos sumodeliuotos su skirtingomis iš anksto įtemptos armatūros išdėstymo schemomis pagal 2.2 paveikslą.

Triatramių sijų modeliai sumodeliuoti trimatėje aplinkoje. Visų sijų skerspjūvio matmenys vienodi: $h=800$ mm ir $b=300$ mm, o tarpatramių ilgiai yra po 7 m ir bendras ilgis – 14 m (žr. 3.1 pav.). Išankstiniam apgniuždymui įvertinti, modelyje parinkti ir įvesti Y1860S7-15.7 išilginiai įtempti lynai, kurių parametrai parodyti 3.1 lentelėje. Betono klasė parinkta C45/55 (žr. 3.2 lentelę). Taip pat užsiduota naudojimo apkrova – 25 kN/m (žr. 3.2 pav.) ir išankstinio apgniuždymo jėga $P_0=200$ kN (žr. 3.3 pav.). Sumodeliuotų sijų skaičiuotiniai modeliai parodyti 3.4 paveiksle ir 3.5 paveiksle. Skirtingi sijų modeliai žymimi nuo A-1 iki A-6.



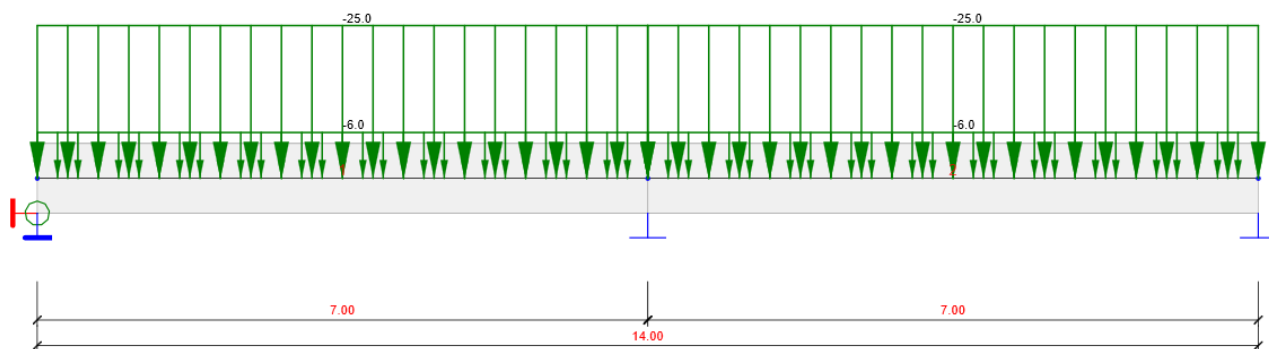
3.1 pav. Sijos 2D ir 3D modelis

3.1 lentelė. Parinktų lynų parametrai (pagal „IDEA StatiCa“)

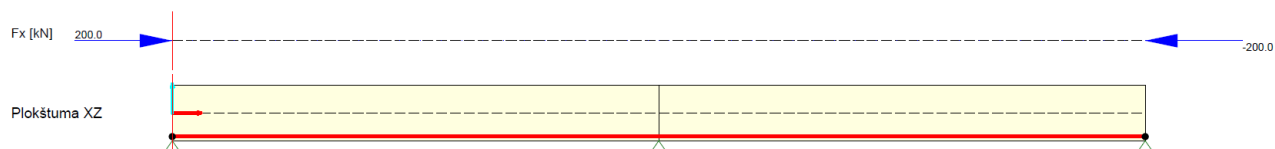
Pavadinimas	Y1860S7-15.7
Fizinės savybės	
Tūrinis svoris – m [kg/m ³]	7850
Tamprumo modulis – E [MPa]	195000
Skersmuo [mm]	16
Plotas [mm ²]	150
Gijų skaičius	7
prEN 10138	
Charakteristinė maksimali jėga – F_m [kN]	279
Charakteristinė 0,1 % jėga – F_{p01} [kN]	245.5
Bendras pailgėjimas esant didžiausiai jėgai – A_{gt} [1.00E-04]	350
Nuovargio įtempių diapazonas – F_r [MPa]	190
EN 1992-1-1	
Charakteristinis tempiamasis stipris – f_{pk} [MPa]	1860
Charakteristinė 0,1 % sąlyginė takumo riba – f_{p01k} [MPa]	1640
Charakteristinė deformacija, kai yra didžiausioji apkrova – ϵ_{uk} [1.00E-4]	350
Relaksacijos klasė	Klasė 2
Relaksacijos nuostolio reikšmė po 1000 valandų – ρ_{1000}	0.03
Relaksacijų nuostolių reikšmės po 500 000 valandų ρ_{∞}	0.06
Gamyba	Žema relaksacija
Diagramos tipas	Tampri idealiai plastinė

3.2 lentelė. Betono parametrai (pagal „IDEA StatiCa“)

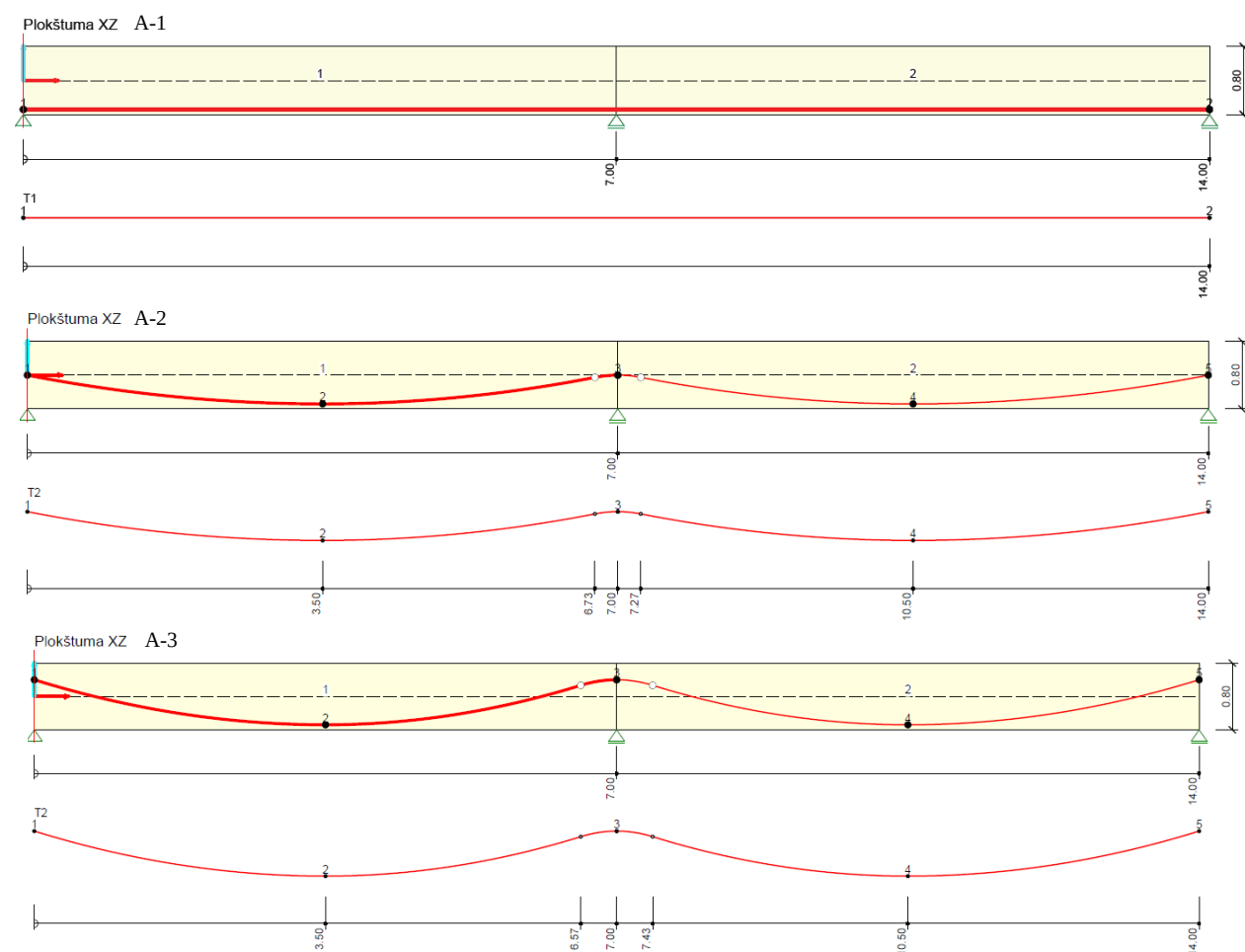
Pavadinimas	C45/55
Fizinės savybės	
Tūrinis svoris – m [kg/m ³]	2500
Puasono koeficientas – ν	0.2
Šiluminio plėtimosi koeficientas – α [1e-6/K]	10
Šilumos laidumas – λ [W/(m.K)]	0.8
Savitoji šiluminė talpa – c [kJ/(kg.K)]	0.75
EN 1992-1-1	
Charakteristinis betono gniuždomasis stipris – f_{ck} [MPa]	45
Kirstinis betono tamprumo modulis – E_{cm} [MPa]	36283.2
Šlyties modulis – G [MPa]	15118
Vidutinis betono cilindrinis gniuždomasis stipris – f_{cm} [MPa]	53
Vidutinis betono ašinis tempiamasis stipris – f_{ctm} [MPa]	3.8
Charakteristinis betono ašinis tempiamasis stipris 5% kvantilis – $f_{ctk.0.05}$ [MPa]	2.7
Charakteristinis betono ašinis tempiamasis stipris 95 % kvantilis – $f_{ctk.0.95}$ [MPa]	4.9
Betono deformacija pasiekus didžiausią stiprumą ϵ_{c2} [1.00E-04]	20
Betono ribinė gniuždymo deformacija – ϵ_{cu2} [1.00E-04]	35
Diagramos tipas	Parabolinė



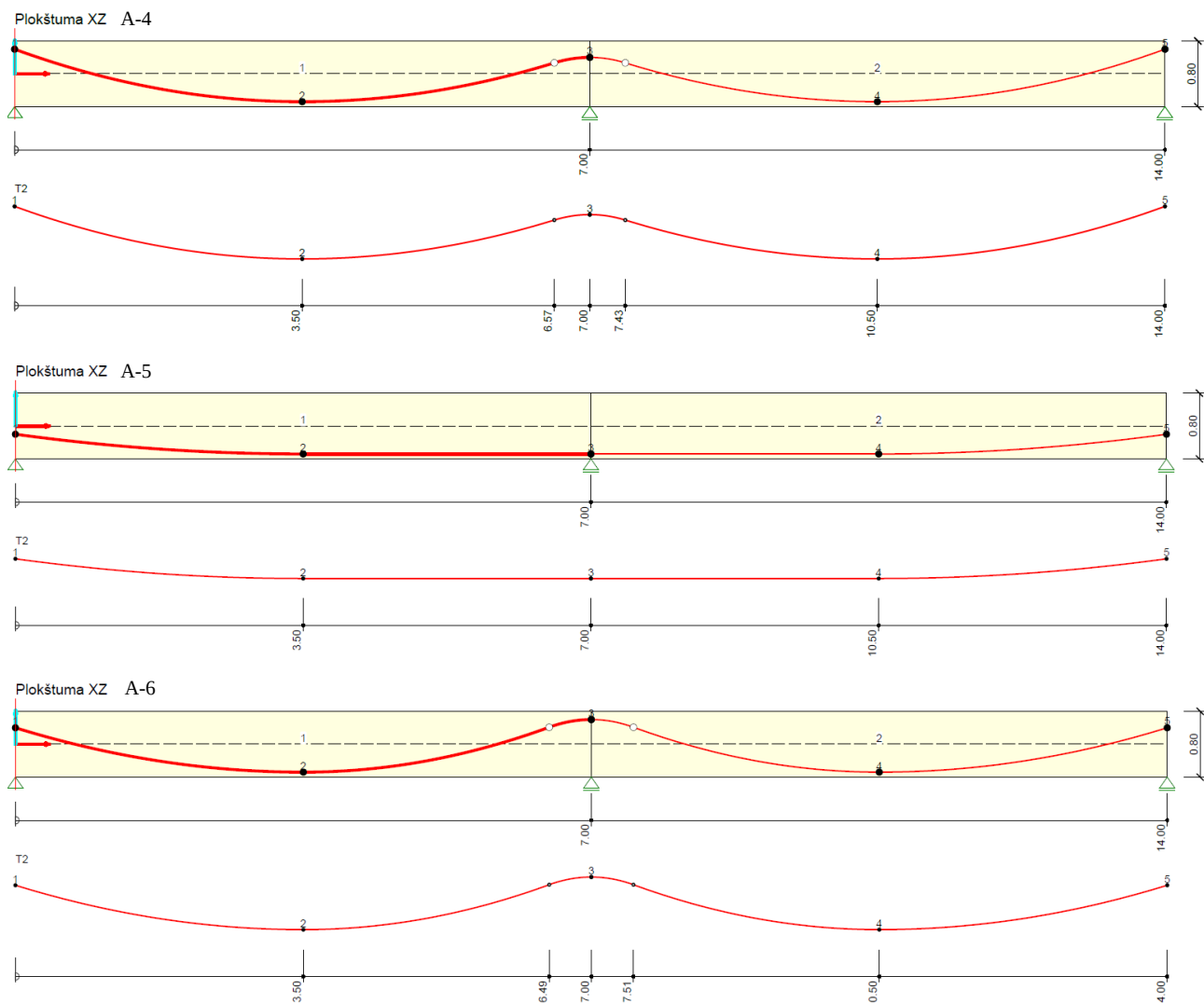
3.2 pav. Naudojimo apkrova ir savasis konstrukcijos svoris



3.3 pav. Išankstinio apgniuždymo jėga



3.4 pav. Sumodeliuotų sijų nuo A-1 iki A-3 skaičiuotiniai modeliai



3.5 pav. Sumodeliuotų sijų nuo A-4 iki A-6 skaičiuotiniai modeliai

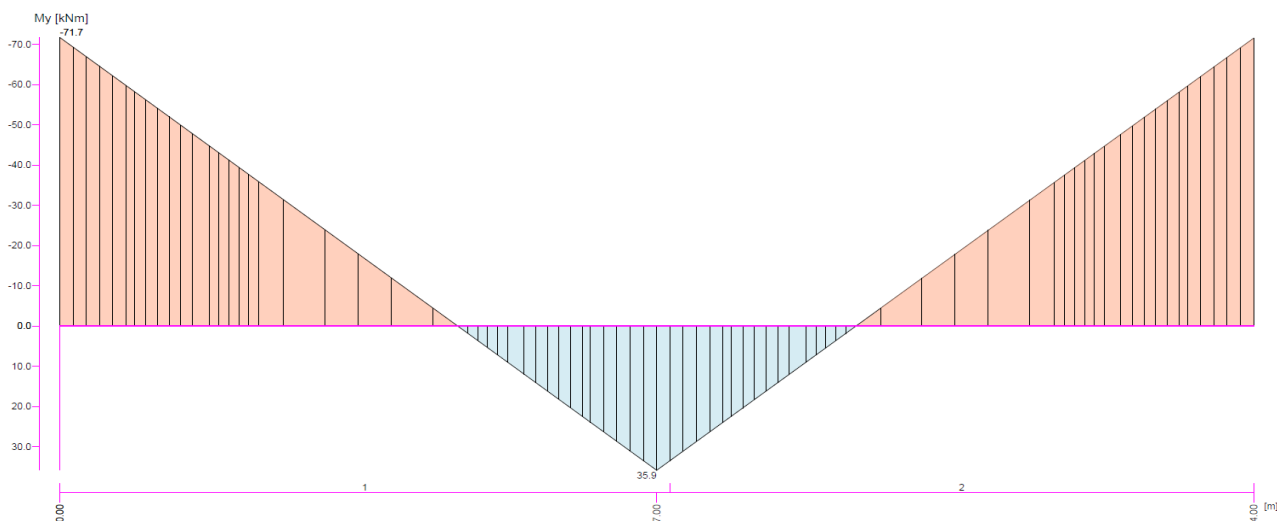
Sumodeliuotų sijų armatūrų išdėstymas

Sudarant sijos A-1 (žr. 3.4 pav.) skaičiuojamąją schemą iš anksto įtempta armatūra buvo įtvirtinta per visą sijos ilgį 60 mm atstumu nuo apatinės sijos dalies. Modeliuojant siją A-2 (žr. 3.4 pav.) atramose iš anksto įtempta armatūra buvo užfiksuota ties centro linija, o tarpatramio viduryje nuo centro linijos nuleista per 340 mm. Sija A-3 (žr. 3.4 pav.) buvo sudaryta taip, jog atramose iš anksto įtempti lynai būtų pakelti per 200 mm nuo centro linijos, o tarpatramio viduryje nuo centro linijos nuleisti į apačią per 340 mm. Modeliuojant siją A-4 (žr. 3.5 pav.) pirmoje atramoje iš anksto įtempta armatūra buvo pakelta nuo centro linijos per 300 mm, o vidurinėje atramoje nuo centro linijos per 200 mm, tarpatramio viduryje ta pati situacija, kaip ir sijos A-3 atveju. Sudarant sijos A-5 (žr. 3.5 pav.) skaičiuojamąją schemą iš anksto įtempta armatūra pirmoje atramoje nuo centro linijos buvo nuleista žemyn per 100 mm, o tarpatramio viduryje ir vidurinėje atramoje armatūra nuo sijos apačios pakelta per 60 mm. Sija A-6 (žr. 3.5 pav.) buvo sudaryta taip, jog vidurinėje atramoje iš anksto įtempta armatūra būtų pakelta nuo centro linijos per 300 mm, o pirmoje atramoje per 200 mm.

3.2. Sijų skaitinė analizė

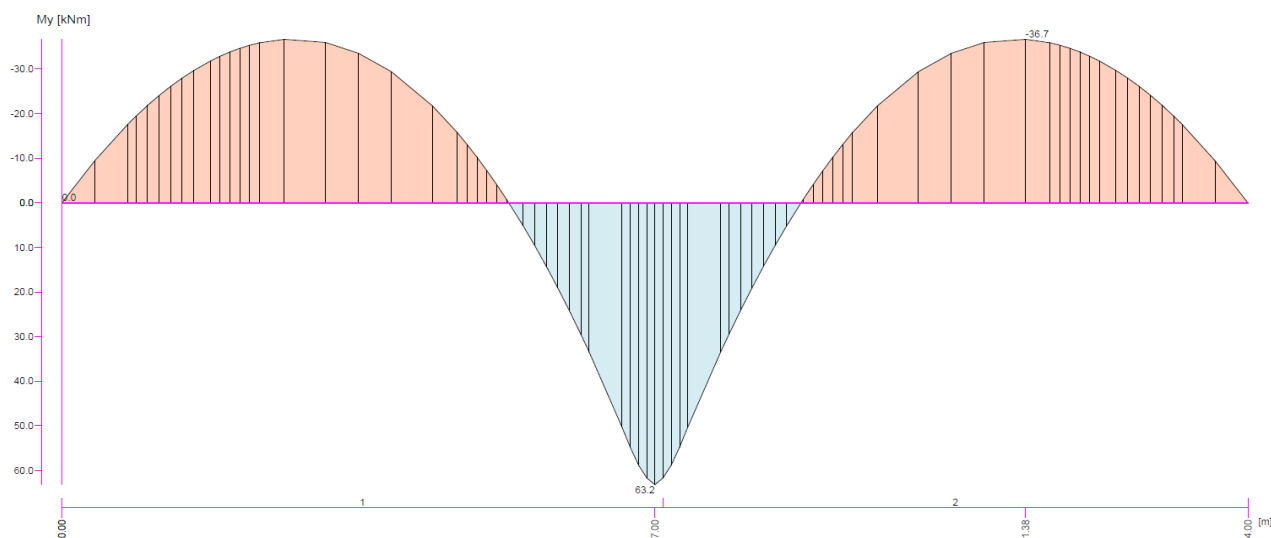
Analizė buvo atliekama tokia seka: pirmiausia programiniu paketu „IDEA StatiCa“ buvo rasti pirminiai ir antriniai momentai, bei bendras momentas nuo iš ankstinio apgniuždymo (žr. 3.6 pav. – 3.11 pav.). Tuomet buvo sukuriamas derinys, kuriame susumuojami išorinės apkrovos sukelti lenkimo momentai su nuo išankstinio apgniuždymo sukeltais lenkimo momentais, jog gauti suminius lenkimo momentus (žr. 3.12 pav. – 3.17 pav.). Pirminių ir antrinių momentų rezultatai pateikiami prieduose (žr. A Priedą).

Taikant sijos A-1 įtemptos armatūros išdėstymo schemą gaunami 3.6 paveiksle pavaizduoti bendri lenkimo momentai nuo išankstinio apgniuždymo.



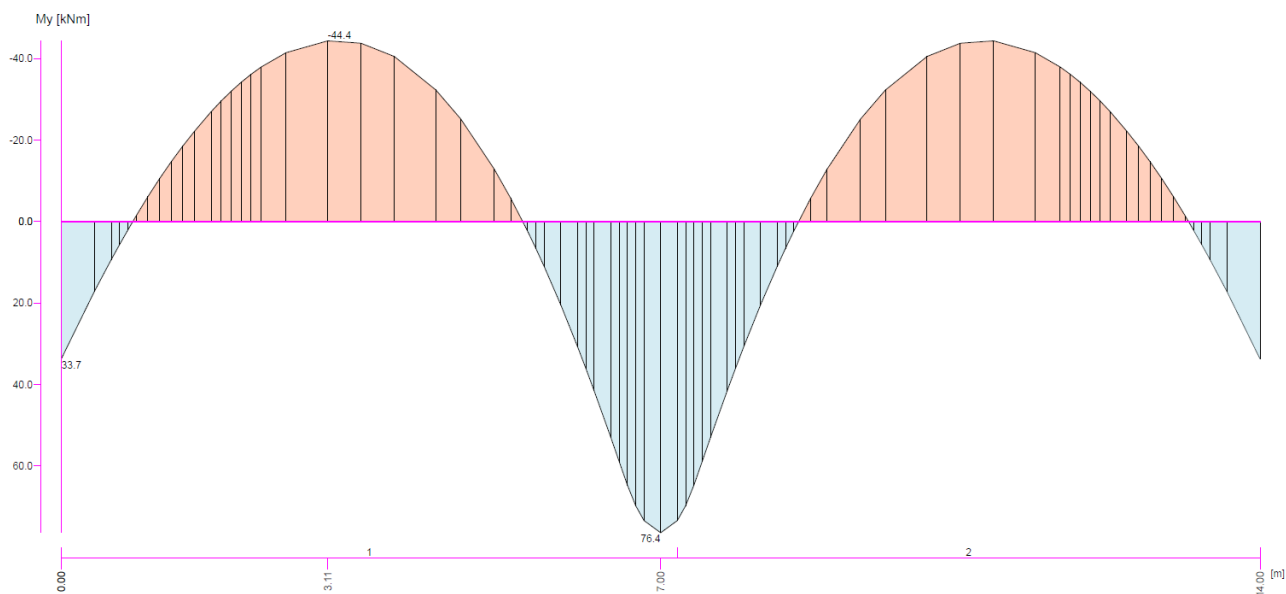
3.6 pav. Sijos A-1 bendri lenkimo momentai nuo išankstinio apgniuždymo jėgos gauti programiniu paketu „IDEA StatiCa“

Naudojant sijos A-2 iš anksto įtemptos armatūros išdėstymo schemą gaunami 3.7 paveiksle pavaizduoti bendri lenkimo momentai nuo išankstinio apgniuždymo.



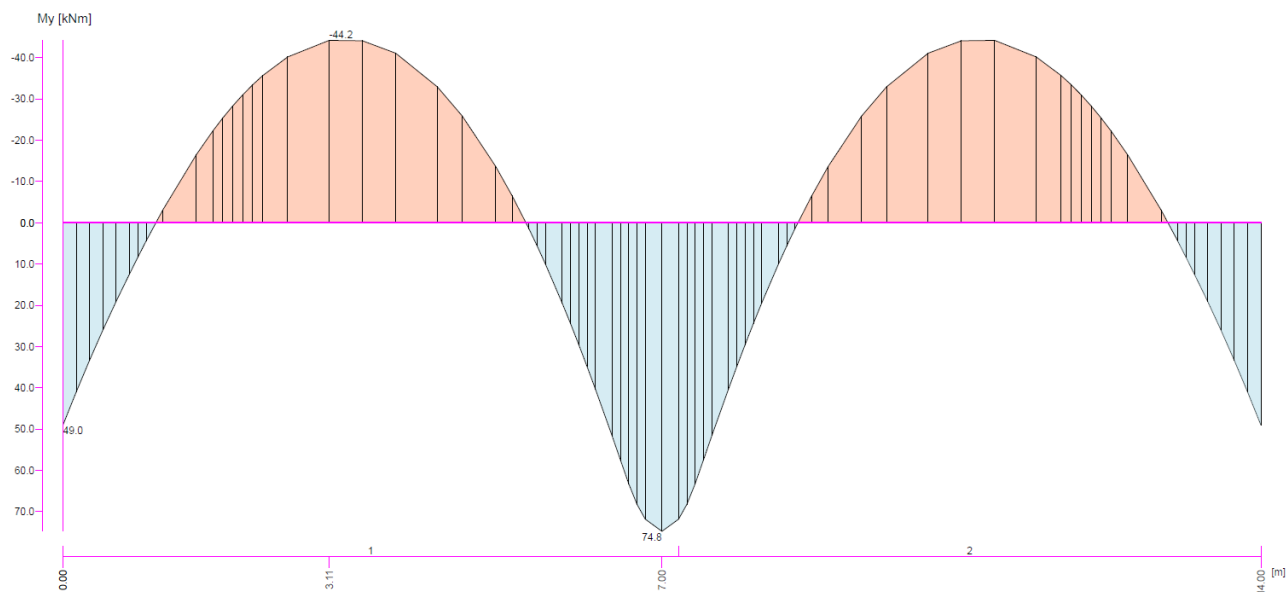
3.7 pav. Sijos A-2 bendri lenkimo momentai nuo išankstinio apgniuždymo jėgos gauti programiniu paketu „IDEA StatiCa“

Taikant sijos A-3 įtemptos armatūros išdėstymo schemą gaunami 3.8 paveiksle pavaizduoti bendri lenkimo momentai nuo išankstinio apgniuždymo.



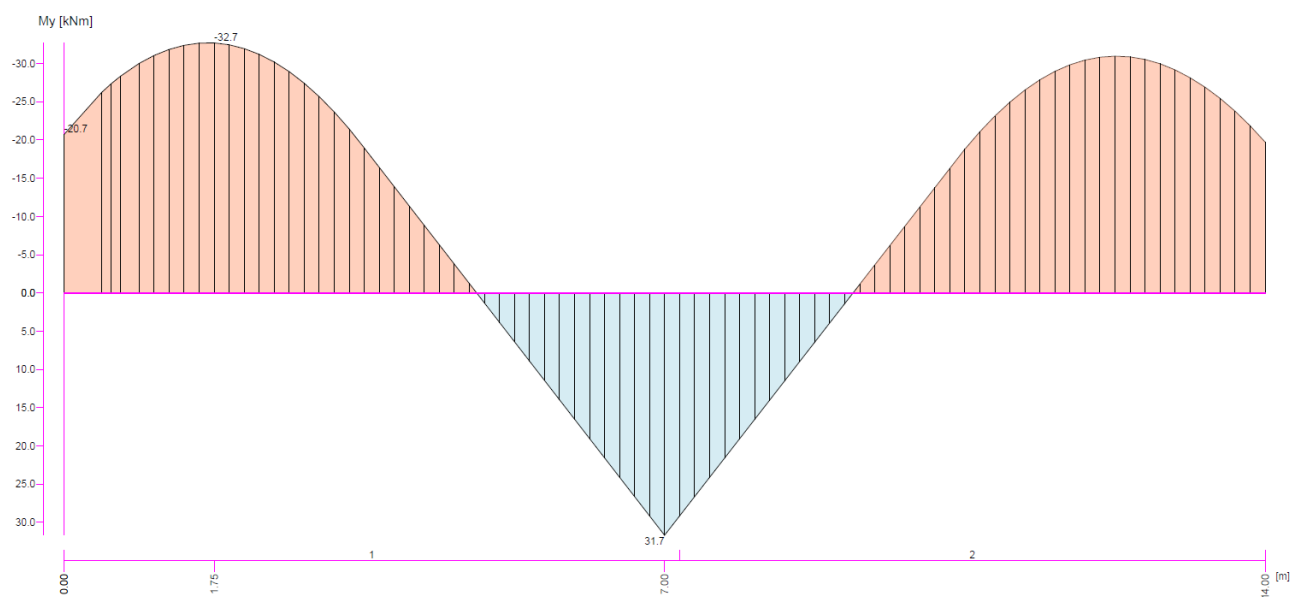
3.8 pav. Sijos A-3 bendri lenkimo momentai nuo išankstinio apgniuždymo jėgos gauti programiniu paketu „IDEA StatiCa“

Naudojant sijos A-4 iš anksto įtemptos armatūros išdėstymo schemą gaunami 3.9 paveiksle pavaizduoti bendri lenkimo momentai nuo išankstinio apgniuždymo.



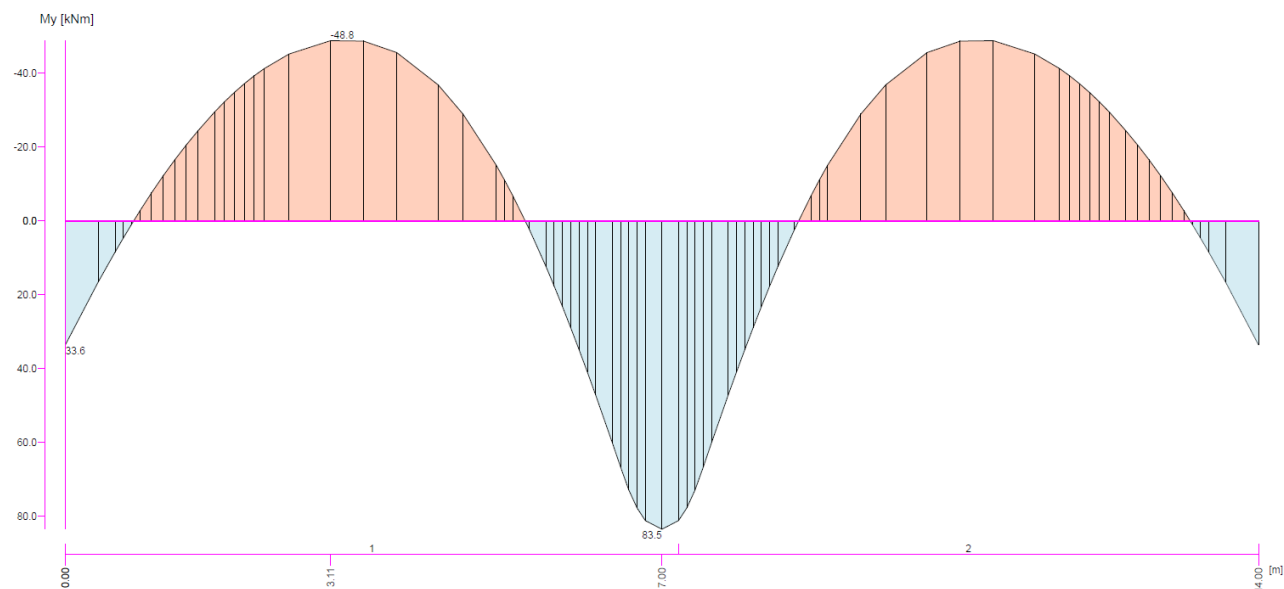
3.9 pav. Sijos A-4 bendri lenkimo momentai nuo išankstinio apgniuždymo jėgos gauti programiniu paketu „IDEA StatiCa“

Taikant sijos A-5 įtemptos armatūros išdėstymo schemą gaunami 3.10 paveiksle pavaizduoti bendri lenkimo momentai nuo išankstinio apgniuždymo.



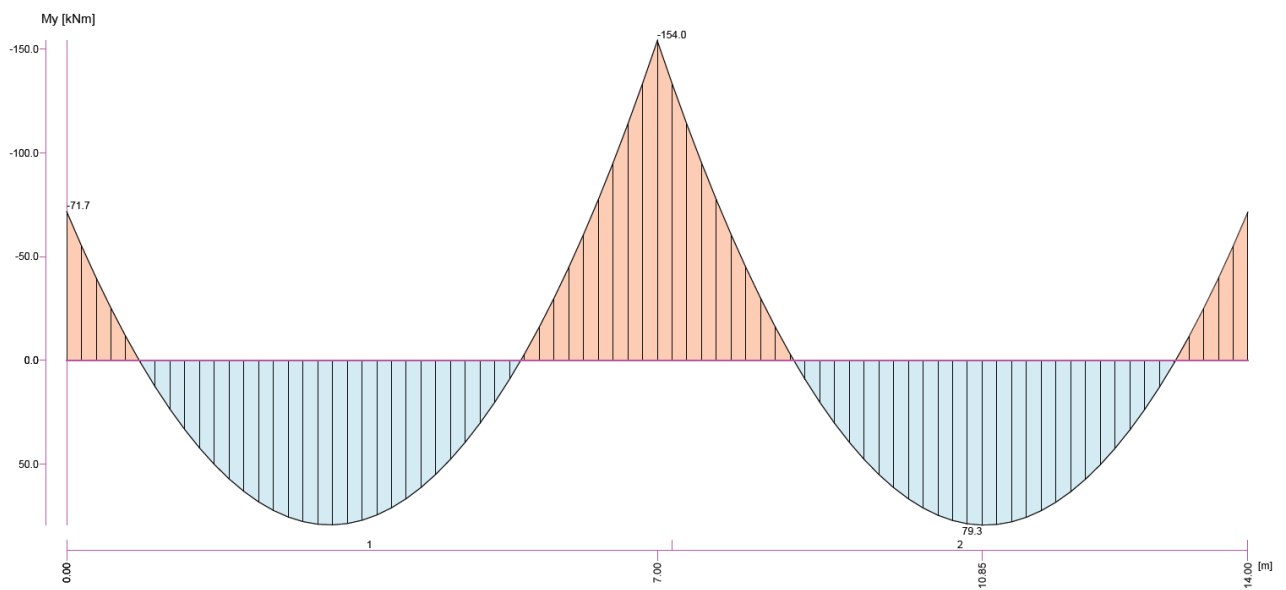
3.10 pav. Sijos A-5 bendri lenkimo momentai nuo išankstinio apgniuždymo jėgos gauti programiniu paketu „IDEA StatiCa“

Naudojant sijos A-6 iš anksto įtemptos armatūros išdėstymo schemą gaunami 3.11 paveiksle pavaizduoti bendri lenkimo momentai nuo išankstinio apgniuždymo.



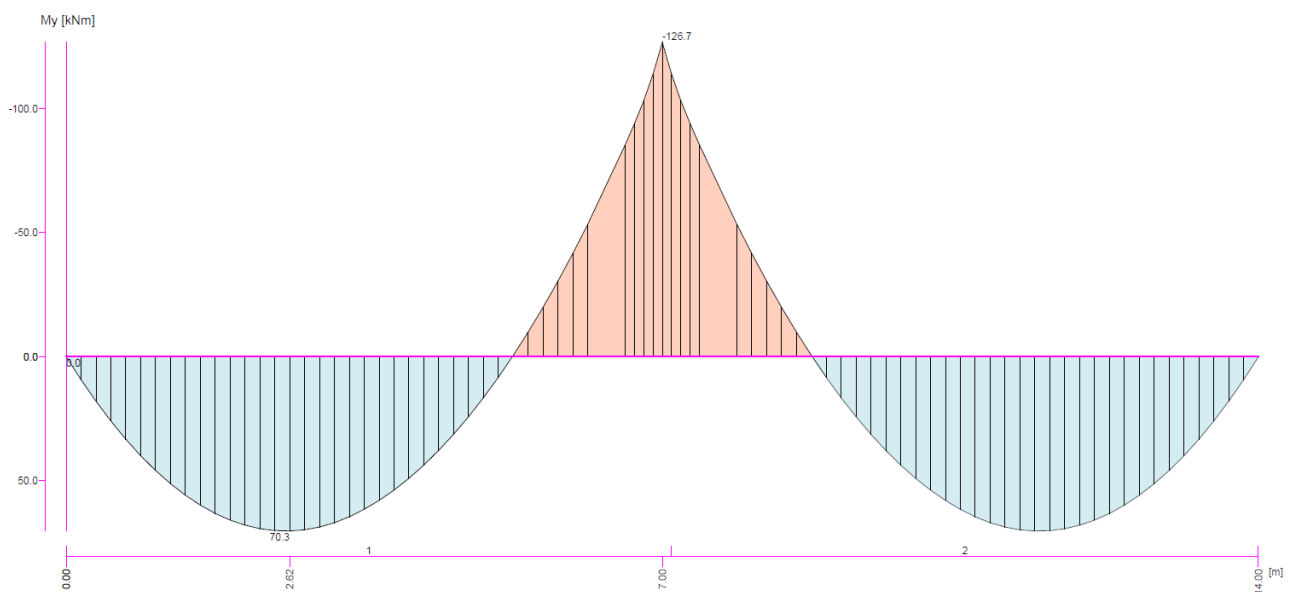
3.11 pav. Sijos A-6 bendri lenkimo momentai nuo išankstinio apgniuždymo jėgos gauti programiniu paketu „IDEA StatiCa“

Naudojant sijos A-1 iš anksto įtemptos armatūros išdėstymo schemą gaunami 3.12 paveiksle pavaizduoti suminiai lenkimo momentai.



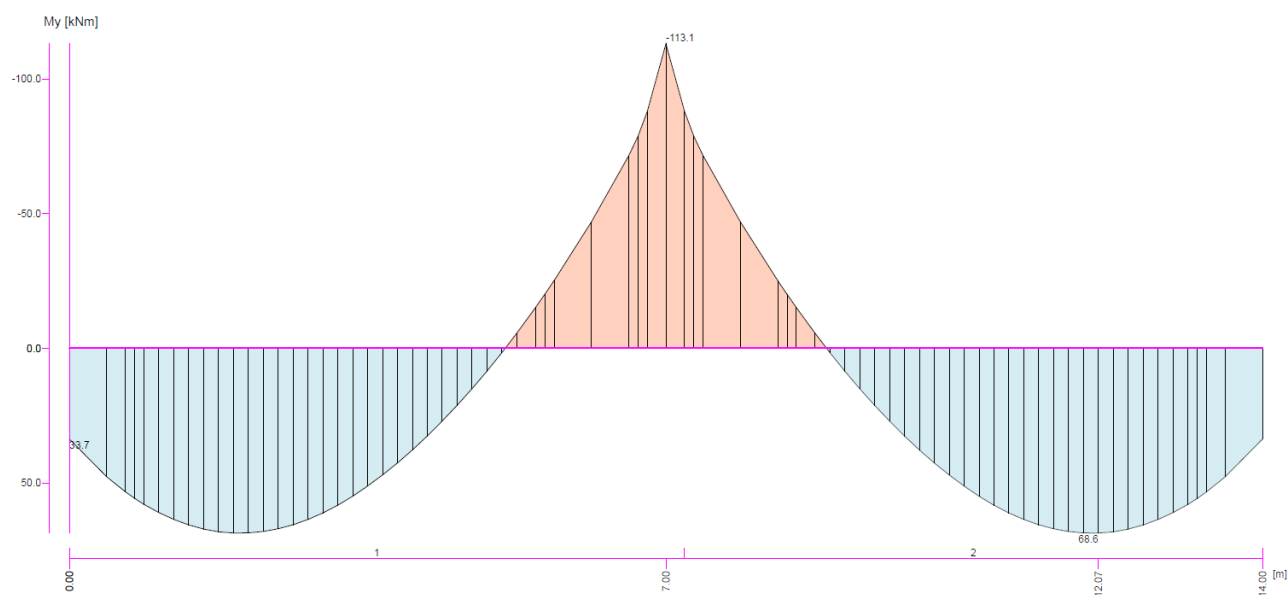
3.12 pav. Sijos A-1 suminiai lenkimo momentai gauti programiniu paketu „IDEA StatiCa“

Taikant sijos A-2 įtemptos armatūros išdėstymo schemą gaunami 3.13 paveiksle pavaizduoti suminiai lenkimo momentai.



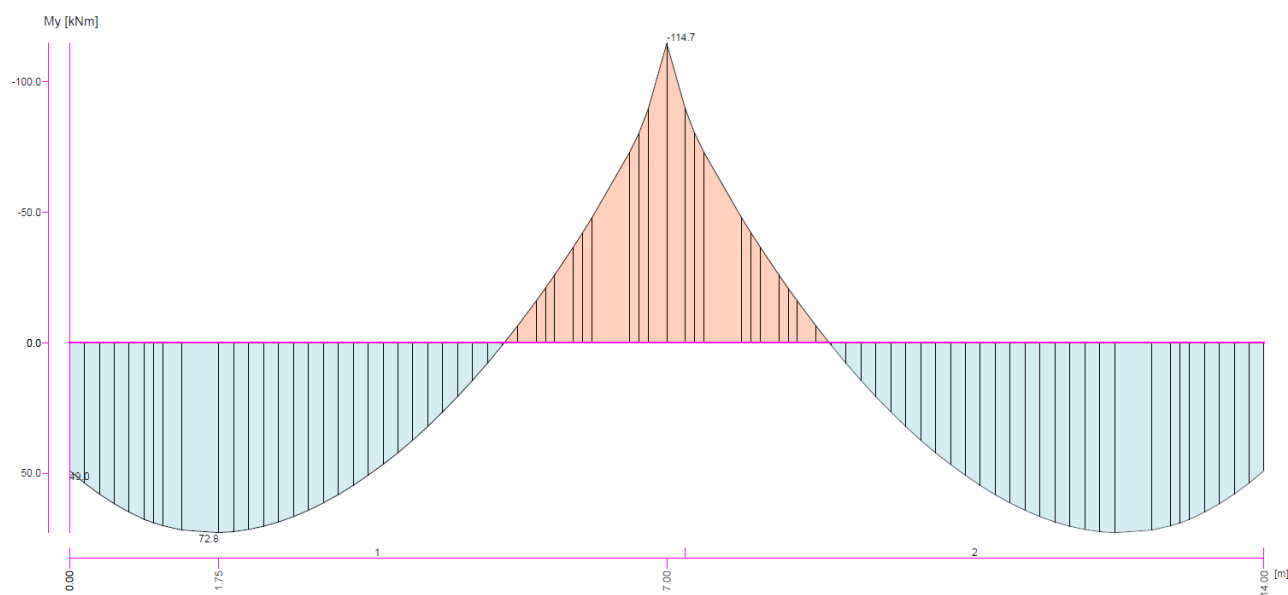
3.13 pav. Sijos A-2 suminiai lenkimo momentai gauti programiniu paketu „IDEA StatiCa“

Naudojant sijos A-3 iš anksto įtemptos armatūros išdėstymo schemą gaunami 3.14 paveiksle pavaizduoti suminiai lenkimo momentai.



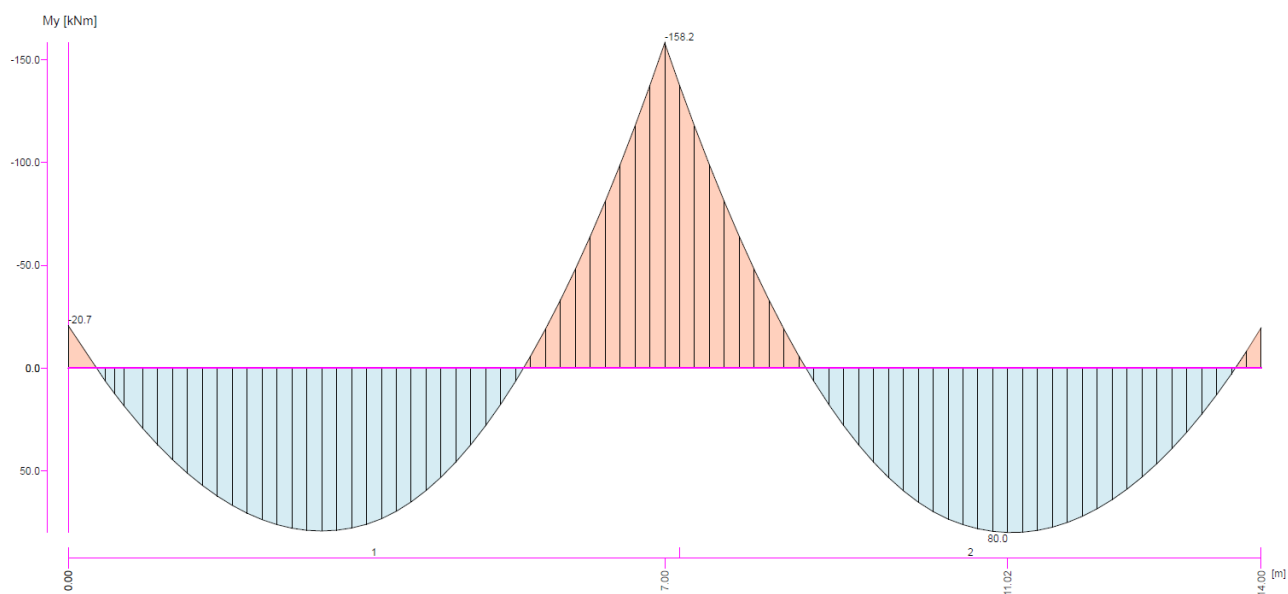
3.14 pav. Sijos A-3 suminiai lenkimo momentai gauti programiniu paketu „IDEA StatiCa“

Taikant sijos A-4 įtemptos armatūros išdėstymo schemą gaunami 3.15 paveiksle pavaizduoti suminiai lenkimo momentai.



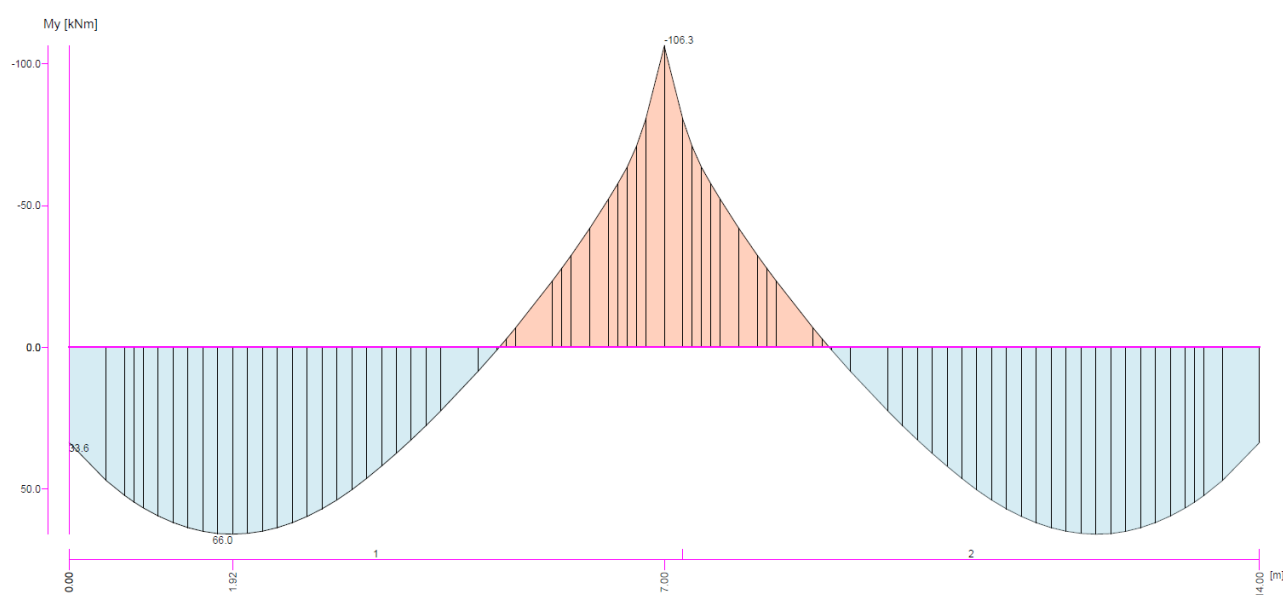
3.15 pav. Sijos A-4 suminiai lenkimo momentai gauti programiniu paketu „IDEA StatiCa“

Naudojant sijos A-5 iš anksto įtemptos armatūros išdėstymo schemą gaunami 3.16 paveiksle pavaizduoti suminiai lenkimo momentai.



3.16 pav. Sijos A-5 suminiai lenkimo momentai gauti programiniu paketu „IDEA StatiCa“

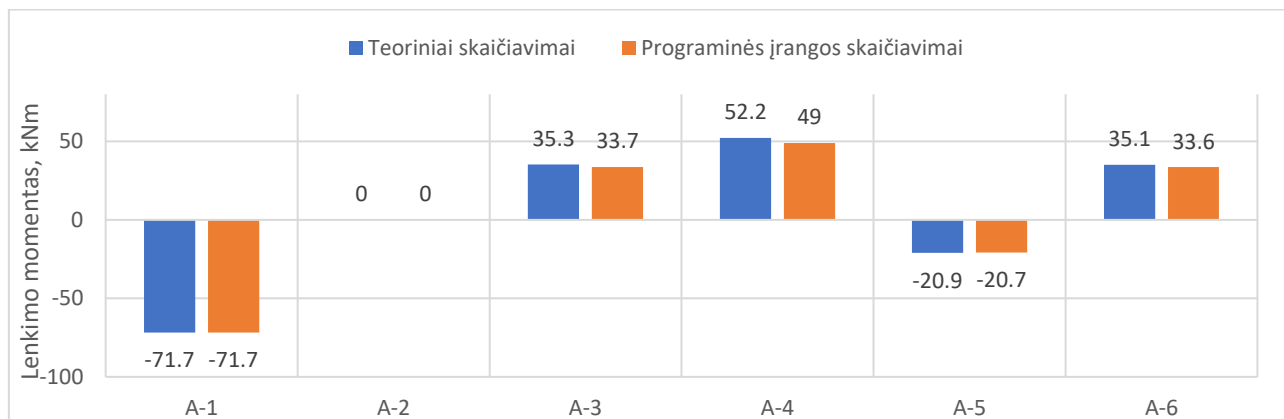
Taikant sijos A-6 įtemptos armatūros išdėstymo schemą gaunami 3.17 paveiksle pavaizduoti suminiai lenkimo momentai.



3.17 pav. Sijos A-6 suminiai lenkimo momentai gauti programiniu paketu „IDEA StatiCa“

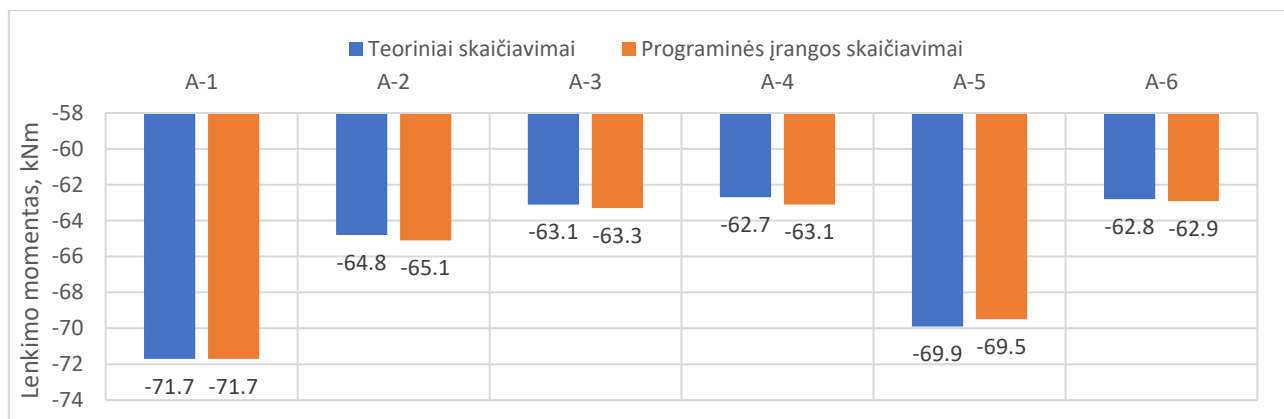
3.3. Skaitmeninės ir analitinės analizės rezultatų palyginimas

Šiame poskyryje atliekamas rezultatų palyginimas. Palyginti lenkimo momentų rezultatai, nuo skirtingų įtemptos armatūros išdėstymo schemų, gauti analitinių skaičiavimų su programinės įrangos „IDEA StatiCa“ gautais rezultatais.



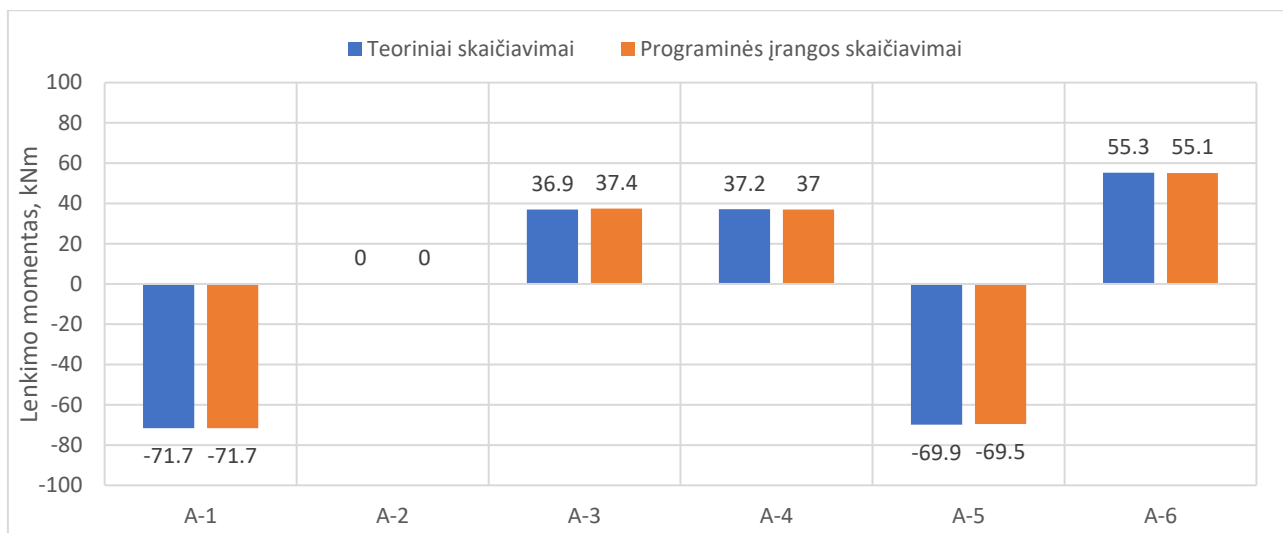
3.18 pav. Teorinių ir programinės įrangos pirminių momentų rezultatų palyginimas A atramoje

Taikant skirtingus įtemptos armatūros išdėstymus gaunami skirtingi pirminiai momentai, dėl išankstinio apgniuždymo. Teorinių skaičiavimų ir programinės įrangos pirminių momentų palyginimas A atramoje pateiktas 3.18 paveiksle. Iš grafiko (žr. 3.18 pav.) matyti jog, pirminių momentų rezultatai nesiskiria sijoje A-1 ir sijoje A-2, tačiau visose kitose sijose pirminiai momentai skiriasi minimaliai. Didžiausias pirminių momentų skirtumas gautas sijoje A-4, kur rezultatai skiriasi 6,1 %. Mažiausias pirminių momentų skirtumas gautas sijoje A-5, kurios rezultatai skiriasi 1 %.



3.19 pav. Teorinių ir programinės įrangos pirminių momentų rezultatų palyginimas tarpatramio viduryje

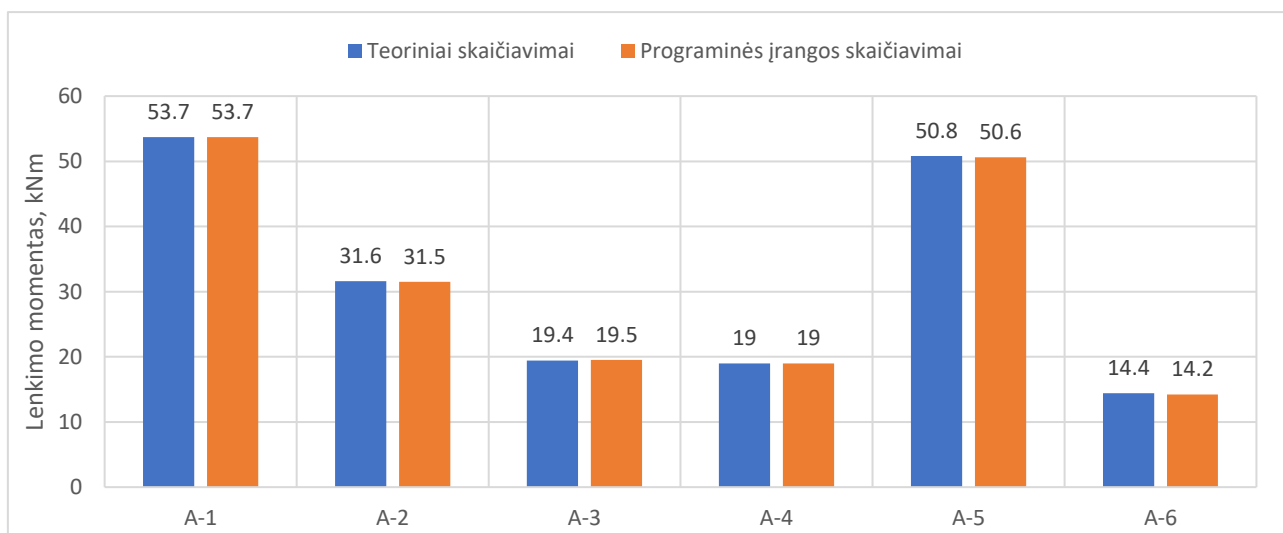
3.19 paveiksle parodyti teoriniai ir programinės įrangos pirminiai momentų rezultatai tarpatramio viduryje. Iš gauto grafiko (žr. 3.19 pav.) matyti, jog pirminių momentų rezultatai nesiskiria sijos A-1 atveju. Visais kitais atvejais pirminių momentų rezultatai skiriasi, tačiau labai neženkliai, t. y. rezultatų skirtumas nesiekia 1 %. Didžiausias skirtumas gautas sijos A-4 ir sijos A-5 atvejais, kurių teoriniai pirminiai momentai nuo programinės įrangos skiriasi 0,6 %.



3.20 pav. Teorinių ir programinės įrangos pirminių momentų rezultatų palyginimas B atramoje

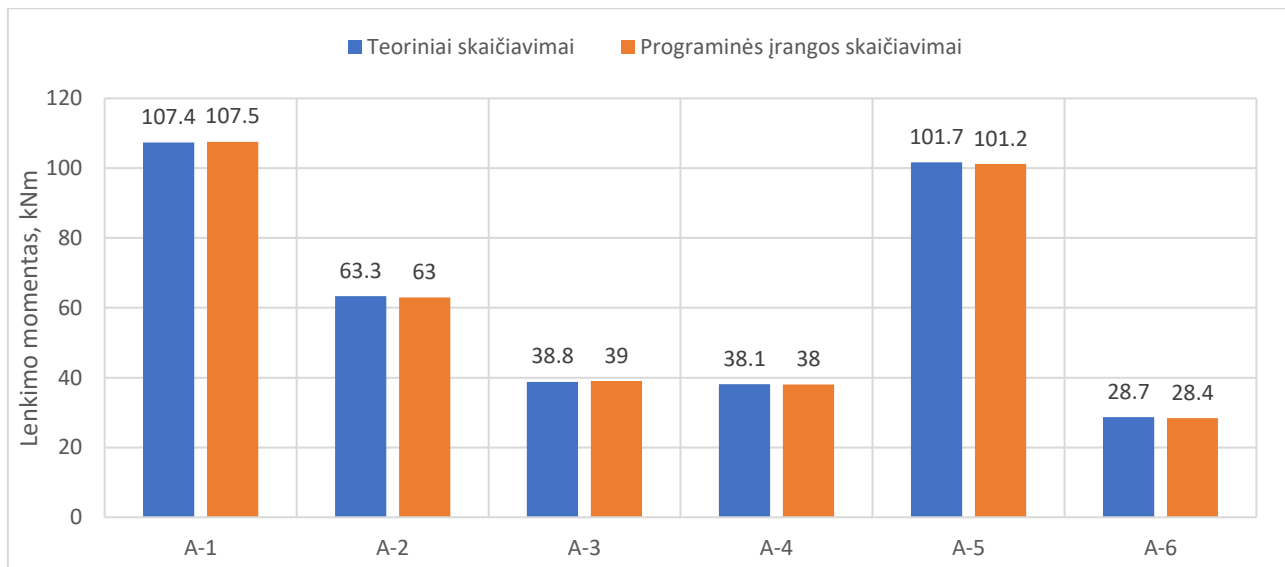
Nagrinėjant 3.20 paveiksle pateiktus teorinių ir programinės įrangos pirminių momentų rezultatus B atramoje pastebima, jog pirminių momentų rezultatai nesiskiria sijos A-1 ir sijos A-2 atvejais. Visais kitais atvejais pirminių momentų rezultatų skirtumas pastebimas, tačiau neženklaus iki 1,5 %. Didžiausias pirminių momentų skirtumas gautas sijoje A-3, kur skirtumas siekia 1,3 %. Mažiausias skirtumas tarp teorinių skaičiavimų ir programinės įrangos pirminių momentų gautas sijos A-6 atveju, kur rezultatai skiriasi 0,4 %.

Taip pat nagrinėjant skirtingus įtemptos armatūros išdėstymus sijoje gaunami skirtingi antriniai momentai, kurie susidaro dėl išankstinio apgniuždymo ir B atramos suvaržymo metu atsirandančios priešingos krypties reakcijos kraštinių atramų atžvilgiu. 3.21 ir 3.22 paveiksluose parodyti teorinių ir skaitmeninių skaičiavimų antrinių momentų rezultatų palyginimai tarpatramio viduryje ir B atramoje. A atramoje rezultatai nelyginami, kadangi antriniai momentai ten nesusidaro.



3.21 pav. Teorinių ir programinės įrangos antrinių momentų rezultatų palyginimas tarpatramio viduryje

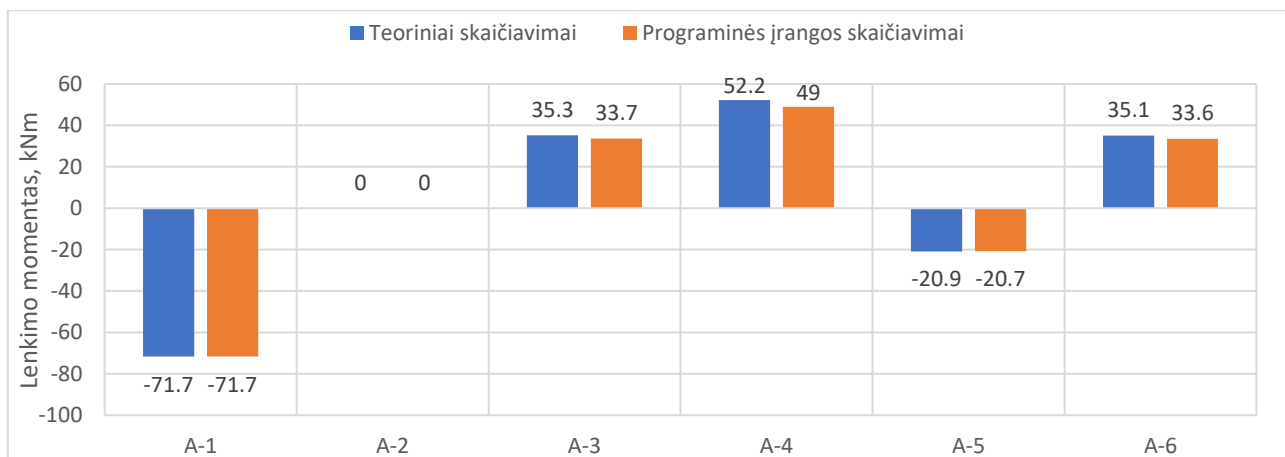
Analizuojami 3.21 paveiksle parodyti teorinių ir programinės įrangos antrinių momentų rezultatai tarpatriamio viduryje. Iš grafiko (žr. 3.21 pav.) galima pastebėti, jog rezultatai identišškai sutampa sijos A-1 ir sijos A-4. Kitų variantų atvejais antriniai momentų rezultatai skiriasi, bet neženkliai. Antrinių momentų skirtumas nesiekia 1,5 %. Didžiausias antrinių momentų skirtumas gautas sijoje A-6, jis siekia 1,4 %. Mažiausiai antriniai momentai skiriasi sijoje A-2, kur rezultatų skirtumas 0,3 %.



3.22 pav. Teorinių ir programinės įrangos antrinių momentų rezultatų palyginimas B atramoje

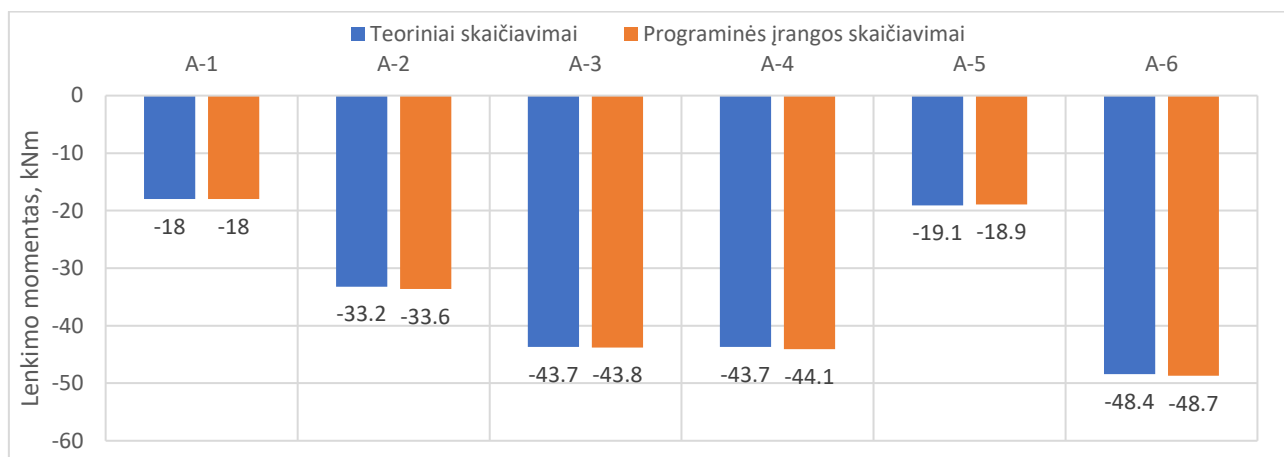
Nagrinėjami 3.22 paveiksle parodyti teorinių ir programinės įrangos skaičiavimų antrinių momentų rezultatai B atramoje. Iš gautų rezultatų matyti, jog visi antrinių momentų rezultatai skiriasi, tačiau labai minimaliai. Didžiausias antrinių momentų skirtumas gautas sijoje A-6, kur rezultatų skirtumas 1 %. Mažiausiai antriniai momentai skiriasi sijoje A-1, kur rezultatų skirtumas 0,1 %.

Susumavus gautus pirminius ir antrinius momentus gaunami bendri lenkimo momentai nuo išankstinio apgniuždymo.



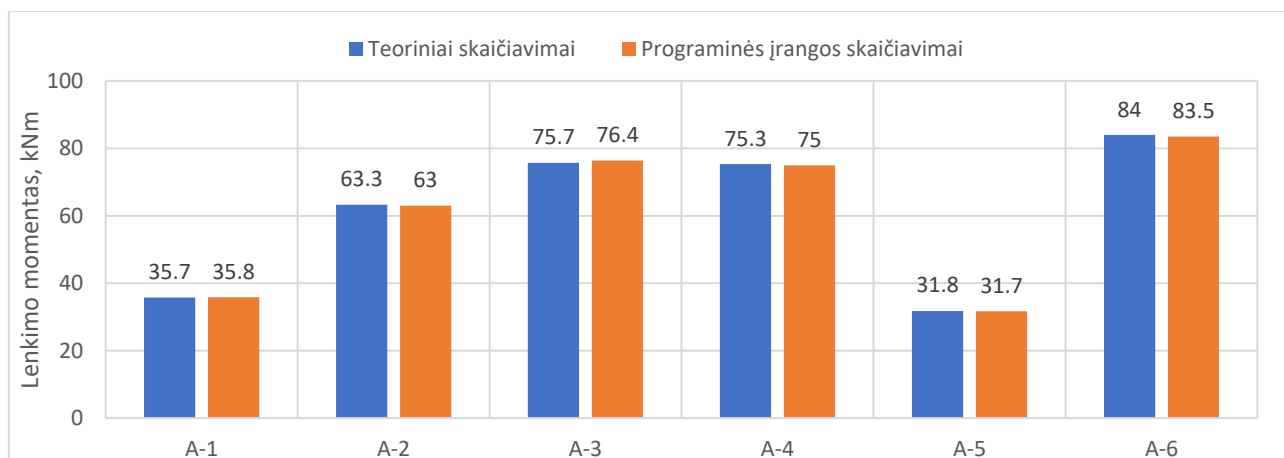
3.23 pav. Teorinių ir programinės įrangos bendrų (pirminių ir antrinių momentų suma) lenkimo momentų nuo išankstinio apgniuždymo rezultatų palyginimas A atramoje

3.23 paveiksle pateiktas teorinių ir programinės įrangos bendrų lenkimo momentų nuo išankstinio apgniuždymo rezultatų palyginimas A atramoje. Iš gauto grafiko (žr. 3.23 pav.) matyti, jog bendri lenkimo momentų rezultatai vienodi sijos A-1 ir sijos A-2, visais kitais sijų atvejais bendri lenkimo momentai skiriasi minimaliai, t. y. didžiausias skirtumas 6,1 %. Didžiausias bendrų lenkimo momentų rezultatų skirtumas gautas sijoje A-4. Mažiausiai skiriasi bendri lenkimo momentai sijoje A-5, kur rezultatų skirtumas 1,0 %.



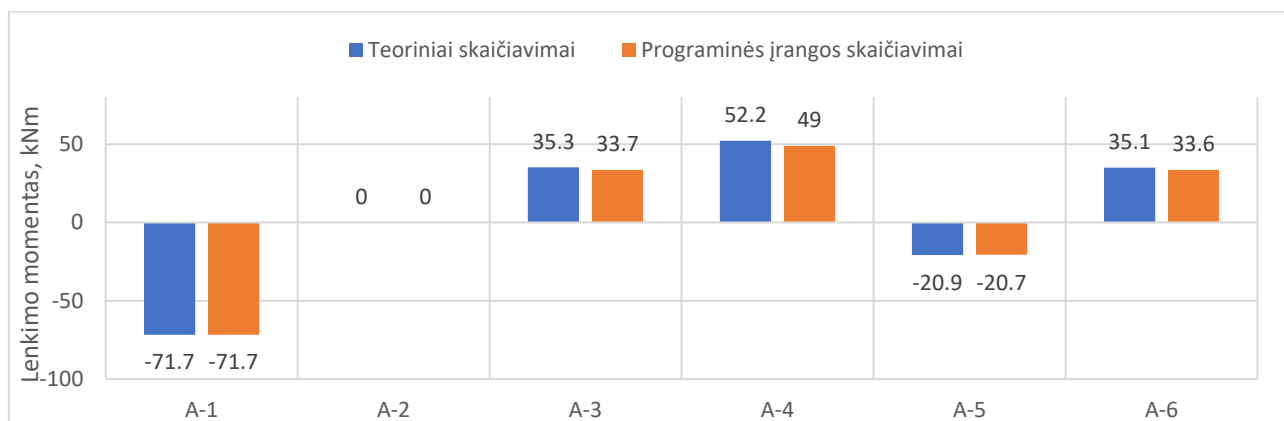
3.24 pav. Teorinių ir programinės įrangos bendrų (pirminių ir antrinių momentų suma) lenkimo momentų nuo išankstinio apgniuždymo rezultatų palyginimas tarpatramio viduryje

Analogiškai nagrinėjami 3.24 paveiksle parodyti teoriniai ir programinės įrangos bendri lenkimo momentų nuo išankstinio apgniuždymo rezultatai tarpatramio viduryje. Iš gautų bendrų lenkimo momentų rezultatų matyti, jog sijos A-1 rezultatai visiškai sutampa. Analizuojant kitas sijas pastebima, jog rezultatai minimaliai skiriasi, t. y. didžiausias skirtumas gautas 1,2 %. Didžiausias skirtumas gautas sijoje A-2. Mažiausias bendrų lenkimo momentų skirtumas gautas sijoje A-3, kur skirtumas siekia 0,2 %.



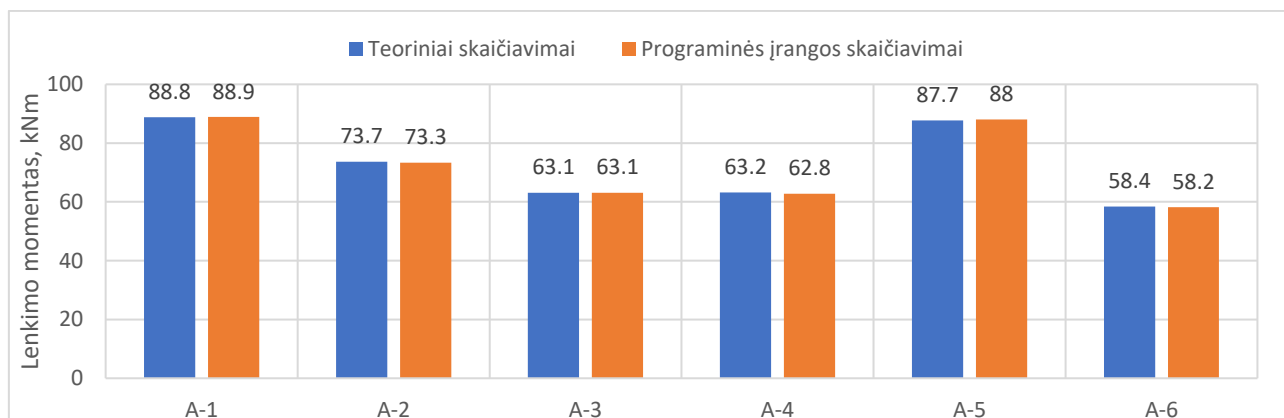
3.25 pav. Teorinių ir programinės įrangos bendrų (pirminių ir antrinių momentų suma) lenkimo momentų nuo išankstinio apgniuždymo rezultatų palyginimas B atramoje

3.25 paveiksle parodyti bendri lenkimo momentų nuo išankstinio apgniuždymo rezultatai, kurie gauti teoriniais skaičiavimais ir programine įranga „IDEA StatiCa“, B atramoje. Šiame grafike (žr. 3.25 pav.) palyginami bendri lenkimo momentai nuo skirtingų armatūros išdėstymų sijose. Iš grafiko pastebima, jog visi bendri lenkimo momentų rezultatai nesutampa, tačiau šis nesutapimas minimalus, t. y. didžiausias skirtumas siekia 0,9 %, šis skirtumas gautas sijoje A-3. Mažiausi bendrų lenkimo momentų skirtumai gauti sijoje A-1 ir sijoje A-5, šie skirtumai siekia 0,3 %.



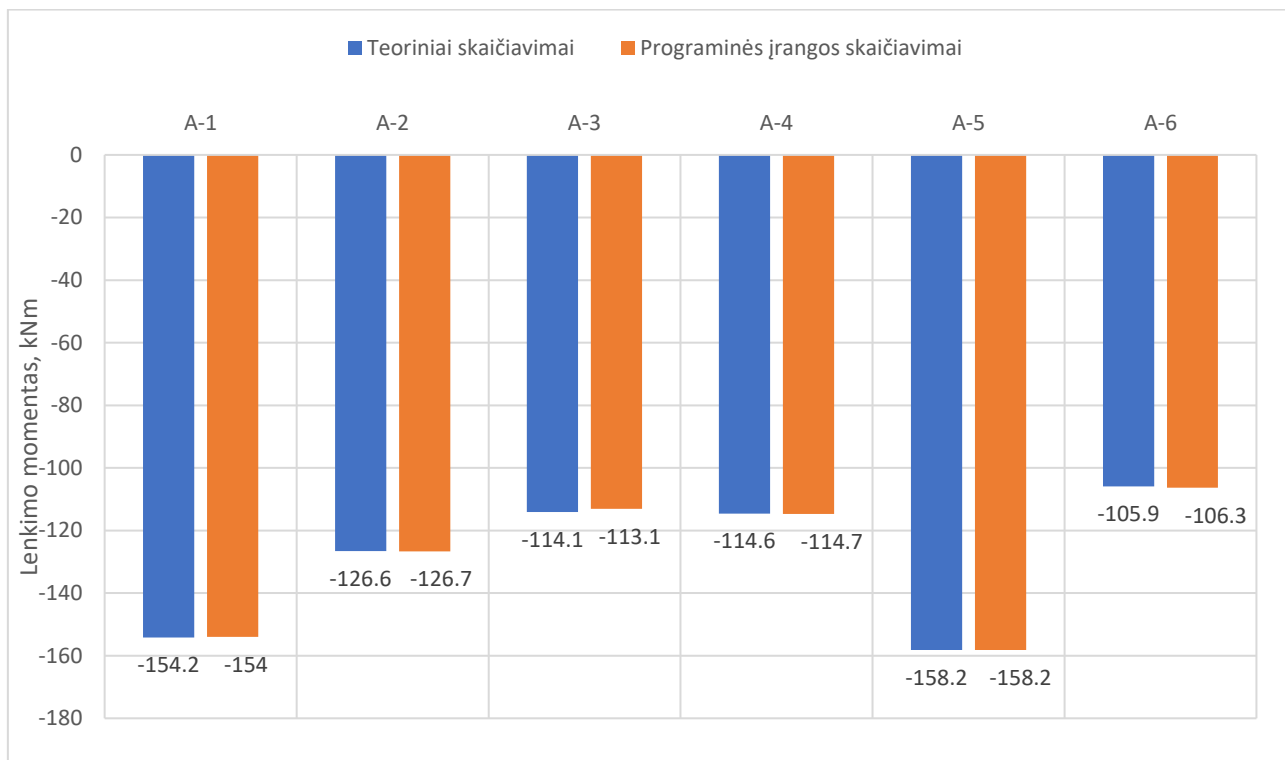
3.26 pav. Teorinių ir programinės įrangos suminių lenkimo momentų rezultatų palyginimas A atramoje

Susumavus lenkimo momentus nuo išankstinio apgniuždymo ir lenkimo momentus nuo išorinės apkrovos gaunami suminiai lenkimo momentų rezultatai. A atramoje teorinių ir programinės įrangos suminių lenkimo momentų rezultatų palyginimas pateiktas 3.26 paveiksle. Iš gautų suminių lenkimo momentų rezultatų (žr. 3.26 pav.) matyti, jog tik sijos A-1 ir sijos A-2 rezultatai sutampa identišškai, visais kitais sijų atvejais suminiai lenkimo momentų rezultatai skiriasi iki 6,1 %. Didžiausias suminių lenkimo momentų skirtumas gautas sijos A-4 atveju, kur rezultatai skiriasi 6,1 %. Panašus suminių lenkimo momentų skirtumas gautas sijos A-3 ir sijos A-6 atvejais, kur rezultatai skiriasi apytiksliai 4,5 %. Mažiausias suminių lenkimo momentų skirtumas gautas sijos A-5 atveju, kur skirtumas siekia 1,0 %.



3.27 pav. Teorinių ir programinės įrangos suminių lenkimo momentų rezultatų palyginimas tarpatramio viduryje

Analogiškai nagrinėjami 3.27 paveiksle parodyti tarpatramio viduryje gauti suminiai lenkimo momentų rezultatai. Iš 3.27 paveiksle pateiktų suminių lenkimo momentų rezultatų galima pamatyti, jog visais sijų atvejais rezultatai skiriasi minimaliai, išskyrus sijos A-3 atveją, kuriame gauti identiški rezultatai. Didžiausias suminių lenkimo momentų skirtumas gautas sijos A-4, kur rezultatai skiriasi 0,6 %. Mažiausias suminių lenkimo momentų skirtumas gautas sijos A-1, kur rezultatų skirtumas siekia 0,1 %.



3.28 pav. Teorinių ir programinės įrangos suminių lenkimo momentų rezultatų palyginimas B atramoje

Analizuojami 3.28 paveiksle parodyti teoriniai ir programinės įrangos suminiai lenkimo momentų rezultatai B atramoje. Iš gautų suminių lenkimo momentų rezultatų matyti, jog sijos A-5 atveju rezultatai gaunami identiški, visais kitais sijų atvejais rezultatai skiriasi, bet skirtumas neviršija 1 %. Didžiausias suminių lenkimo momentų skirtumas gautas sijos A-3 atveju, kur rezultatų skirtumas siekia 0,9 %. Mažiausi suminių lenkimo momentų skirtumai gauti sijos A-1, sijos A-2 ir sijos A-4 atvejais, kur rezultatų skirtumas 0,1 %.

Apibendrinant atliktą lenkimo momentų rezultatų palyginimą galima teigti, jog rezultatai gauti atliktus teorinius skaičiavimus sutampa su programinės įrangos „IDEA StatiCa“. Minimalų (didžiausias gautas skirtumas 6,1 %) rezultatų skirtumą gali lemti išankstinio apgniuždymo jėgos mažėjimas, kadangi programinė įranga „IDEA StatiCa“ kiekvienam sijos variantui perskaičiuoja išankstinio įtempimo nuostolius ir įvertina tiksliau išankstinio apgniuždymo jėgos sumažėjimą per sijos ilgį.

3.4. Skyriaus išvados

1. Pasinaudojant skaičiavimo programa „IDEA StatiCa“ galima tiksliai sumodeliuoti norimą iš anksto įtemptos armatūros išdėstymą, kas leidžia efektyviau projektuoti konstrukcijas.
2. Pirminių momentų rezultatai gauti skaitinės analizės metu sutampa tarpatramyje ir B atramoje su analitinių skaičiavimų rezultatais. A atramoje gaunamas nedidelis skirtumas, kuris siekia apytiksliai 6 %.
3. Antrinių momentų rezultatai gauti skaitinės analizės metu sutampa su analitinių skaičiavimų rezultatais B atramoje ir tarpatramio viduryje. Didžiausias skirtumas siekia 1,4 %.
4. Skaitinės analizės rezultatai sutampa su analitinių skaičiavimų metodo (kampų pasisukimo) gautais bendrais lenkimo momento rezultatais. Rezultatų skirtumas minimalus, tačiau didžiausias skirtumas siekia 6,1 %. Tai reiškia, jog programinės įrangos „IDEA StatiCa“ metodika, ieškant lenkimo momentų nuo išankstinio apgniuždymo triatramėse sijos, yra patikima.
5. Atliekant triatramių sijų, su skirtingomis įtemptos armatūros išdėstymo schemomis, skaitinę analizę, galima gana tiksliai nustatyti sijoje veikiančius pirminius momentus, antrinius momentus, bendrus lenkimo momentus nuo išankstinio apgniuždymo ir suminius lenkimo momentus.

BENDROSIOS DARBO IŠVADOS

1. Triatramėse statiškai nesprenžiamose sijose vidurinė atrama varžo sijos išlinkimą, o šis atramos suvaržymas lemia nežinomos reakcijos atsiradimą. Dėl šios reakcijos atsiradimo susidaro antrinis momentas.
2. Iš anksto įtemptos armatūros padėtis yra labai svarbi triatramės sijos projektavimo ir konstravimo proceso dalis. Jei armatūros padėtis yra netinkamai parinkta, tai gali sukelti konstrukcijos susilpnėjimą ir mažinti jos galimybes atlaikyti išorines apkrovas.
3. Projektuojant daugiaatramės statiškai nesprenžiamas sijas būtina įvertinti atsirandantį antrinį momentą, kadangi jis sumažina arba padidina veikiantį momentą vidurinėje atramoje.
4. Naudojant skirtingus įtemptos armatūros padėčių variantus gaunami skirtingi pirminiai ir antriniai lenkimo momentai, dėl išankstinio apgniuždymo jėgos poveikio.
5. Trijų atramų sijoje norint sumažinti kuo daugiau lenkimo momentą vidurinėje atramoje reikia, kad armatūros padėtis būtų kuo aukščiau sijos viršaus atžvilgiu.
6. Tinkamai parinkus sijos įtemptos armatūros išdėstymo schemą ir išankstinio apgniuždymo jėgą, galima efektyviai sumažinti sijoje išorinės apkrovos sukeltus lenkimo momentus.
7. Skirtingiems armatūros išdėstymo variantams sijos skerspjūvyje reikia skirtingų išankstinio apgniuždymo jėgų, kad būtų panaikintas išorinės apkrovos sukeltas lenkimo momentas.
8. Analitinių antrinių momentų apskaičiavimui naudoto kampų pasisukimo metodo rezultatai nesutapo su nagrinėto eksperimentinio tyrimo gautais antrinių momentų rezultatais. Antriniai momentai tarpatramio viduryje skyrėsi 24 %, o vidurinėje atramoje 21 %. Šių rezultatų skirtumui turėjo įtakos eksperimentinio tyrimo metu įvykstantis lenkimo momentų persiskirstymas.
9. Pasinaudojant skaičiavimo programa „IDEA StatiCa“ galima tiksliai sumodeliuoti norimą iš anksto įtemptos armatūros išdėstymą, kas leidžia efektyviau projektuoti konstrukcijas.
10. Atliekant triatramių sijų, su skirtingomis įtemptos armatūros išdėstymo schemomis, skaitinę analizę, galima gana tiksliai nustatyti sijoje veikiančius pirminius momentus, antrinius momentus, bendrus lenkimo momentus nuo išankstinio apgniuždymo ir suminius lenkimo momentus.

REKOMENDACIJOS

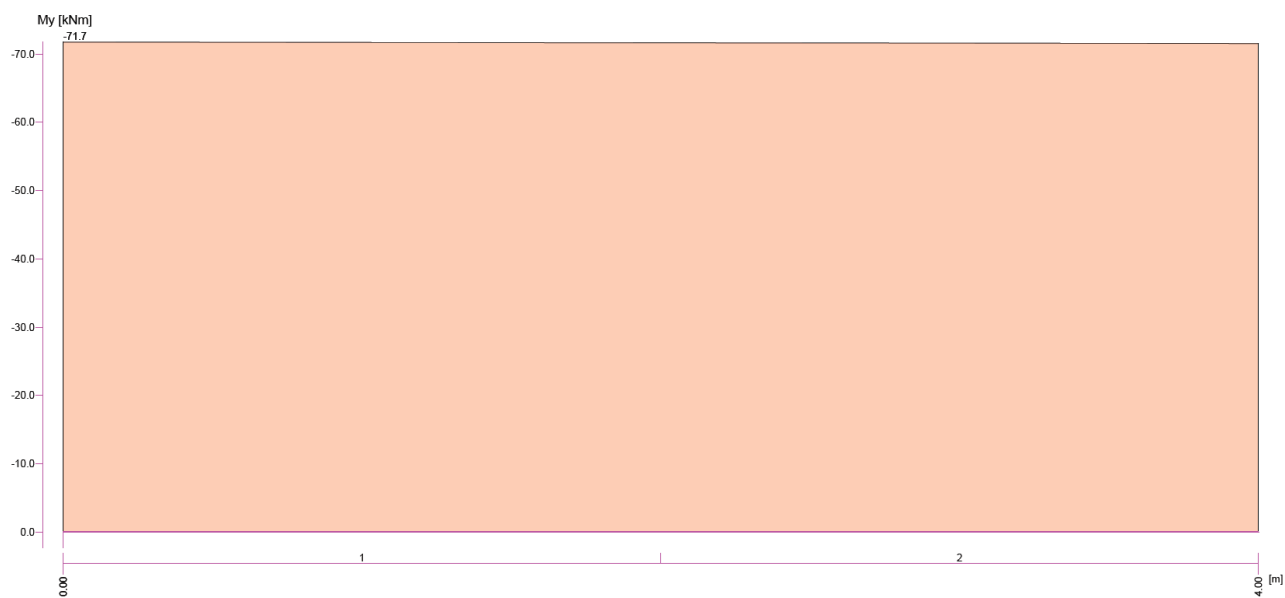
1. Statiškai neišsprendžiamų iš anksto įtemptų gelžbetoninių sijų lenkimo momentų apskaičiavimui rekomenduojama naudoti kampų pasisukimo metodą.
2. Atliekant gelžbetoninės triatramės sijos su įtempta armatūra projektavimą nerekomenduojama naudoti tiesų lyno išdėstymą, kadangi šis išdėstymas yra pats neefektyviausias.
3. Projektuojant triatramės sijas su įtempta armatūra rekomenduojama vidurinėje atramoje įtemptą armatūrą pakelti kuo aukščiau sijos viršaus atžvilgiu, kadangi tai padeda sumažinti išorinės apkrovos sukeltą lenkimo momentą vidurinėje atramoje efektyviausiai.
4. Norint, jog analitinių antrinių momentų rezultatai, naudojant kampų pasisukimo metodą, sutaptų su eksperimentinio tyrimo antriniais momentais, siūlome įvesti pataisos koeficientą α , kuris lygus 0,8.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

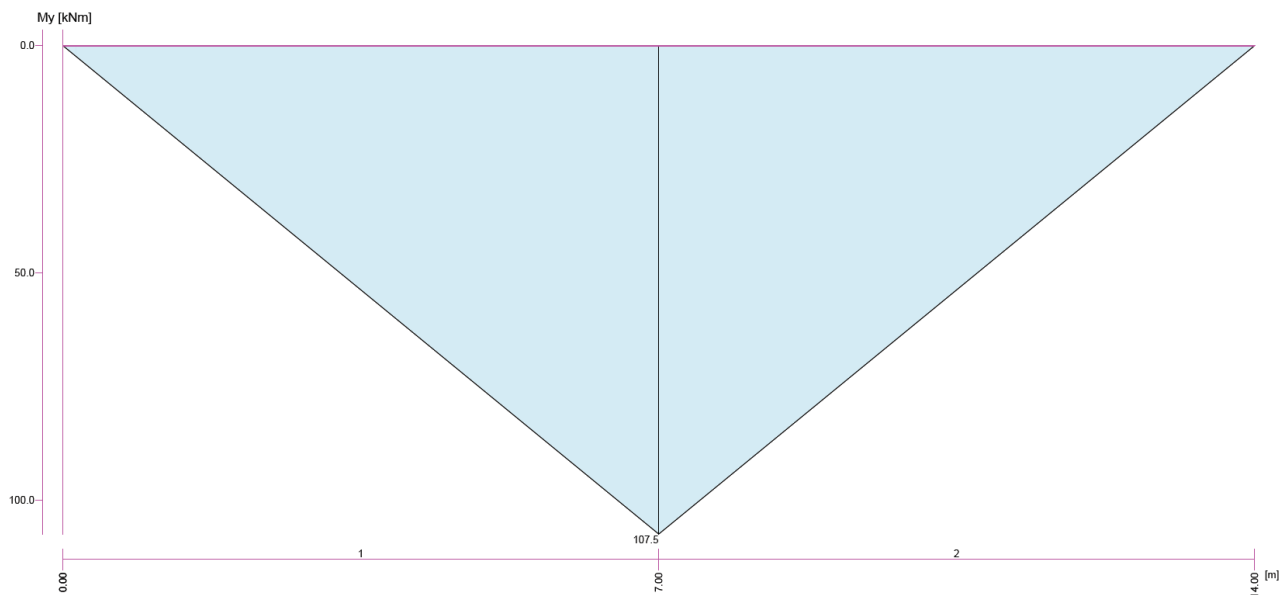
- Aravinthan, T., Mutsuyoshi, H., Hamada, Y. & Watanabe, M. (1999). Experimental investigation on the flexural behavior of two span continuous beams with large eccentricities. Proceedings of the JCI, Vol.21, No.3, 961-966.
- Aravinthan, T., Witchukreangkrai, E., Mutsuyoshi, H. (2005). Flexural Behavior of Two-Span Continuous Prestressed Concrete Girders with Highly Eccentric External Tendons. ACI Structural Journal, 402 – 411. <https://doi.org/10.14359/14411>
- Bar Post – Tensioning Systems. (n.d.). Bbv – systems. <https://www.bbv-systems.com/en/services/bar-post-tensioning-systems/>
- Bhatt, P. (2011). Prestressed concrete design to Eurocodes. London; New York, NY: Spon Press.
- Witchukreangkrai, E., Mutsuyoshi, H., Aravinthan, T. (2003). Secondary moment and moment redistribution in a two – span continuous pc beam with large eccentricity. Engineering, Physics.
- Burgoyne, C. (2005). Analysis of continuous prestressed concrete beams.
- Darwin, D., Charles, D. W., Nilson, A. H. (2015). Design of Concrete Structures: *Fifteenth Edition*. United States: McGraw Hill.
- Duan, N., Zhang, J.W., Cheng, J. (2022). Simulation research on continuous concrete beams reinforced with external prestressed CFRP tendons. Materials, 15(16). <https://doi.org/10.3390/ma15165697>
- Gilbert, R. I., Mickleborough, N. C., & Ranzi, G. (2017). Design of Prestressed Concrete to Eurocode 2. Boca Raton: CRC Press.
- Halvoník, J., Pažma, P., & Vida, R. (2018). Secondary Moments due to Prestressing with Different Bond at the Ultimate Limit State. Slovak Journal of Civil Engineering, 26(1), 10–18. <https://doi.org/10.2478/sjce-2018-0002>
- IDEA StatiCa Beam structural design – User guide (n.d.). Ideastatica. <https://www.ideastatica.com/support-center/user-guide-idea-statica-beam>
- IDEA StatiCa Tendon structural design – User guide (n.d.). Ideastatica. <https://www.ideastatica.com/support-center/user-guide-idea-statica-tendon>
- Jokubaitis, A. (2013). THE INFLUENCE OF THE PRESTRESS OF REINFORCED STEEL ON THE BEHAVIOUR OF THE FLEXURAL ELEMENTS OF REINFORCED CONCRETE / ARMATŪROS IŠANKSTINIŲ ĮTEMPIŲ ĮTAKA GELŽBETONINIŲ LENKIAMŲJŲ ELEMENTŲ ELGSENAI. Science Future of Lithuania, 5(5), 474–480. <https://doi.org/10.3846/mla.2013.74>
- Kong, F. K., Evans, R. H. (1987). Reinforced and Prestressed Concrete: *Third edition*. London: Spon Press.

- Lietuvos standartizacijos departamentas. (2005). EUROKODAS 2. Gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas. 1 dalis. Bendrosios ir pastatų taisyklės. (LST EN 1992-1-1:2005). Vilnius.
- Lin, T.Y., Thornton, K. (1972). Secondary moment and moment redistribution in continuous prestressed concrete beams. *PCI Journal*, 8-20. <https://doi.org/10.15554/pcij.01011972.8.20>
- Lou, T., Xiang, Y. (2010). Numerical analysis of second – order effects of externally prestressed concrete beams. *Structural Engineering and Mechanics*, 631 – 643. <https://doi.org/10.12989/sem.2010.35.5.631>
- LR aplinkos ministerija. (2005). Betoninių ir gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas (STR 2.05.05:2005).
- Marčiukaitis, G. (2012). Iš anksto įtemptas gelžbetonis: vadovėlis. Vilnius: Technika.
- Marčiukaitis, G. (2014). Įtemptojo gelžbetonio technologijos ir projektavimo pagrindai: vadovėlis. Vilnius: Technika.
- Naaman, A. E. (2004). *Prestressed Concrete Analysis and Design: Fundamentals (Second Edition)*. Techno Press.
- Nawy, E. G. (2010). *Prestressed Concrete: A Fundamental Approach*. Upper Saddle River (N.J.): Prentice Hall.
- O'Brien, Eugene J., & Dixon, Andrew S. (2012). *Reinforced and prestressed concrete design to EC2: the complete process* (2nd ed.). Abingdon: Spon Press.
- Páez, P. M., & Sensale, B. (2018). Improved prediction of long-term prestress loss in unbonded prestressed concrete members. *Engineering Structures*, 174, 111–125. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.07.038>
- Techninis aprašymas: Plieninio lyno skersmuo (n.d.). Certex. <https://www.certex.lt/lifting-knowhow/Technical-information/Wire-rope/Techninis-aprasymas>
- Youakim, S. A., Ghali, A., Hida, E. S., Karbhari, V. M. (2007). Prediction of Long – Term Prestress Losses. *PCI Journal*, 116 – 130. <https://doi.org/10.15554/pcij.03012007.116.130>

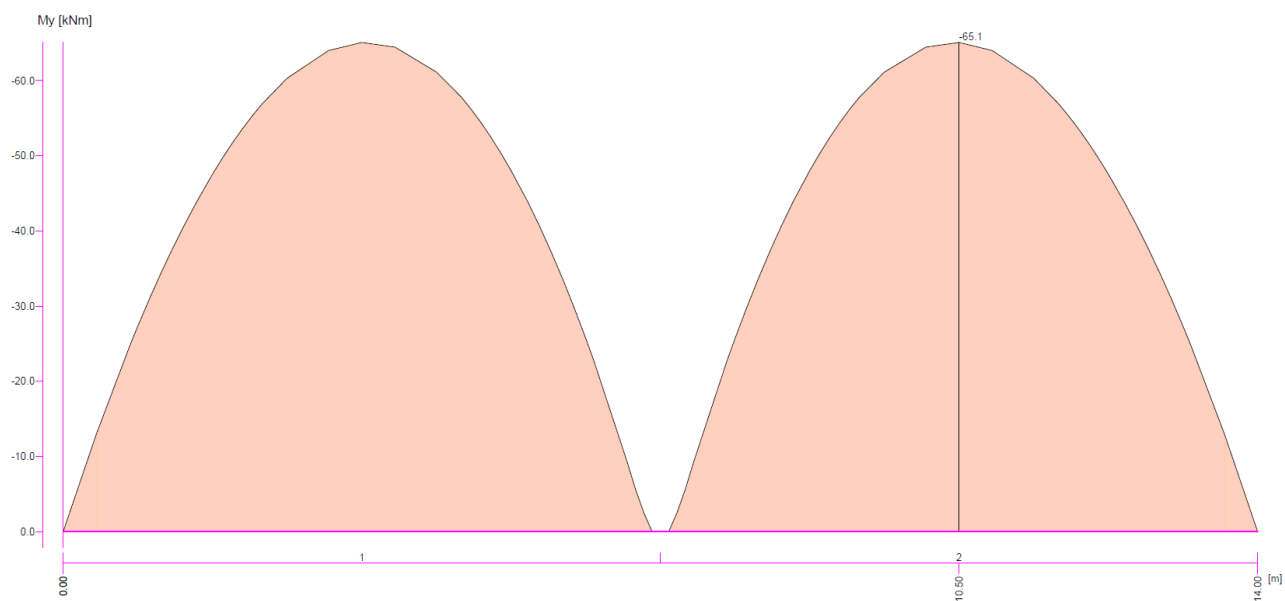
A PRIEDAS. Pirminių ir antrinių momentų rezultatai gauti „IDEA StatiCa“ programa



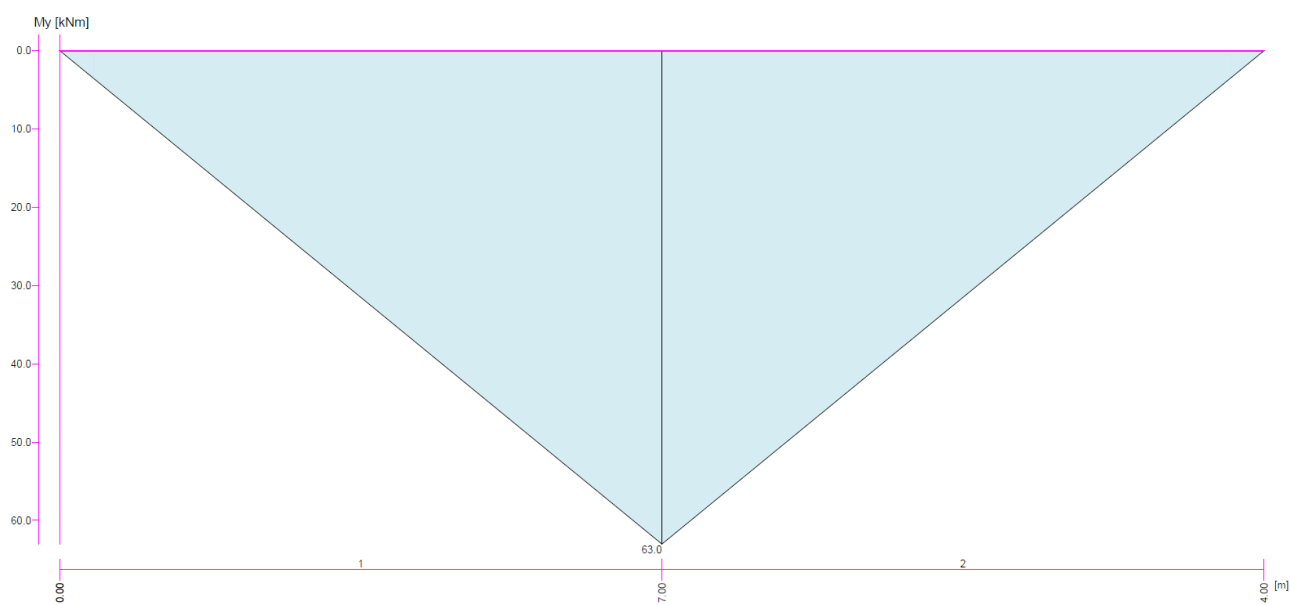
A. 1 pav. Sijos A-1 pirminiai momentai nuo išankstinio apgniuždymo jėgos gauti programiniu paketu „IDEA StatiCa“



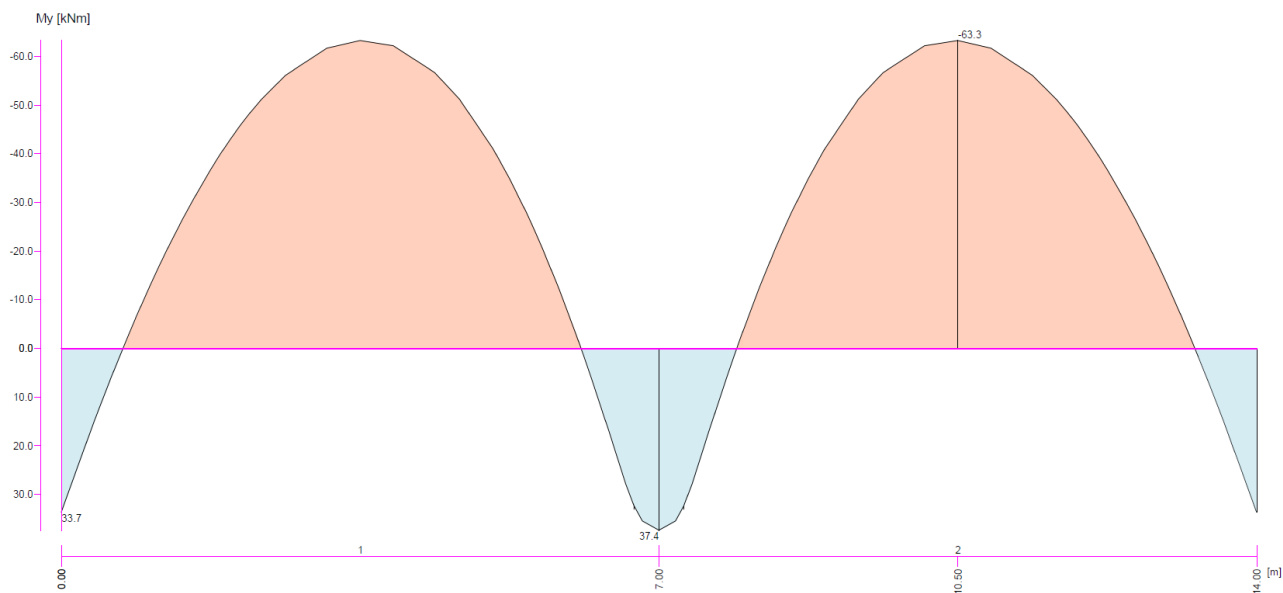
A. 2 pav. Sijos A-1 antriniai momentai gauti programiniu paketu „IDEA StatiCa“



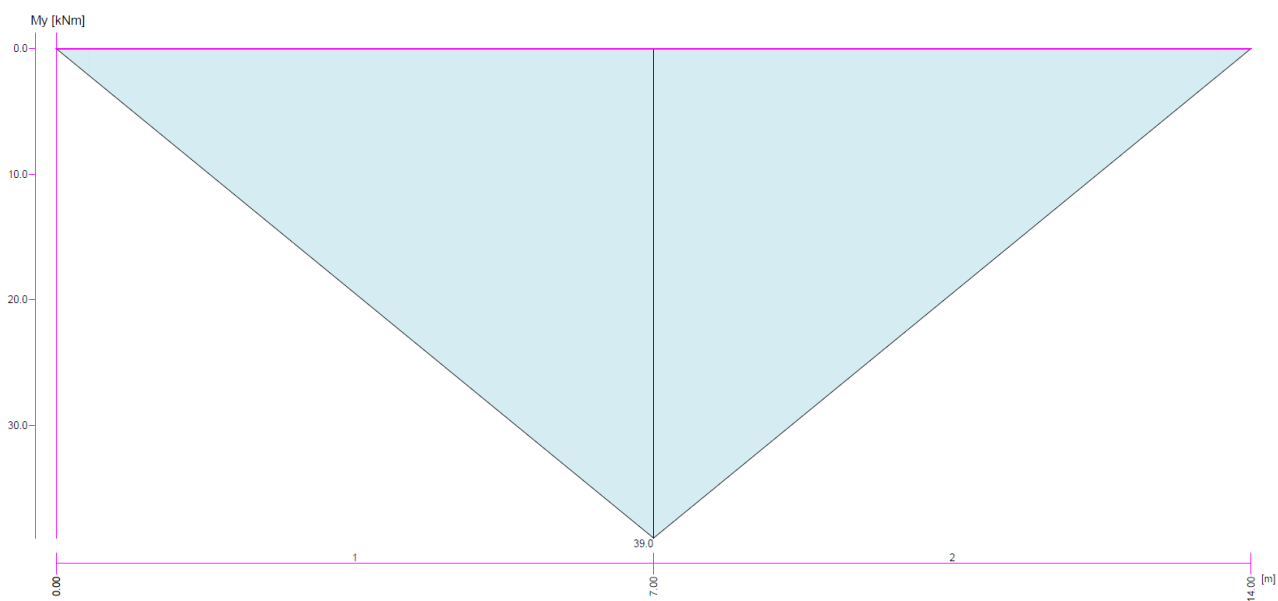
A. 3 pav. Sijos A-2 pirminiai momentai nuo išankstinio apgniuždymo jėgos gauti programiniu paketu „IDEA StatiCa“



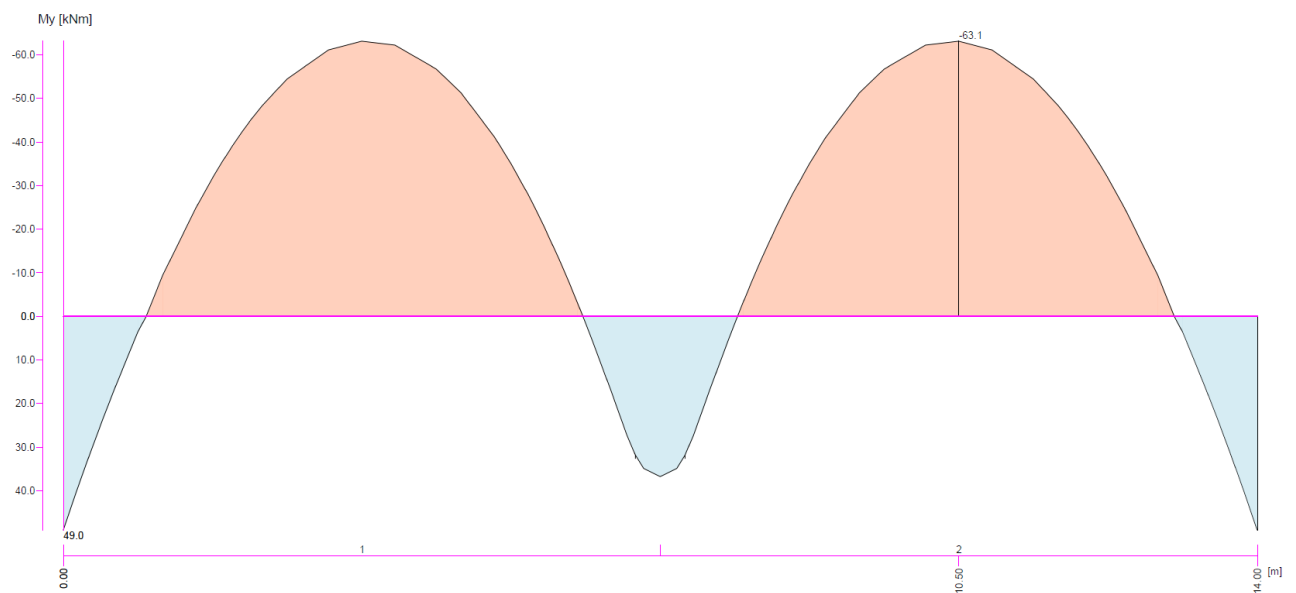
A. 4 pav. Sijos A-2 antriniai momentai gauti programiniu paketu „IDEA StatiCa“



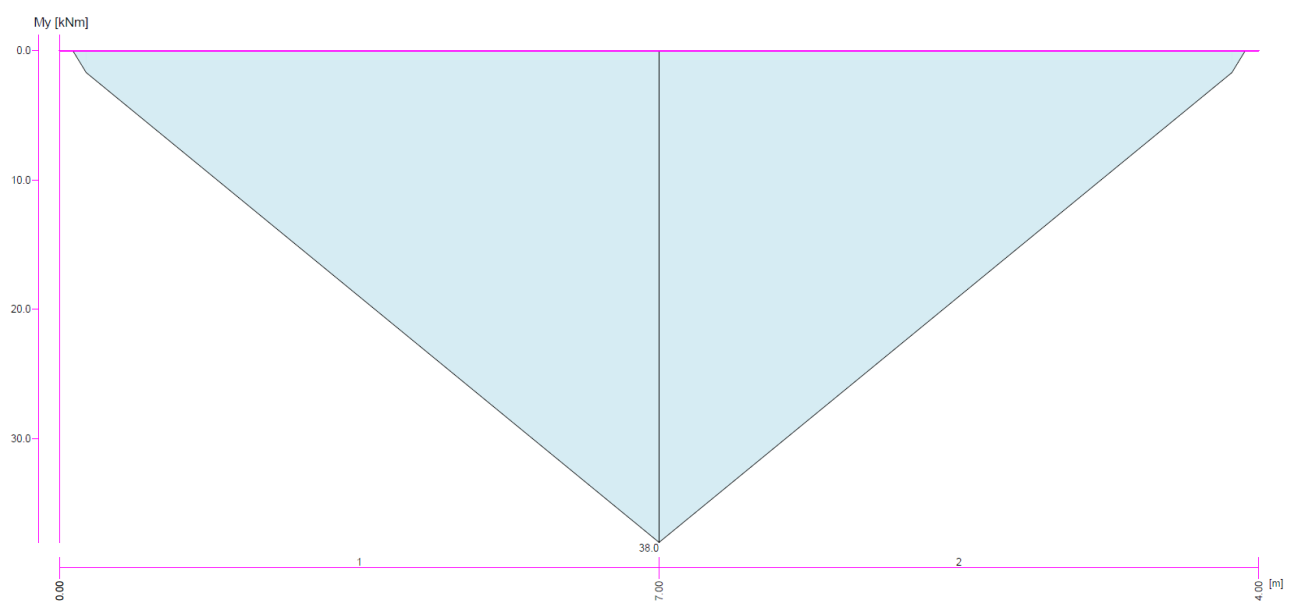
A. 5 pav. Sijos A-3 pirminiai momentai nuo išankstinio apgniuždymo jėgos gauti programiniu paketu „IDEA StatiCa“



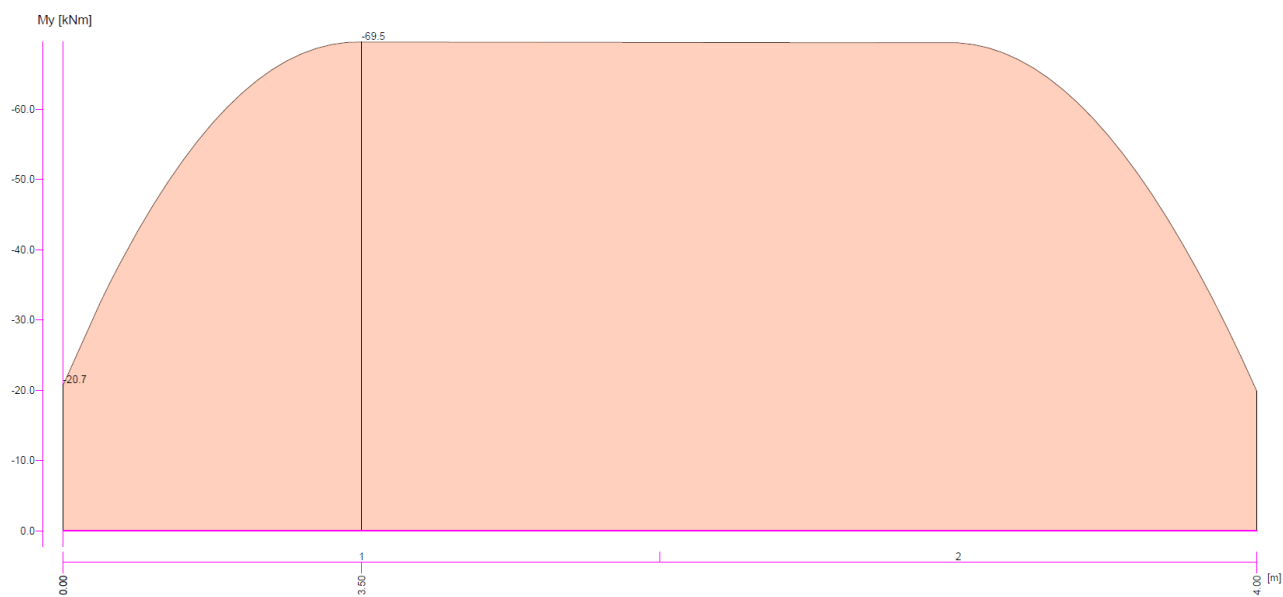
A. 6 pav. Sijos A-3 antriniai momentai gauti programiniu paketu „IDEA StatiCa“



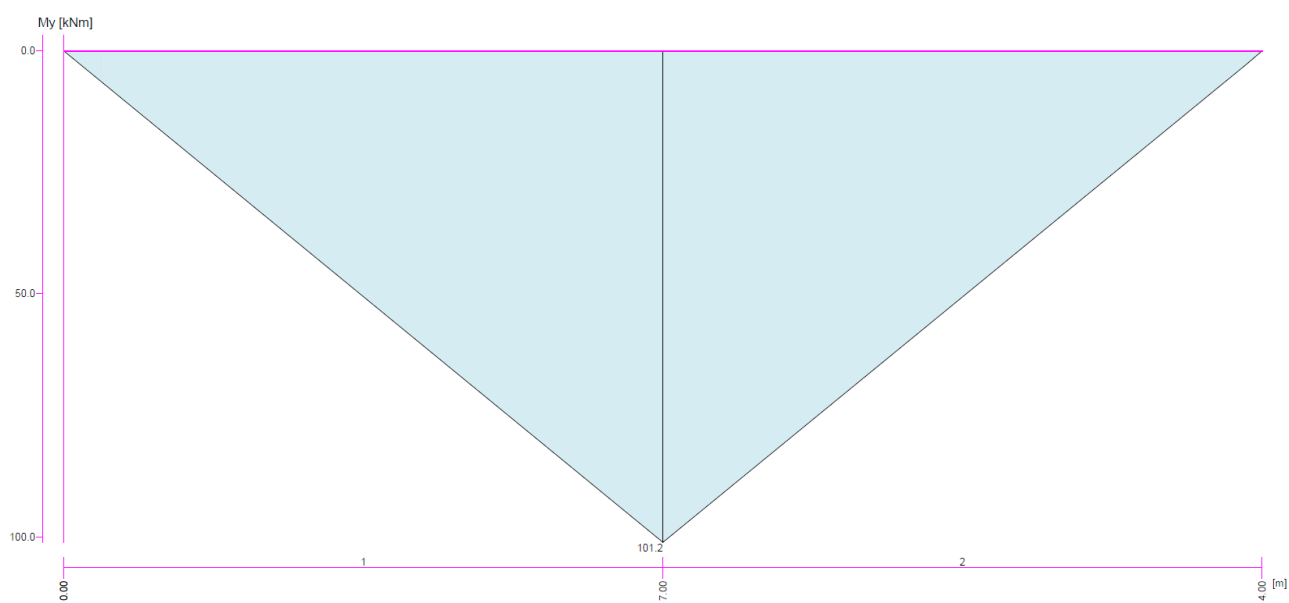
A. 7 pav. Sijos A-4 pirminiai momentai nuo išankstinio apgniuždymo jėgos gauti programiniu paketu „IDEA StatiCa“



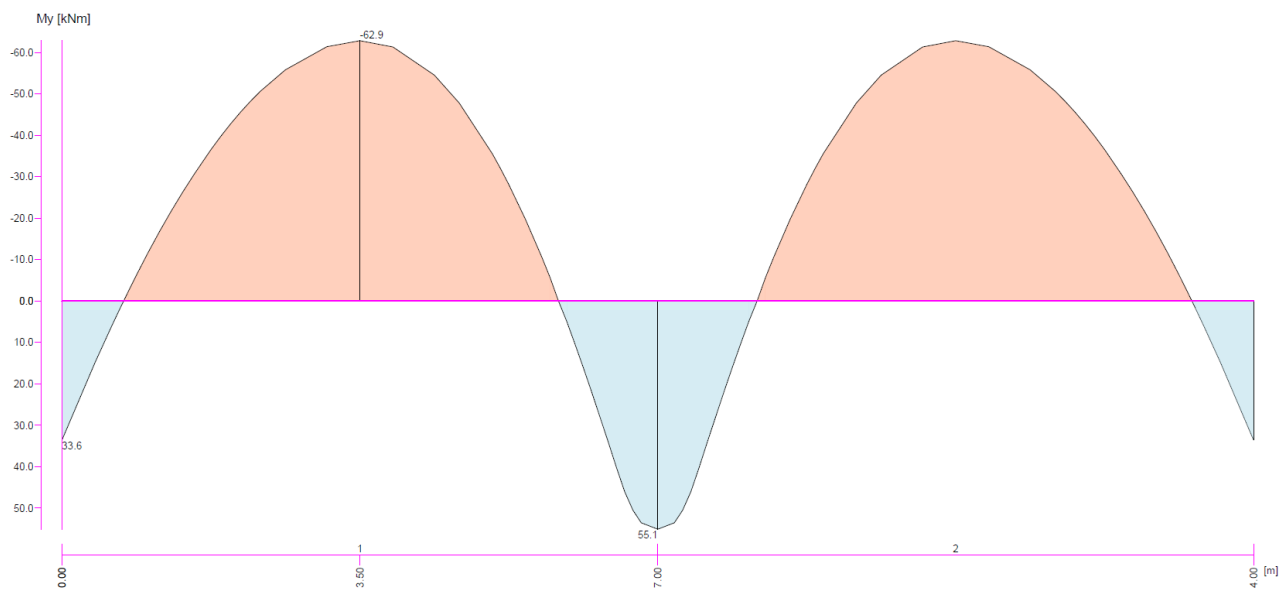
A. 8 pav. Sijos A-4 antriniai momentai gauti programiniu paketu „IDEA StatiCa“



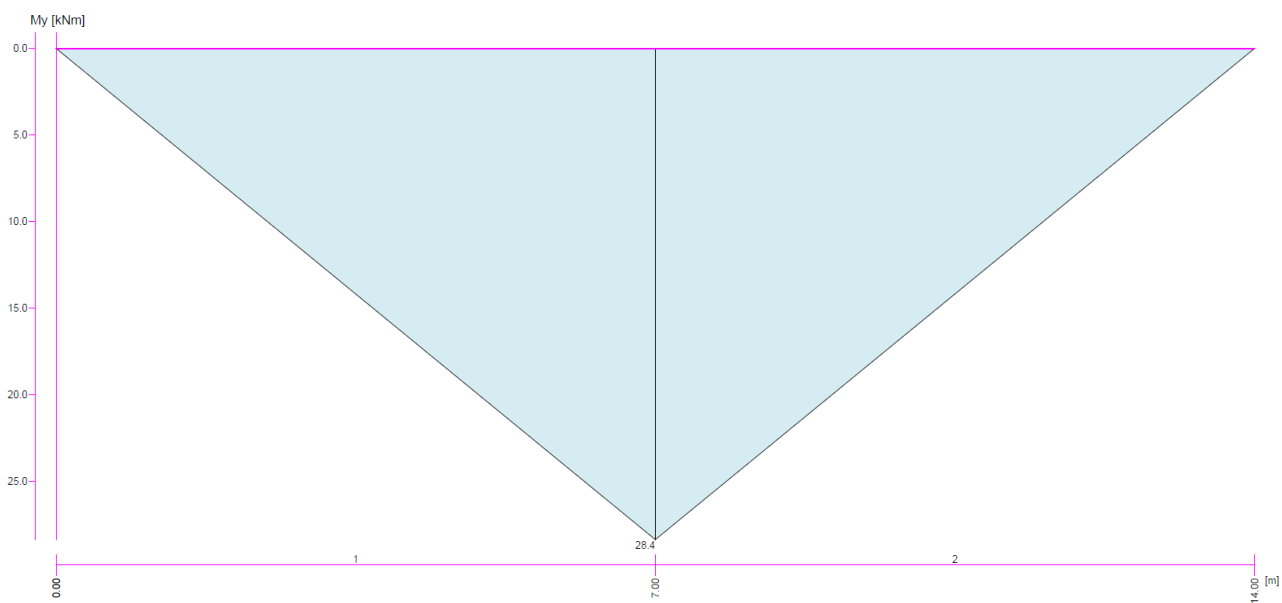
A. 9 pav. Sijos A-5 pirminiai momentai nuo išankstinio apgniuždymo jėgos gauti programiniu paketu „IDEA StatiCa“



A. 10 pav. Sijos A-5 antriniai momentai gauti programiniu paketu „IDEA StatiCa“



A. 11 pav. Sijos A-6 pirminiai momentai nuo išankstinio apgniuždymo jėgos gauti programiniu paketu „IDEA StatiCa“



A. 12 pav. Sijos A-6 antriniai momentai gauti programiniu paketu „IDEA StatiCa“