



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
STATYBOS FAKULTETAS
GELŽBETONINIŲ KONSTRUKCIJŲ IR GEOTECHNIKOS KATEDRA

Vilius Masėnas

**SURENKAMŲ IŠ ANKSTO ĮTEMPTŲ GELŽBETONINIŲ SIJŲ
ATRAMINIO MAZGO SU ĮPJOVA ELGSENOS ANALIZĖ**

**SUPPORTING END BEHAVIOR ANALYSIS OF THE PRECAST
PRESTRESSED CONCRETE DAPPED-END BEAMS**

Baigiamasis magistro darbas

Statinių konstrukcijų studijų programa, valstybinis kodas 6211EX040

Pastatų konstrukcijų specializacija

Statybos inžinerijos studijų kryptis 02T

Vilnius, 2022

Vilniaus Gedimino technikos universitetas Statybos fakultetas Gelžbetoninių konstrukcijų ir geotechnikos katedra	ISBN Egz. sk. Data-.....-.....
Antrosios pakopos studijų Statinių konstrukcijų programos magistro baigiamasis darbas Pavadinimas Surenkamų iš anksto įtemptų gelžbetoninių sijų atraminio mazgo su įpjova elgsenos analizė Autorius Vilius Masėnas Vadovas Juozas Valivonis	
Kalba: lietuvių	
Anotacija Surenkamos iš anksto įtemptos gelžbetoninės sijos su įpjova atraminiame mazge turi daug pranašumų konstrukciniu, ekonominiu ir estetiniu požiūriais lyginant su sijomis be įpjovų. Kaip ir daugelis kitų konstrukcinių sprendinių, mazgai su įpjovomis turi ir trūkumų. Vienas iš tokių trūkumų tai įtemptos armatūros apspaudimo poveikis atraminio mazgo su įpjova laikomajai galiai. Kai įtempta armatūra yra išdėstoma nepratęsiant iki sijos galo, tada vidiniame įpjovos kampe sukeliami pavojingi tempiamieji įtempiai mažina atraminio mazgo ištrižojo pjūvio laikomąją galią. Tiriamasis darbas susideda iš trijų pagrindinių dalių: literatūros analizės, analitinių skaičiavimų ir skaitinės analizės. Literatūros analizėje nagrinėjama literatūros autorių aprašoma sijos su įpjova elgsena ir metodai skirti tokio mazgo skaičiavimui. Analitinių skaičiavimų dalyje atliekama sijos atraminio mazgo su įpjova laikomosios galios ir parametrinė analizės. Skaitinės analizės dalyje sudaromas sijos su įpjova skaitinis modelis, atliekama parametrinė sijos su įtempta ir neįtempta armatūra analizė, nustatomas armatūros įtempimo intensyvumo ir išdėstymo poveikis laikomajai galiai. Skaitinės analizės rezultatai yra lyginami su analitiniais skaičiavimais ir eksperimentiniais rezultatais. Tiriamojo darbo pabaigoje atraminiam mazgui su įpjova pateikiamos rekomendacijos projektavimo metodų pasirinkimui ir įtemptos armatūros išdėstymui. Tiriamąjį darbą sudaro įvadas, paveikslų ir lentelių sąrašai, trys pagrindinės dalys su poskyriais ir skyreliais, išvados, rekomendacijos, literatūros sąrašas ir priedai. Darbo apimtis – 98 p. teksto be priedų, 107 iliustracijos, 4 lentelės, 47 bibliografiniai šaltiniai, 1 priedas.	
Prasminiai žodžiai: Analitinis skaičiavimas, įtemptas gelžbetonis, jungtis su įpjova, netiesinė analizė, parametrinė analizė, sija su įpjova atraminiame mazge, skaitinis modelis, surenkama iš anksto įtempta gelžbetoninė sija.	

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

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

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

Title **Supporting end Behavior Analysis of the Precast Prestressed Concrete Dapped-end Beams**

Author **Vilius Masėnas**

Academic supervisor **Juozas Valivonis**

Thesis language: Lithuanian

Annotation

Precast prestressed reinforced concrete dapped-end beams have many advantages from structural, economic and aesthetic points of view over beams without notches. Like many other structural solutions, dapped-ends also have disadvantages. One of such disadvantages is the effect of reinforcement prestressing on the bearing capacity of the dapped-end beam. When the prestressed reinforcement is arranged without extending to the end of the beam, then dangerous tensile stresses are introduced in the inner corner of the notch which reduce the bearing capacity of such a beam. This research work consists of three main parts: theoretical analysis, analytical calculations and numerical analysis. The theoretical analysis examines the behavior of dapped-end beams described by the authors of the literature and examines methods purposely created for calculation of such beams. In the analytical calculations part, the bearing capacity and parametric analysis of the beam is carried out. In the numerical analysis part, a numerical model of the beam is made, a parametric analysis of the beam with prestressed and non-prestressed reinforcement is carried out, the effect of the prestress intensity and arrangement of the reinforcement on the bearing capacity is determined. The results of numerical analysis are compared with analytical calculations and experimental results. At the end of the research work, recommendations for the dapped-end beams are given for the choice of design methods and for the arrangement of prestressed reinforcement.

Thesis consists of an introduction, lists of figures and tables, three main parts with subdivisions and sections, conclusions, recommendations, references and annexes. Thesis size - 98 p. without the annex, 107 figures, 4 tables, 47 references, 1 annex.

Keywords: Analytical calculation, dapped-end beam, half-joint, nonlinear analysis, numerical model, parametric analysis, precast prestressed concrete, precast prestressed reinforced concrete beam.

TURINYS

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS	5
LENTELIŲ SĄRAŠAS	8
IVADAS	9
1. SURENKAMŲ GELŽBETONINIŲ SIJŲ SU ĮPJOVA TYRIMŲ ANALIZĖ	11
1.1. Elementų su įpjovomis atraminiame mazge praktiniai pavyzdžiai	11
1.2. Atraminio mazgo su įpjova elgsena	17
1.2.1. Sutrikdytos zonos	17
1.2.2. Irties pobūdžiai ir pavojingiausios jėgos	19
1.2.3. Pagrindinių parametrų įtaka	26
1.3. Atraminio mazgo su įpjova laikomosios galios skaičiavimo metodai	32
1.3.1. Šlyties – trinties metodas	32
1.3.2. Stygų ir spyrių modelio metodas	36
1.3.3. Pusiau empirinis santvaros metodas	46
1.3.4. Įstrižojo pjūvio laikomosios galios skaičiavimas pagal EC2	49
2. ANALITINIAI GELŽBETONINIŲ SIJŲ SU ĮPJOVA SKAIČIAVIMAI.....	53
2.1. Analitinė atraminio mazgo laikomosios galios analizė	53
2.2. Analitinė parametrinė analizė	55
3. SKAITMENINĖ GELŽBETONINIŲ SIJŲ SU ĮPJOVA ANALIZĖ.....	67
3.1. Skaitmeninis sijos modeliavimas.....	67
3.2. Skaitmeninė sijos analizė	72
3.3. Skaitmeninė parametrinė analizė.....	75
3.4. Iš anksto įtemptos armatūros įtempių įtakos laikomajai galiai analizė	86
3.5. Iš anksto įtemptos armatūros išdėstymo įtakos laikomajai galiai analizė	89
BENDROSIOS DARBO IŠVADOS.....	93
REKOMENDACIJOS	94
LITERATŪROS SĄRAŠAS.....	95

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Jungčių su įpjova schema tilto konstrukcijoje (Micheloni et al., 2018)	11
1.2 pav. T formos sija su įpjovomis panaudota tilto konstrukcijoje (Katorisi, 2011)	12
1.3 pav. De la Concorde tilto griūtis (Lau, 2016).....	12
1.4 pav. I formos skerspjuvio tiltinė sija su įpjova (Bastian, 2017)	12
1.5 pav. Sijos su įpjovomis surenkamame gelžbetoniniame rėme (Precast Thailand, 2019).....	13
1.6 pav. Sija su įpjova atremta ant kolonos gembės (archiexpo.com, 2019).....	13
1.7 pav. Sijos su įpjova, atremtos ant kolonos gembės, schema	14
1.8 pav. Sija su įpjova požeminėje automobilių stovėjimo aikštelėje Vilniuje.....	14
1.9 pav. Sija su įpjova kaip įterptinė sija (Elliot, 2016)	15
1.10 pav. Įterptinės sijos su įpjova schema (Asso, 2020).....	15
1.11 pav. Sija su įpjova <i>Žalgirio</i> arenos automobilių stovėjimo aikštelėje Kaune	15
1.12 pav. Sijos su įpjova, atremtos ant apverstos T formos sijos (Precast Thailand, 2019).....	16
1.13 pav. Sijos su įpjova, atremtos ant L formos sijos (Hussain & Shakir, 2019).....	16
1.14 pav. Briautos TT plokštės su įpjovomis (Holly & Abrahoim, 2020)	16
1.15 pav. Briautos TT plokštės, atremtos ant apverstų T formos sijų prekybos ir laisvalaikio centre „Panorama“, Vilniuje.....	17
1.16 pav. Briautos TT plokščių su įpjova atrėmimo schema (Conceptual Design..., 2010).....	17
1.17 pav. San Venano principas (Shah et al., 2011).....	18
1.18 pav. Sutrikdytų zonų pavyzdžiai (ACI Committee 318, 2019)	18
1.19 pav. Įtempių koncentracija pagal įpjovos aukščio ir šlyties zonos ilgio santykį (Huang, 2000).....	19
1.20 pav. Penki suirimo būdai (pagal PCI Design Handbook, 2010).....	20
1.21 pav. Kontrolinė sija (kairėje) ir palyginamoji sija (dešinėje) (Desnerck et al., 2016).....	21
1.22 pav. 1 pobūdžio suirimas (Mohammed et al., 2019)	21
1.23 pav. 2 pobūdžio suirimas (Desnerck et al., 2016)	22
1.24 pav. 4 pobūdžio suirimas (Mohammed et al., 2019)	22
1.25 pav. Lu ir kt. tyrimo tipinė mazgo schema (Lu et al., 2003)	22
1.26 pav. Lu ir kt. tyrimo tipinis mazgo suirimas (Lu et al., 2003).....	23
1.27 pav. Wango tyrimo tipinė mazgo armavimo ir apkrovimo schema (Wang, 2005)	23
1.28 pav. Wango tyrimo bandinių suirimo pobūdžiai (Wang, 2005)	23
1.29 pav. Mohammedo ir kt. kontrolinė armavimo schema ir bandinys su pažymėta kompozitinio mišinio zona (Mohammed et al., 2019).....	24
1.30 pav. Botroso et al bandinių tipinė schema (Botros et al., 2017).....	24
1.31 pav. Sijos atraminio mazgo su įpjova suirimą lemiantys poveikiai	25
1.32 pav. Tipinio mazgo su įpjova supaprastinta schema	27
1.33 pav. Bandinių be vertikalios skersinės armatūros suirimas (Mohammed et al., 2019)	29
1.34 pav. Jėgos veikiančios tašką „A“ vidiniame įpjovos kampe (pagal Werner & Dilger, 1973)	30
1.35 pav. Tipinė Mattocko ir Theryo sijos schema (Mattock & Theryo, 1986).....	31
1.36 pav. Mattocko ir Theryo C tipo sijų schema (pagal Mattock & Theryo, 1986).....	31
1.37 pav. Apverstos kolonos gembės ir sijos su įpjova palyginimas (Mattock & Chan, 1979)....	33
1.38 pav. Rekomenduojama armavimo schema mazgui su įpjova (PCI Design Handbook, 2010)	33
1.39 pav. Sijos su įpjova padalinimas į zonas	36
1.40 pav. Pavyzdinio elemento schema (kairėje) ir principinių įtempių kryptys iš tiesinės BE analizės (dešinėje) (Goodchild et al., 2014)	37
1.41 pav. Pavyzdinio elemento STM (Goodchild et al., 2014)	37

1.42 pav. Pakoreguotas mazgo su įpjova spyrio kampas (ACI Committee 318, 2019)	38
1.43 pav. Pavyzdinis EC2 jungties su įpjova modelis (LST EN 1992-1-1, 10.4 pav.)	39
1.44 pav. Pavyzdinis fib jungties su įpjova modelis (pagal fib International Federation..., 2013)	39
1.45 pav. Supaprastintas STM modelis pagal Mattocką (pagal Mattock, 2012).....	39
1.46 pav. Cooko ir Mitchello pasiūlytas STM modelis (pagal Cook and Mitchell, 1988).....	39
1.47 pav. Schlaicho ir Schäferio pasiūlytas STM modelis (pagal Schlaich and Schäfer, 2001)...	40
1.48 pav. Prizminiai (kairėje) ir butelio formos (dešinėje) spyriai (Goodchild et al., 2014)	41
1.49 pav. Dalinis netolydumas (LST EN 1992-1-1, 6.25 pav.).....	42
1.50 pav. Visiškas netolydumas (LST EN 1992-1-1, 6.25 pav.).....	42
1.51 pav. GGG mazgas pagal EC2 (Goodchild et al., 2014).....	44
1.52 pav. GGT mazgas pagal EC2 (Goodchild et al., 2014)	44
1.53 pav. GTT mazgas pagal EC2 (Goodchild et al., 2014).....	45
1.54 pav. Vidinės jėgos sijų su įpjova atraminiuose mazguose (Wang et al., 2005)	47
2.1 pav. Lu ir kt. bandinio Nr. 10 schema (matmenys nurodyti <i>mm</i>)	53
2.2 pav. Lu ir kt. bandinio atraminio mazgo schema (matmenys nurodyti <i>mm</i>).....	54
2.3 pav. Laikomosios galios skaičiavimo rezultatų palyginimas	54
2.4 pav. Laikomosios galios skaičiavimo rezultatų paklaidos palyginimas	55
2.5 pav. Mazgo kintamųjų schema parametrinei analizei	56
2.6 pav. Įpjovos aukščio įtaka laikomajai galiai.....	56
2.7 pav. Įpjovos aukščio įtaka laikomosios galios pokyčiui	57
2.8 pav. a/d santykio įtaka laikomajai galiai.....	58
2.9 pav. la/lip santykio įtaka laikomajai galiai	59
2.10 pav. la/lip santykio įtaka laikomosios galios pokyčiui.....	60
2.11 pav. Betono stiprio įtaka laikomajai galiai	61
2.12 pav. Betono stiprio įtaka laikomosios galios pokyčiui.....	62
2.13 pav. Avh armatūros kiekio įtaka laikomajai galiai	63
2.14 pav. Avh armatūros kiekio įtaka laikomosios galios pokyčiui.....	64
2.15 pav. Armatūros įtempimo intensyvumo įtaka laikomajai galiai.....	64
2.16 pav. Armatūros įtempimo intensyvumo įtaka laikomosios galios pokyčiui.....	65
3.1 pav. Sijos modelis.....	67
3.2 pav. Betono gniuždomoji kreivė <i>Parabolic</i> (DIANA FEA BV, 2015)	68
3.3 pav. Betono tempiamoji kreivė <i>Exponential</i> (DIANA FEA BV, 2015).....	68
3.4 pav. Armatūros išdėstymas modelyje	70
3.5 pav. Baigtinių elementų tinklas	71
3.6 pav. Įtemptos armatūros lynai.....	71
3.7 pav. Skaitinė ir eksperimentinė įlinkių nuo apkrovos priklausomybė.....	72
3.8 pav. Tipinis Lu ir kt. eksperimento suirimas (Lu et al., 2003)	73
3.9 pav. Skaitinio modelio pleišėjimas esant maksimaliai apkrovai	73
3.10 pav. Principiniai gniuždomieji įtempiai esant maksimaliai apkrovai.....	74
3.11 pav. Eksperimentinės, analitinės ir skaitinės laikomosios galios palyginimas.....	74
3.12 pav. Eksperimentinės, analitinės ir skaitinės laikomosios galios santykinis skirtumas.....	75
3.13 pav. Įpjovos aukščio įtaka laikomajai galiai.....	76
3.14 pav. Įpjovos aukščio įtaka laikomosios galios pokyčiui	77
3.15 pav. Įpjovos aukščio įtaka laikomajai galiai įtempus armatūrą.....	77
3.16 pav. a/d santykio įtaka laikomajai galiai.....	78
3.17 pav. a/d santykio įtaka laikomajai galiai įtempus armatūrą.....	79
3.18 pav. la/lip santykio įtaka laikomajai galiai	79
3.19 pav. la/lip santykio įtaka laikomosios galios pokyčiui	80

3.20 pav. la/lip santykio įtaka laikomajai galiai įtempus armatūrą	80
3.21 pav. Betono stiprio įtaka laikomajai galiai	81
3.22 pav. Betono stiprio įtaka laikomosios galios pokyčiui	82
3.23 pav. Betono stiprio įtaka laikomajai galiai įtempus armatūrą	82
3.24 pav. Skersinės armatūros kiekio įtaka laikomajai galiai.....	83
3.25 pav. Skersinės armatūros kiekio įtaka laikomosios galios pokyčiui	83
3.26 pav. Skersinės armatūros kiekio įtaka laikomajai galiai įtempus armatūrą.....	84
3.27 pav. Pleišėjimo apkrovos priklausomybė nuo skerspjuvio apspaudimo santykio.....	85
3.28 pav. Vidutiniai plyšių pločiai po 1250 MPa įtemptos armatūros atleidimo	86
3.29 pav. Modifikuotas skaitinis modelis.....	86
3.30 pav. Modifikuoto modelio deformacijos ir pleišėjimas.....	87
3.31 pav. Modifikuoto modelio deformacijos ir pleišėjimas armatūrą įtempus 1000 MPa	87
3.32 pav. Laikomosios galios priklausomybė nuo σ_{cp} / f_c santykio	88
3.33 pav. Laikomosios galios pokyčio priklausomybė nuo σ_{cp} / f_c santykio.....	88
3.34 pav. Skaitinis modelis su įstriža įtempta armatūra	89
3.35 pav. Laikomosios galios priklausomybė nuo σ_{cp} / f_c santykio	90
3.36 pav. Laikomosios galios pokyčio priklausomybė nuo σ_{cp} / f_c santykio.....	90
3.37 pav. Suirimas neįtempus armatūros (viršuje) ir įtempus (apačioje)	91

LENTELIŲ SĄRAŠAS

3.1 lentelė. Betono modelis ir savybės	69
3.2 lentelė. Armatūros savybės.....	70
3.3 lentelė. Iš anksto įtemptos armatūros savybės.....	71
3.4 lentelė. Įtempimo intensyvumo įtaka pleišėjimui.....	85

IVADAS

Surenkamas įtemptas gelžbetonis dėl daugelio pranašumų naudojamas vietoje monolitinio gelžbetonio. Pagrindiniai aspektai – tai laiko ir energijos atžvilgiu efektyvesnė statyba, konstrukcijų gebėjimas atlaikyti didesnes apkrovas, tenkinant tinkamumo reikalavimus, ir konstrukcijų gamybos statybos aikštelėje klaidų minimizavimas. Tam, kad surenkamų gelžbetoninių elementų konstrukcijos būtų saugios, patvarios ir efektyvios, vienas esminių faktorių yra tinkamai suprojektuotos ir įrengtos jungtys tarp elementų. Viena iš tokių jungčių, naudojamų daugiaaukščiams pastatams ir tiltams, yra įpjautasis sijos galas, kuris formuojamas išpjovus apatinį sijos kampą ir atraminę vietą perkeliančią aukštesnę skerspjuvio tašką (Shakir, 2018). Tai suteikia konstrukcijai keletą reikšmingų privalumų. Atremiant įpjautą sijos galą ant kolonos gembės, apverstą T formos siją arba L formos briauną, galima ženkliai apriboti elemento konstrukcinį aukštį, bendrą pastato aukštį ir pastato savąjį svorį (Aswin et al., 2015). Taip sumažinamas apdailos, laikančiųjų konstrukcijų medžiagų poreikis, be to, sumažėja darbų sąnaudos, todėl sijos su įpjautu galu leidžia vystyti tvaresnę ir efektyvesnę statybą. Tokia sijos jungtis suteikia pranašumų ne tik bendrai konstrukcijai, bet ir individualiam elementui, kadangi, pakėlus elemento atraminę tašką ir sumažinus jo paties konstrukcinį aukštį atraminiame gale, individualaus elemento horizontalusis stabilumas ženkliai padidėja (Mattock & Chan, 1979). Be to, įleidžiant atraminę konstrukciją į sijos išpjovą pasiekiamas ir geresnis estetiškas vaizdas. Nors šie jungties privalumai lemia jos dažną naudojimą statybos praktikoje ir projektavime, tačiau tyrimų, apie atraminio mazgo elgseną, kai sijoje naudojama iš anksto įtempta armatūra, yra atlikta nedaug.

Staigus skerspjuvio geometrijos pokytis įpjautame sijos gale sukelia sudėtingą deformacijų pasiskirstymą zonoje aplink vidinį įpjovos kampą (Aswin et al., 2015). Elemento dalis, kuri turi šiuos geometrinius netolygumus, vadinama sutrikdyta zona (angl. *disturbed region*). Palyginti su kitomis elemento dalimis, sutrikdyti regionai įprastai suyra pirmiau ir yra linkę suirti dažniau dėl šlyties jėgų, nei lenkimo (Shah et al., 2011). Svarbus veiksnys, į kurį reikia atsižvelgti, yra tai, kad šlyties irtis gali įvykti staiga, o tokio tipo irties pobūdis retai turi ankstyvųjų išpėjamųjų ženklų (Aswin et al., 2019), tačiau, dėl įtempių pasiskirstymo sudėtingumo, tiksliai nustatyti maksimalią laikomąją galią, taikant įprastus projektavimo metodus, yra beveik neįmanoma. Štai kodėl sijos su įpjovomis atraminiame mazge projektuojamos taikant vieną iš dviejų pagrindinių metodų – šlyties ir trinties metodą, aprašytą Surenkamo iš anksto įtempto gelžbetonio instituto (angl. *Precast Prestressed Concrete Institute*, toliau – PCI) rekomendacijose, arba skirtingus spyrių ir stygų modelius (angl. *strut-and-tie models*, toliau STM) naudojamus daugelyje tarptautinių projektavimo normų, tokių kaip Amerikos betono instituto (angl. *American Concrete Institute*,

toliau – ACI), Tarptautinės konstrukcinio betono federacijos (angl. *International Federation for Structural Concrete*, toliau – fib) ir Europos gelžbetoninių konstrukcijų projektavimo normų (angl. *Eurocode 2*, toliau – EC2). Kiekvienas modelis šį sudėtingą įtempių būvį sijoje užfiksuoja skirtingai, tačiau, prie sijos pridėjus iš anksto įtemptos armatūros apspaudžiamąją jėgą, įtempių pasiskirstymas tampa dar netiesiškesnis ir rezultatų tikslumas mažėja.

Tyrimais ne kartą nagrinėta neįtemptų sijų su įpjovomis elgsena, tačiau nedaugeliu tyrimų analizuota, kaip skirtingas išankstinio įtempimo intensyvumas ir įvairus iš anksto įtemptos armatūros išdėstymas – tiesios ar įstrižos – veikia tokios sijos elgseną. Neginčytina, kad apspaudimo jėgai apgniuždant įstrižąją pjūvį, didėja įstrižojo pjūvio galia. Problema kyla tada, kai iš anksto įtempta armatūra yra išdėstyta taip, kad apspaudimo jėga vidiniame įpjovos kampe sukelia tempimą ir įstrižojo pjūvio galia mažėja. Daugelyje tyrimų įtempta armatūra yra pratęsiama iki sijos galo virš įpjovos, todėl pleišėjimo ir įstrižojo pjūvio laikomoji galia didėja. Be to, dažniausiai tyrimuose atliekami bandymai T formos sijoms, o stačiakampio skerspjuvio sijai tyrimų trūksta. Tyrimų kiekis apie įstrižojo pjūvio irimą, kuomet iš anksto įtempta armatūra išdėstoma pilno aukščio skerspjuvio dalyje ir įtempimas atliekamas prie įpjovos krašto, yra nepakankamas.

Šio tiriamojo darbo tikslas yra atlikti iš anksto įtemptų sijų su įpjova analizę, nustatant kaip iš anksto įtemptos armatūros apspaudimo jėga veikia atraminio mazgo elgseną.

Darbo uždaviniai:

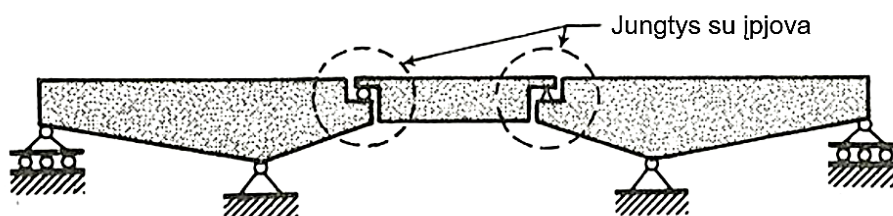
1. Išanalizuoti literatūrą, kurioje aprašomas tokio tipo mazgas, jo elgsena ir skaičiavimo metodai.
2. Iš literatūroje aprašytų tyrimų pasirinkti eksperimento bandinį ir pagal pasirinktus metodus atlikti analitinę laikomosios galios skaičiavimus bei parametrinę analizę.
3. Naudojant baigtinių elementų analizės programinį paketą DIANA FEA sumodeliuoti eksperimentą ir atlikti analizę skaitiniu būdu.
4. Palyginti analitinių skaičiavimų rezultatus su skaitiniais ir su literatūroje aprašoma mazgo elgsena.

Jaunųjų mokslininkų konferencijoje „Mokslas – Lietuvos ateitis“ šio tiriamojo darbo tema buvo skaitytas pranešimas (žr. A priedą).

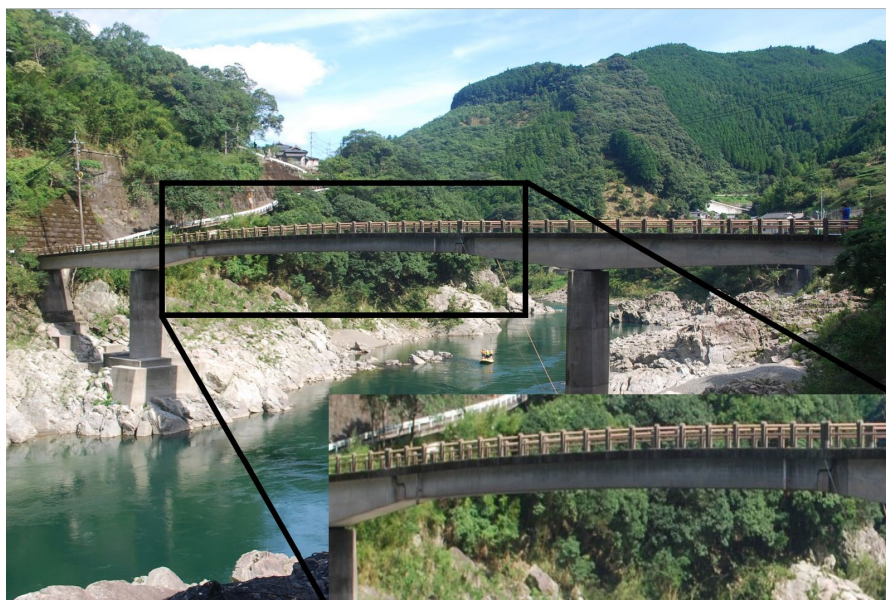
1. SURENKAMŲ GELŽBETONINIŲ SIJŲ SU ĮPJOVA TYRIMŲ ANALIZĖ

1.1. Elementų su įpjovomis atraminiame mazge praktiniai pavyzdžiai

Elementai, turintys įpjovas atraminiuose mazguose, praktikoje aptinkami įvairiomis formomis ir yra naudojami daugelyje skirtingo tipo konstrukcijų. Tiltų konstrukcijose dažniausiai naudojamos T formos sijos kaip įterptinės sijos, nulinio lenkimo momento taške prijungiant prie gretimų konstrukcijų pasitelkiant jungtį su įpjova (žr. 1.1 ir 1.2 pav.). Būtent tokio tipo jungtis, tačiau ne T formos sijos, o dėžinio skerspjūvio sijos, buvo įrengta 2006 metais sugriuvusio Concorde tilto suirimo taške (Mitchell et al., 2010). Po 36 metų eksploatacijos tiltas sugriuvo. Griūties metu žuvo penki po tiltų buvę žmonės, o dar šeši, buvę ant tilto, buvo sužeisti (žr. 1.3. pav.). Nustatyta, kad dėl nepakankamo armatūros inkaravimo ir netinkamo armatūros išdėstymo tarp skersinės ir išilginės armatūros buvo suformuota silpna tempiama zona, kuri per laiką degradavus betonui staiga suiro įstrižajame pjūvyje (Mitchell et al., 2010). Tai paskatino tirti, kaip įvairūs veiksniai ir parametrai veikia mazgo su įpjova elgseną, ir todėl yra svarbu ištirti neigiamą efektą laikomajai galiai sukeliančius poveikius. Jungčių su įpjovomis yra ir kitokių, tačiau elgsena tarp skirtingų tipų yra panaši arba dėsningai atsikartojanti. Tiltų konstrukcijose galima aptikti kitokio tipo elementų su įpjova, pavyzdžiui, didelio aukščio stačiakampio skerspjūvio arba I formos skerspjūvio sijų su įpjovomis, atremtų ant kolonų ar kitokio tipo atramų (žr. 1.4 pav.)



1.1 pav. Jungčių su įpjova schema tilto konstrukcijoje (Micheloni et al., 2018)



1.2 pav. T formos sija su įpjovomis panaudota tilto konstrukcijoje (Katorisi, 2011)



1.3 pav. De la Concorde tilto griūtis (Lau, 2016)



1.4 pav. I formos skerspjūvio tiltinė sija su įpjova (Bastian, 2017)

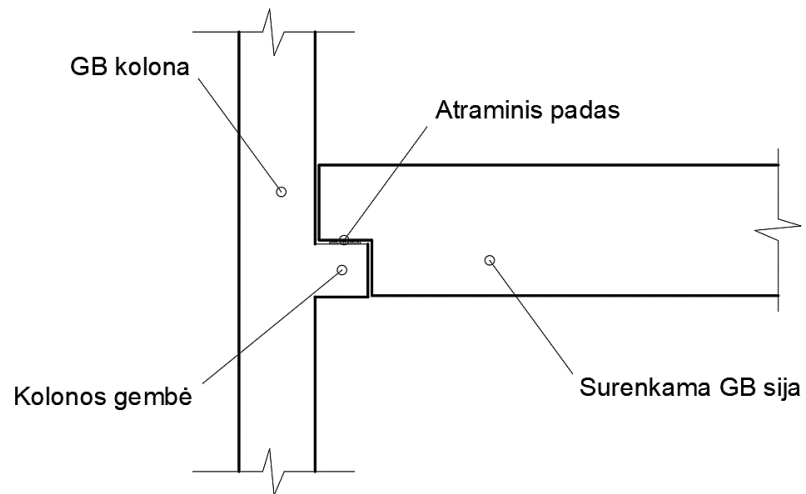
Jungtys su įpjovomis dažnai projektuojamos surenkamo gelžbetonio rėmuose (žr. 1.5 pav.). Įprastai tai sijos, atremtos ant įvairių konstrukcijų, kurios įleidžiamos į mazgo įpjovą. Viena dažniausiai aptinkamų jungčių – tai sijos atrėmimas ant kolonos gembės (žr. 1.6 ir 1.7 pav.). Ši jungtis dažnai naudojama pastatuose, kur didelis konstrukcinis lubų aukštis yra nepageidautinas, tačiau dėl didelių apkrovų nėra galimybės įrengti žemesnės sijos (žr. 1.8).



1.5 pav. Sijos su įpjovomis surenkamame gelžbetoniniame rėme (Precast Thailand, 2019)



1.6 pav. Sija su įpjova atremta ant kolonos gembės (archiexpo.com, 2019)



1.7 pav. Sijos su įpjova, atremtos ant kolonos gembės, schema

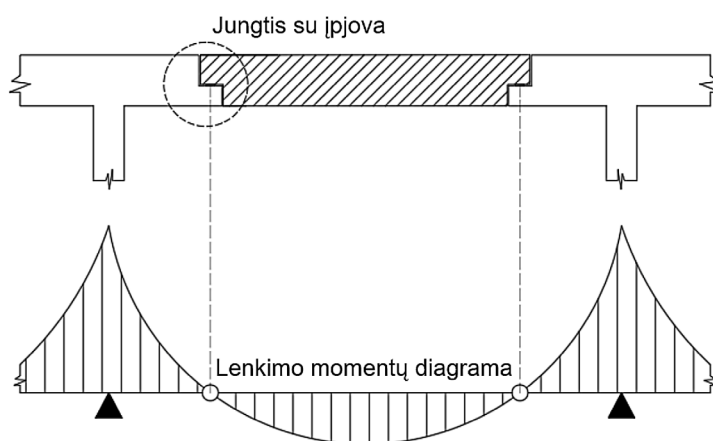


1.8 pav. Sija su įpjova požeminėje automobilių stovėjimo aikštelėje Vilniuje

Pastatuose neretai pasitaiko ir anksčiau minėtų įterptinių sijų, kai sijos jungiamos su kitomis sijomis nulinio lenkimo momento zonoje (žr. 1.9, 1.10 ir 1.11 pav.). Taip pat sijos yra atremiamos ir ant kitokio tipo atramų – apverstų T arba L formos sijų (žr. 1.12 ir 1.13 pav.).



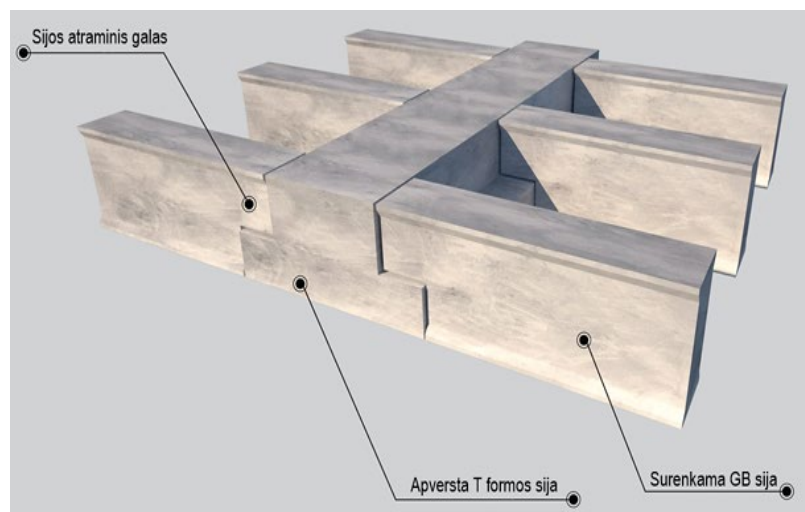
1.9 pav. Sija su įpjova kaip įterptinė sija (Elliot, 2016)



1.10 pav. Įterptinės sijos su įpjova schema (Asso, 2020)



1.11 pav. Sija su įpjova Žalgirio arenos automobilių stovėjimo aikštelėje Kaune



1.12 pav. Sijos su įpjova, atremtos ant apverstos T formos sijos (Precast Thailand, 2019)



1.13 pav. Sijos su įpjova, atremtos ant L formos sijos (Hussain & Shakir, 2019)

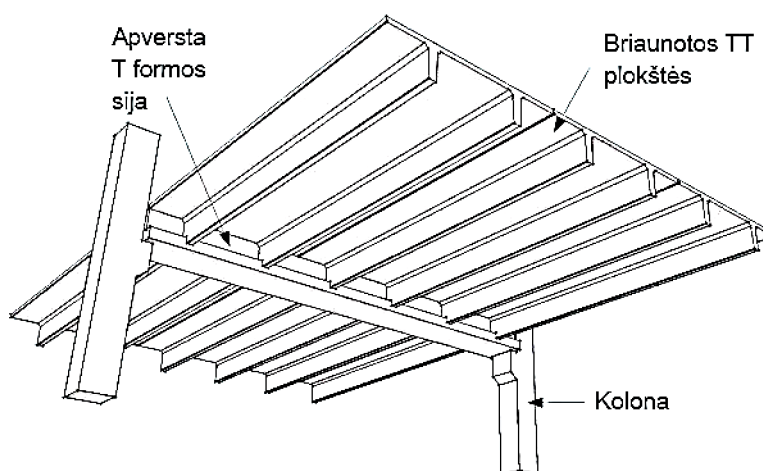
Dažnai naudojamas elementas su įpjova – briaunotos TT plokštės. Kai šis elementas yra naudojamas statiniuose, kur naudinga apriboti konstrukcinį aukštį, neretai apatiniuose kampuose padaromos įpjovos (žr. 1.14 pav.) ir tokios plokštės įprastai yra atremiamos į apverstos T formos arba L formos sijas (žr. 1.15 ir 1.16 pav.).



1.14 pav. Briaunotos TT plokštės su įpjovomis (Holly & Abrahoim, 2020)



1.15 pav. Briaunos TT plokštės, atremtos ant apverstų T formos sijų prekybos ir laisvalaikio centre „Panorama“, Vilniuje



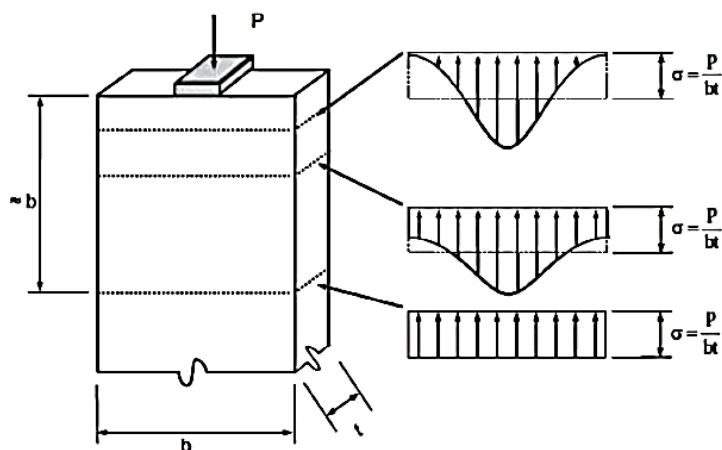
1.16 pav. Briaunotų TT plokščių su įpjova atrėmimo schema (Conceptual Design..., 2010)

1.2. Atraminio mazgo su įpjova elgsena

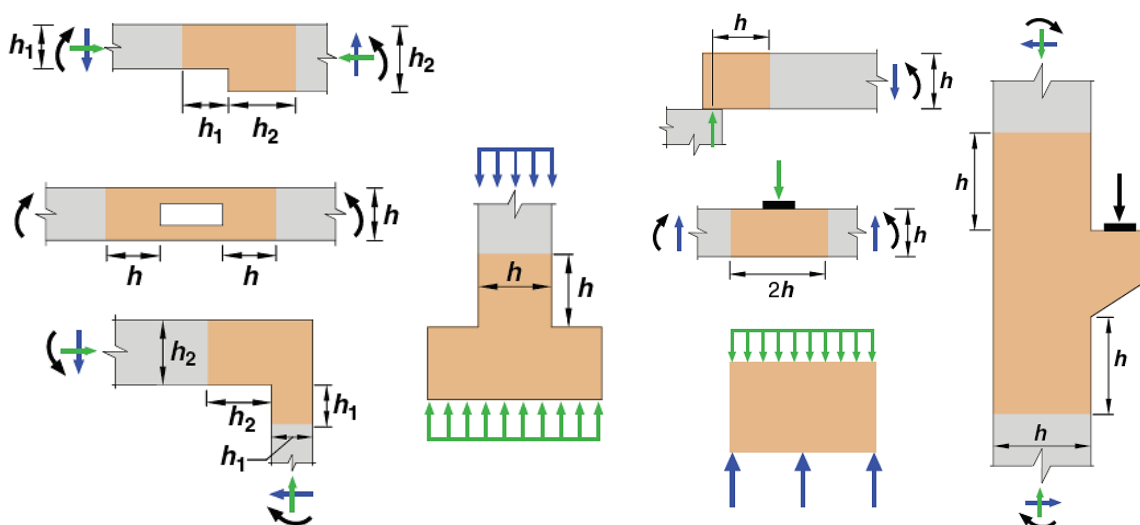
1.2.1. Sutrikdytos zonos

Plokščiųjų pjūvių (Bernulio) hipotezė teigia, kad elementui deformuojantis jo skerspjūvis išlieka plokščias ir statmenas strypo ašiai. Priimta, kad tokiam skerspjūvyje įtempiai ir deformacijos yra pasiskirstę tiesiškai ir tose elemento dalyse galioja klasikinė sijų teorija. Tokios charakteristikos elemento zona yra vadinama sijine zona (angl. *beam region* arba *B-region*, toliau – B-zona). Konstrukcijose arba atskirose jų zonose, kur pasireiškia staigus geometrinis arba

apkrovimo nevientisumas, įtempiai ir deformacijos pasiskirsto netiesiškai, nes elementui deformuojantis, skerspjūvis neišlieka plokščias ir statmenas strypo ašiai, todėl Bernulio hipotezė jose nebegalioja (Shah et al., 2011). Tokios elgsenos ruožai vadinami sutrikdytomis zonomis (angl. *disturbed regions* arba *D-regions*, toliau – D-zonos), kurios yra linkusios suirti dažniau nuo šlyties poveikio, nei lenkimo (Shah et al., 2011). Apkrovos netiesiškumas gali būti koncentruota apkrova arba atraminė reakcija, o geometrinis nevientisumas – tai staigus elemento skerspjūvio pasikeitimas, pavyzdžiui, anga arba įpjova elemente. Atraminis mazgas su įpjova atitinka abi šias sąlygas, todėl realus įtempių pasiskirstymas mazge yra labai netiesiškas. Atstumas, kuriame pasireiškia šis netiesiškumas, gali būti nustatytas pagal San Venano principą (žr. 1.17 pav.) – įtempiai pasiskirsto tiesiškai apytiksliai skerspjūvio aukščio atstumu h nuo netiesiškumą sukeliančios sąlygos (ACI Committee 318, 2019). Skirtingų atvejų pavyzdys parodytas 1.18 paveiksle. Elementų dalys, esančios už atstumo h , yra B-zonos ir gali būti projektuojamos kaip įprasti lenkimo elementai.

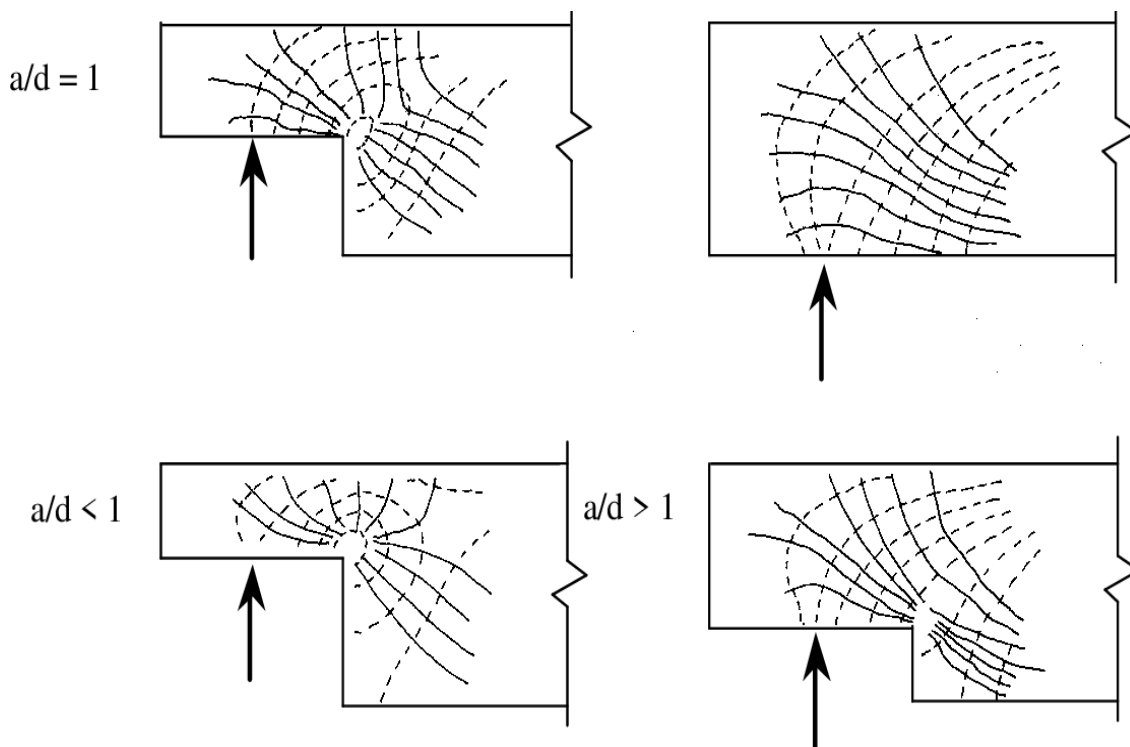


1.17 pav. San Venano principas (Shah et al., 2011)



1.18 pav. Sutrikdytų zonų pavyzdžiai (ACI Committee 318, 2019)

Netiesiškumo intensyvumas mazge su įpjova priklauso tiek nuo sutelktos apkrovos dydžio, tiek nuo įpjovos aukščio. Huangas savo darbe atvaizduoja įtempių koncentraciją įpjovos vidiniame kampe pagal šlyties zonos ilgio (atstumas nuo vertikalios reakcijos iki skersinės armatūros, išdėstytos prie įpjovos krašto, ašinės centro linijos) ir efektyviojo įpjovos aukščio santykį – kuo įpjova didesnė, tuo sudėtingesnis įtempių pasiskirstymas (žr. 1.19 pav.) (Huang, 2000).



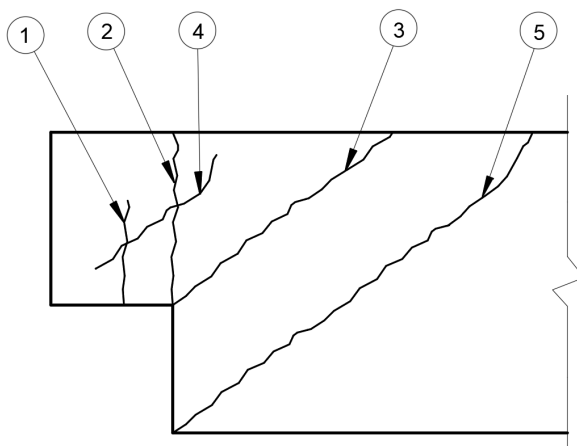
1.19 pav. Įtempių koncentracija pagal įpjovos aukščio ir šlyties zonos ilgio santykį (Huang, 2000)

Negana to, elemento zona laikoma sutrikdyta jau vien tada, kai joje veikia apspaudimo jėga nuo iš anksto įtemptos armatūros (Shah et al., 2011). Taigi, nagrinėjamame elemento mazge pasireiškia labai sudėtingas įtempių būvis ir tokio mazgo skaičiavimas įprastais metodais duotų klaidingus rezultatus. Tai lėmė, kad tokių sijų projektavimui yra taikomi du pagrindiniai metodai – PCI šlyties-trinties metodas arba STM metodas, nurodytas daugelyje tarptautinių projektavimo normų, kurie įvertina sudėtingą įtempių pasiskirstymą skerspjuvyje ir būdingus tokio mazgo suirimo pobūdžius, aprašytus kitame poskyryje.

1.2.2. Irties pobūdžiai ir pavojingiausios jėgos

Sijų su įpjovomis atramoje projektavimas yra pagrįstas suirimo pobūdžio įvertinimu. Nesvarbu, koks projektavimo metodas yra taikomas – šlyties-trinties ar STM, skaičiavimo

modeliai yra sudaryti taip, kad įvertintų būdingus tokio mazgo suirimus. PCI aprašo penkis galimus suirimo būdus (žr. 1.20 pav.).

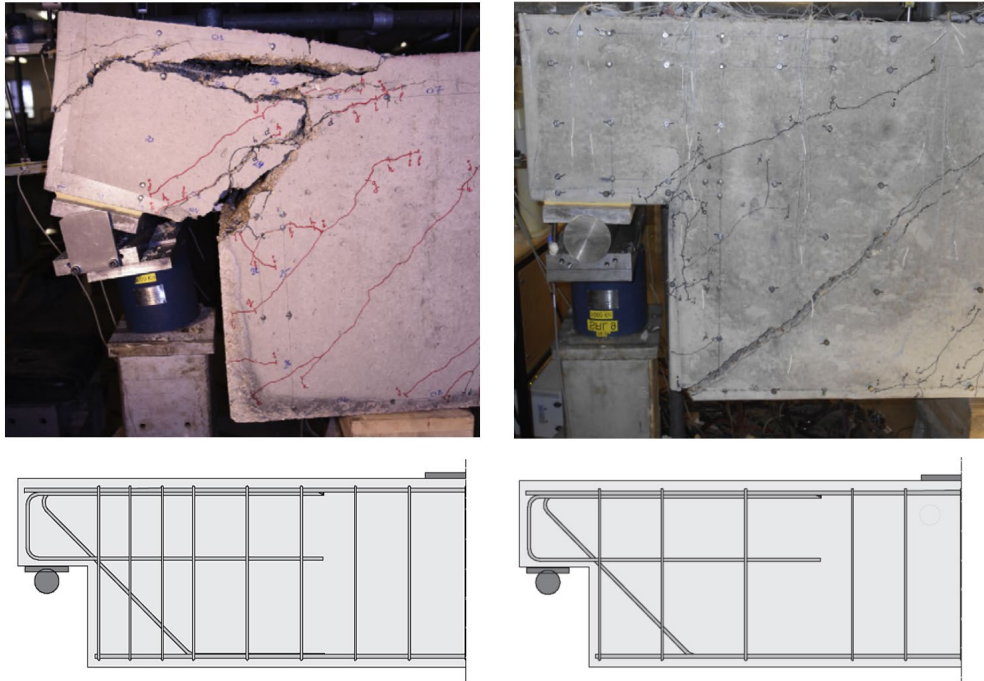


1.20 pav. Penki suirimo būdai (pagal PCI Design Handbook, 2010)

Pagal PCI šie suirimai apibūdinami taip (PCI Design Handbook, 2010):

1. Suirimas dėl gembinio lenkimo ir pratęstojo sijos galo ašinio tempimo.
2. Suirimas dėl tiesioginės šlyties ties sandūra tarp pratęstojo galo ir pilno aukščio skerspjūvio.
3. Suirimas dėl įstrižojo tempimo sukonzentruoto ties vidiniu įpjovos kampu.
4. Suirimas dėl įstrižojo tempimo pratęstajame sijos gale.
5. Suirimas dėl įstrižojo tempimo pilno aukščio skerspjūvyje ties įpjovos kraštu.

Tyrimais nustatyta, kad individualaus komponento laikomoji galia apibrėžia viso mazgo laikomąją galią, todėl kiekvieną irties pobūdį reikia įvertinti atskirai. Vis dėlto svarbu pabrėžti, kad dėl įtempių ir jėgų persiskirstymo, tik esant tinkamam armatūros išdėstymui, inkaravimui ir tarpusavio surišimui, gali būti užtikrintas atskirų komponentų laikomosios galios ir skaičiavimų patikimumas (Mattock & Chan, 1979; Aswin et al., 2015; Shakir 2020). 2016 metais Desnercko ir kt. tyrime atlikti laikomosios galios bandymai pagrindinei kontrolinei sijai ir kitoms, kuriose sumažinta kontrolinės sijos strypų. 1.21 paveiksle pavaizduotos dviejų bandinių armavimo schemas ir suirimas – kontrolinės sijos ir jai tapačios sijos su apribota skersinė armatūra. Nustatyta, kad pamažinus skersinės armatūros kiekį pilno aukščio skerspjūvio dalyje, laikomoji galia sumažėjo tik apie 10 %, tačiau suirimo pobūdis pasikeitė iš sijos pratęstojo galo suirimo į įstrižąjį suirimą nuo įpjovos krašto. Pagal PCI tokios irties (1.20 pav, pažymeta 5-tu numeriu) galima išvengti tinkamai užinkaruojant išilginius strypus einančius iš sijos galo per sijos vidurį, tačiau šiuo atveju, kuomet atskiros komponento laikomoji galia per maža, aprašoma sąlygą irčiau išvengti negalioja ir suirimo pobūdis pasikeičia.



1.21 pav. Kontrolinė sija (kairėje) ir palyginamoji sija (dešinėje) (Desnerck et al., 2016)

Nagrinėjant literatūroje pateikiamus eksperimentinių tyrimų duomenis, aptinkami visi penki PCI aprašomi suirimo pobūdžiai. Suirimas dėl gembinio lenkimo ir pratęstojo sijos galo ašinio tempimo (1-asis) pavaizduotas 1.22 paveiksle, suirimas dėl tiesioginės šlyties ties sandūra tarp pratęstojo galo ir pilno aukščio skerspjūvio (2-asis) matomas 1.23 paveiksle. Du irties pobūdžiai matomi 1.21 paveiksle - dėl įstrižojo tempimo sukonzentruoto ties vidiniu įpjovos kampu (3-čiasis) ir dėl įstrižojo tempimo pilno aukščio skerspjūvyje ties įpjovos kraštu (5-tasis) – kairėje ir dešinėje atitinkamai. 4-tasis irties pobūdis vaizduojamas 1.24 paveiksle.



1.22 pav. 1 pobūdžio suirimas (Mohammed et al., 2019)

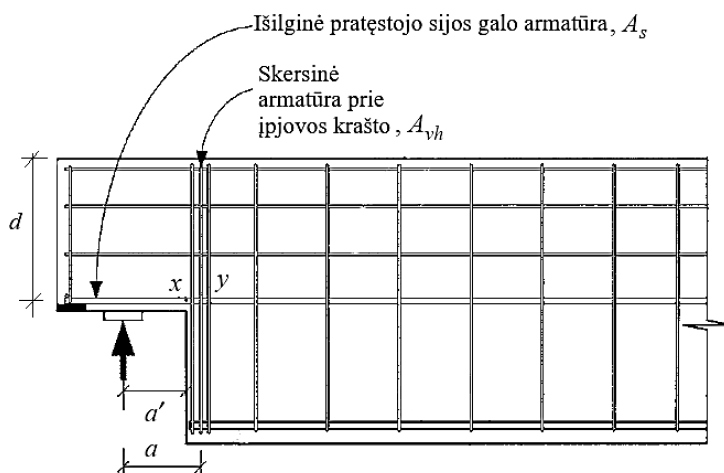


1.23 pav. 2 pobūdžio suirimas (Desnerck et al., 2016)

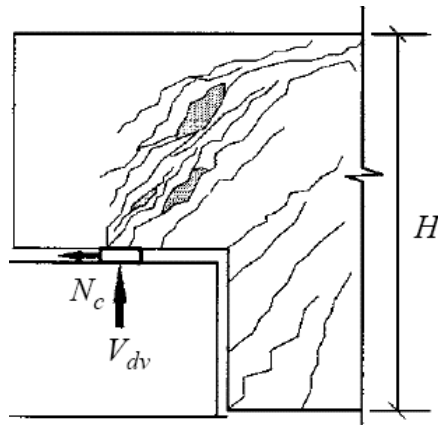


1.24 pav. 4 pobūdžio suirimas (Mohammed et al., 2019)

Literatūroje sijų atraminiai mazgai su įpjovomis paprastai suyra būtent dėl šlyties. Lu ir kt. 2003 metais atliktame tyrime bandomos 12 sijų (Lu et al., 2003). Kintantys parametrai – betono gniuždomasis stipris, a/d (šlyties zonos ilgio ir efektyvaus sijos galo aukščio) santykis, apkrovos pridėties vietos atstumas nuo įpjovos krašto a' , skersinės armatūros A_{vh} prie įpjovos krašto ir išilginės A_s sijos gale kiekiai (1.25 pav.). Tipinis visų bandinių suirimas pateikiamas 1.26 paveiksle, kuriame matoma, kad dominuojantis plyšys prasideda ties atrama ir tęsiasi įstrižai link apkrovos pridėties vietos. Tokio pobūdžio supleišėjimas indikuoja, kad visi bandiniai suiro dėl šlyties poveikio.

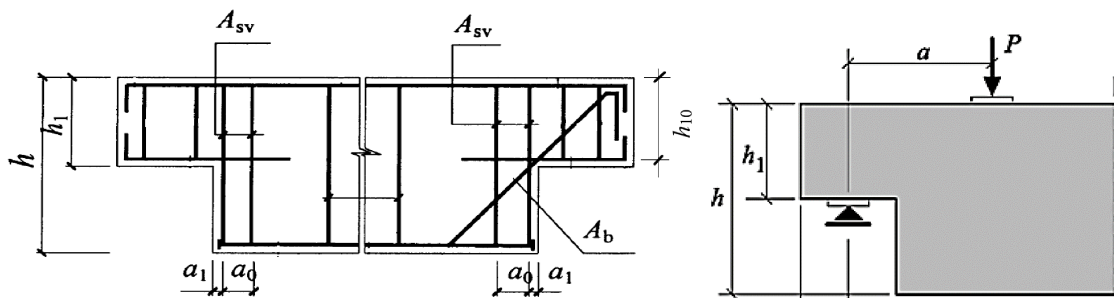


1.25 pav. Lu ir kt. tyrimo tipinė mazgo schema (Lu et al., 2003)

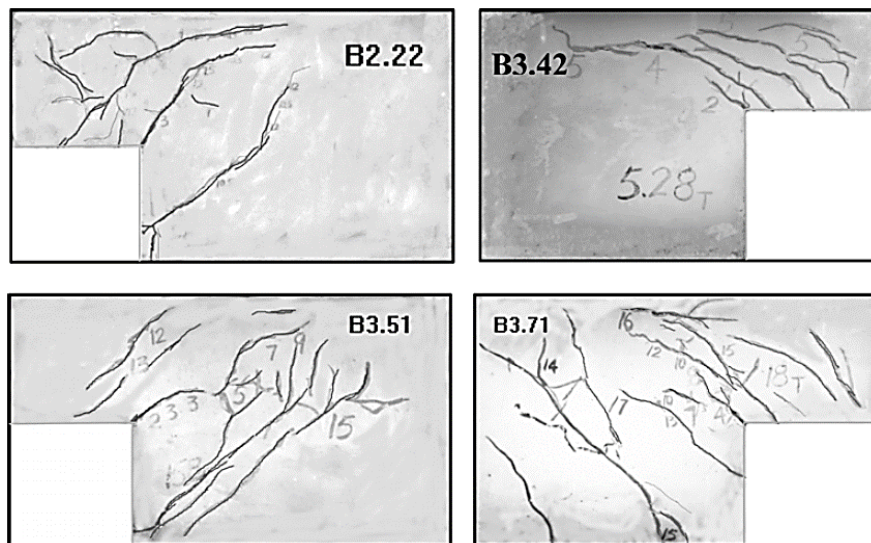


1.26 pav. Lu ir kt. tyrimo tipinis mazgo suirimas (Lu et al., 2003)

Wango ir jo kolegų atliktame tyrime buvo išbandyti 24 atraminiai mazgai (1.27 pav.) (Wang et al., 2005). Sijų kintamaisiais parinktas betono stipris, sijos plotis, aukščiai h , h_1 ir h_{10} , santykis a/h_{10} , atstumai a_1 ir a_0 , skersinės armatūros A_{sv} ir įstrižosios A_b kiekiai. 1.28 paveiksle matomi autoriaus pateikiami pagrindiniai suirimo pobūdžiai. Nors bandinyje B3.42 dėl didelio a/h_{10} santykio (čia lygus 4, o kituose bandiniuose santykis neviršija 3,38) pleišėjimas žemiau sijos galo nepasireiškia, tačiau visų autoriaus bandinių suirime, atraminiame mazge dominuoja įstrižieji plyšiai dėl šlyties poveikio.



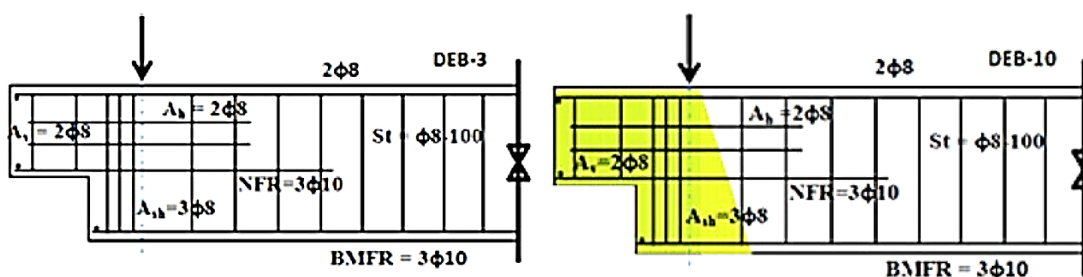
1.27 pav. Wango tyrimo tipinė mazgo armavimo ir apkrovimo schema (Wang, 2005)



1.28 pav. Wango tyrimo bandinių suirimo pobūdžiai (Wang, 2005)

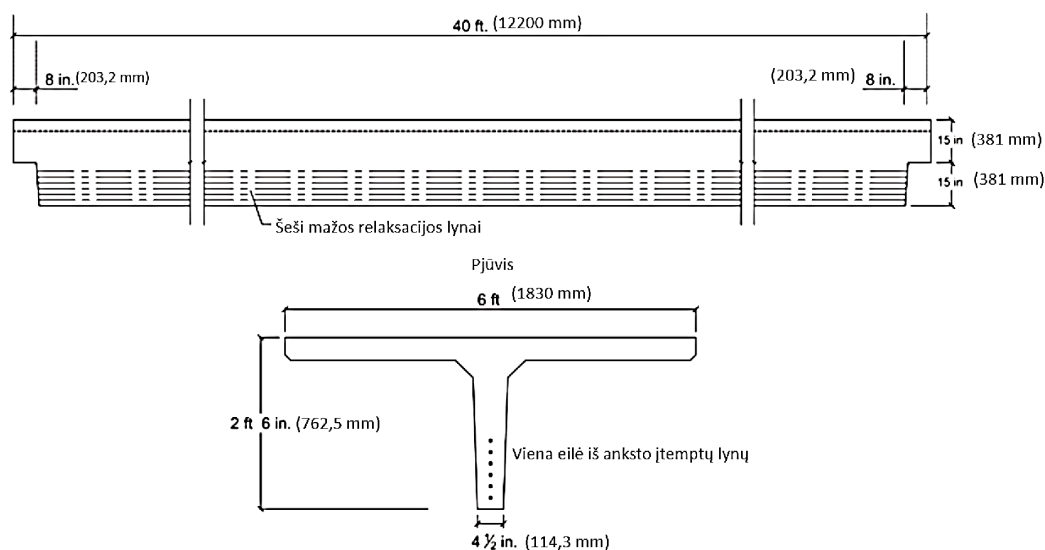
Taheris 2005 metais aprašo laikomosios galios bandymus keturioms grupėms po 12 sijų, skirtingais būdais stiprintais atraminiais mazgais, ir po 1 kontrolinę siją be stiprinimo kiekvienai grupei (Taher, 2005). Autorius tiksliai aprašo kiekvienos sijos suirimo pobūdį ir pateikia tokius rezultatus: 47 sijos suiro dėl šlyties ir 5 sijos suiro dėl bendros šlyties-lenkimo poveikio.

Mohammedas ir kt. atliko tyrimus 27 sijoms su įpjova (Mohammed et al., 2019). Viena kontrolinė siją suprojektuota pagal PCI reikalavimus 5-iems suirimo pobūdžiams, o likusių 26 sijų armavimo schemas buvo paremtos kontrolinės sijos schemoje keičiant armatūros kiekius. 12-os sijų sutrikdyto regiono zonoje, vietoje įprasto betono, buvo panaudoti dviejų tipų didelio stiprio kompozitiniai cementiniai mišiniai (žr. 1.29 pav.). Bandymų metu pasireiškė visi suirimo pobūdžiai. 20 sijų suiro dėl šlyties ties atraminiu mazgu, 4 – dėl bendro šlyties-lenkimo poveikio ir 3 sijos suiro ties tarpatramio viduriu dėl lenkimo.



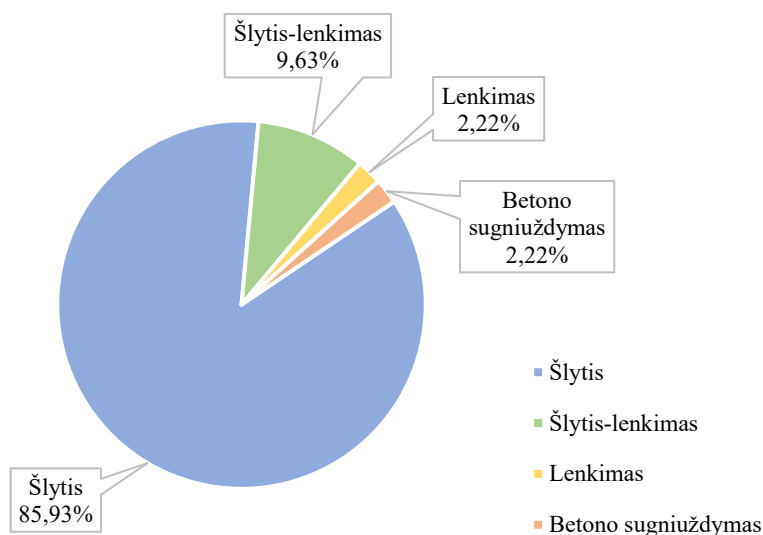
1.29 pav. Mohammedo ir kt. kontrolinė armavimo schema ir bandinys su pažymėta kompozitinio mišinio zona (Mohammed et al., 2019)

2017 metais Botrosas su kolegomis atliko tyrimą, kurio metu analizavo efektyviausią armavimo išdėstymą T formos sijoms su įpjovomis atraminiuose mazguose ir iš anksto įtempta armatūra (1.30 pav.) (Botros et al., 2017). Suprojektuoti 2 kontroliniai bandiniai pagal PCI rekomenduojamas schemas ir 18 bandinių keičiant armavimo schemą, betono stiprį, išpjovos matmenis ir išankstinio įtempimo išdėstymą.



1.30 pav. Botroso et al bandinių tipinė schema (Botros et al., 2017)

Autoriai įvardija suirimo pobūdžius – 13 bandinių suiro dėl šlyties, 4 bandiniai dėl šlyties-lenkimo poveikio ir 3 bandiniai suiro dėl užfiksuoto naujo suirimo pobūdžio – betono sugniuždymo apatiniame įpjovos kampe esant palyginamai nedidelei apkrovai. Panašus betono suirimas užfiksuotas Wernerio ir Dilgerio 1973 metais atliktame tyrime, kuomet vieno bandinio armatūros inkaravimo vietoje buvo sugniuždytas betonas (Werner & Dilger, 1973). Vadinasi, kai sijų atraminiuose mazguose su įpjova yra naudojama iš anksto įtempta armatūra, fiksuojamas PCI neaprašytas suirimo pobūdis – betono sugniuždymas apatiniame įpjovos kampe.



1.31 pav. Sijos atraminio mazgo su įpjova suirimą lemiantys poveikiai

Anksčiau aprašytuose tyrimuose buvo atliekami sijų bandymai keičiant įvairius parametrus nuo kurių priklauso tiek laikomoji galia, tiek suirimo pobūdis. Apibendrinant galima teigti, kad iš 135 pateiktų bandinių 116 (85,93 %) suiro dėl šlyties poveikio, 13 (9,63 %) suiro dėl bendro šlyties-lenkimo poveikio, 3 (2,22 %) suiro dėl lenkimo ir 3 (2,22 %) bandiniai suiro, kuomet buvo sugniuždytas betonas apatiniame įpjovos kampe dėl kombinuoto poveikio nuo apspaudimo jėgos ir apkrovos sukeliama įtempių kampe. Reikia pabrėžti, kad išanalizavus daugiau analogiškų tyrimų, kuriuose naudojama iš anksto įtempta armatūra, sugniuždyto betono atvejų galėtų būti daugiau, tačiau, susisteminus pateiktus duomenis (1.31 pav.), matoma, kad suirimas dėl šlyties jėgų bet koku atveju yra dominuojantis. Panašią analizę atliko (3 nagrinėti tyrimai sutapo) ir analogiškus rezultatus gavo Aswinas su kolegomis. 2015 metais išanalizavę 111 sijų tyrimų rezultatus nustatė, kad 93,69 % suiro dėl šlyties jėgos (Aswin et al., 2015). Tai patvirtina praeitame poskyryje aprašytą sutrikdytos zonos elgseną, kad dažniausiai tokie ruožai suyra būtent dėl šlyties. Vadinasi, ištirti apspaudimo jėgos sukeliama įtempių poveikį vidinio kampo pleišėjimui ir įstrižojo pjūvio laikomajai galiai yra ypač svarbu.

1.2.3. Pagrindinių parametų įtaka

Įvairūs autoriai literatūroje bandydami nustatyti atraminio mazgo su įpjova elgsenos dėsningumus apkrovimo metu, nagrinėja mazgą, keisdami įvairius bandinių parametrus. Išanalizavus literatūrą, galima išskirti pagrindinius kintamuosius, kurie aprašytuose tyrimuose daro didžiausią įtaką pleišėjimui, maksimaliai laikomajai galiai ir suirimo pobūdžiui.

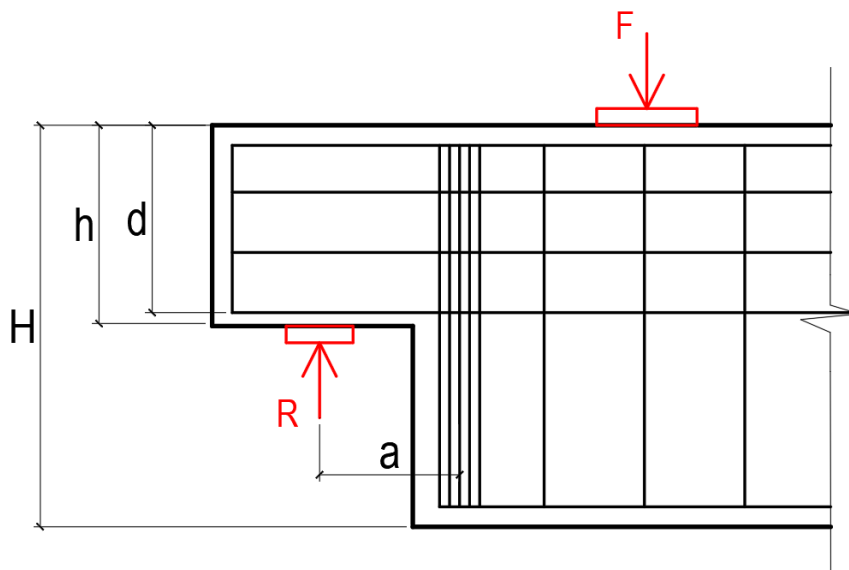
a/d santykio ir įpjovos matmenų įtaka

Atraminų mazgų su įpjova tyrimuose vienas iš pagrindinių aprašomų parametų – tai šlyties ruožo ilgio (atstumas nuo atraminės reakcijos iki skersinės armatūros vidurio linijos) ir efektyviojo sijos galo aukščio santykis a/d (žr. 1.32 pav.). Šis parametras pasižymi nuoseklia elgsena daugybėje atliktų tyrimų. Praeitame poskyryje aprašytame Lu ir kt. tyrime, vieni iš tiriamų kintamųjų buvo skersinės armatūros atstumas nuo įpjovos krašto ir atramos pridėties vieta įpjovoje (Lu et al., 2003). Nustatyta, kad tiek atramai, tiek skersinei armatūra artėjant prie įpjovos krašto, t.y. mažėjant a/d santykiui, laikomoji galia didėja. Šią elgseną patvirtina ir Wango bei jo kolegų atliktas tyrimas, kurio metu a/d santykis varijavo keičiant įpjovos aukštį, skersinės armatūros atstumą nuo įpjovos krašto ir jos strypų išdėstymo žingsnį (Wang et al., 2005). Nustatyta, kad a/d santykiui mažėjant, kaip ir Lu bei jo kolegų tyrime, laikomoji galia didėja. Taip pat pažymėta, kad a/d santykis nedarė įtakos pirmojo plyšio atsiradimo vietai, kuris visuomet prasidėdavo vidiniame įpjovos kampe apie 40–60 laipsnių kampu su sijos ašimi, tačiau turėjo įtakos apkrovai, prie kurios atsirasdavo pirmasis plyšys – šiuo atveju ta apkrova kito nuo 14–45 % maksimalios apkrovos. Panašią pleišėjimo elgseną aprašo ir Desnerckas su kolegomis, kad jų bandiniuose pirmieji plyšiai pasireiškė prie 27–42% maksimalios apkrovos, 40–45 laipsnių kampu su sijos išilgine ašimi (Desnerck et al., 2016). Be to, Wangas ir kt. darbe pabrėžia, kad įpjovos aukščio įtaka laikomajai galiai yra labai reikšminga, todėl projektuojant mazgą svarbu atsižvelgti ne tik į a/d santykį, bet ir rekomenduojama, kad sijos galo aukštis h nebūtų mažesnis kaip $0,45H$ (žr. 1.32 pav.).

Ahmad ir jo kolegos atliko tyrimą 2 grupėm skirtingų aukščių sijų – pirmoje grupėje dvi sijos buvo 457 mm aukščio su 178 mm įpjova, o antroje grupėje dvi sijos buvo 305 mm aukščio su 127 mm įpjova, įpjovos ilgis ir atramos vietą įpjovoje abiem grupėm parinkta identiška, a/d santykį keičiant per sijos galo aukštį. (Ahmad et al., 2013). Sijos galo aukščio h ir viso sijos aukščio H santykis priimtas labai panašus – pirmos grupės atveju jis lygus $0,61H$, o antros $0,58H$. Nustatyta, kad absoliutus sijos galo aukštis, to pasėkoje ir a/d santykis, daro labai reikšmingą įtaką mazgo laikomajai galiai, kadangi, abi sijų grupės suprojektuotos naudojant identišką spyrių ir stygų modelį, tačiau pirmos grupės atveju maksimali apkrova buvo pasiekta apytiksliai 54 % didesnė nei projektinė galia, o antros grupės, kai sijos galo aukštis mažesnis ir a/d santykis

didesnis, laikomoji galia buvo apytiksliai 35 % mažesnė, nei projektinė. Vadinasi, projektuojant atraminius mazgus su įpjovomis reikia įvertinti, kad didelio a/d santykio mazgų laikomoji galia gali būti pervertinta, o mažo – nuvertinta.

Shakiras su kolegomis atliko bandymus 2 grupėm sijų – pirmos a/d santykis lygus 1,5, o antros 1,0 – ir nustatė, kad santykio sumažinimas nuo 1,5 iki 1,0 identiškiems mazgams laikomąją galią padidina per apytiksliai 17 % pakeičiant suirimo pobūdį iš įstrižojo tempimo sijos gale į įstrižąjį tempimą vidiniame įpjovos kampe (Shakir et al., 2018). Skersinės armatūros prie įpjovos krašto sumažinimas 50 % laikomąją galią sumažina apie 13 % nesvarbu koks a/d santykis, tačiau sijos galo išilginės armatūros kiekį sumažinus 60 %, mazgų grupės, kurios a/d santykis lygus 1,5 laikomoji galia sumažėja apie 56 %, o grupės, kurios a/d lygus 1,0, laikomoji galia sumažėja tik apie 15 %. Vadinasi, esant skirtingiems a/d santykiams pasireiškia ir skirtingi suirimo pobūdžiai, todėl armatūros įtaka nėra vienoda. Vėliau, Shakiras mazgų su įpjovomis tyrimų apžvalgoje apibendrina stebėtą elgseną teigdamas, kad pagal išnagrinėtus tyrimus, sijose, kurių a/d santykis mažiau nei 1, dominuoja suirimas įstrižajame pjūvyje, o mazguose, kurių a/d santykis daugiau kaip 1, suirimas dažniausiai įvyksta dėl lenkimo momento sijos gale (Shakir, 2020).



1.32 pav. Tipinio mazgo su įpjova supaprastinta schema

Betono stiprio įtaka

Lu ir jo kolegos tyrė ne tik a/d santykio įtaką, bet ir betono stiprio įtaką laikomajai galiai (Lu et al., 2003). Eksperimento metu bandiniai suiro, kai buvo sugniuždytas betonas įstrižame spyryje dėl šlyties jėgų. Tai lėmė, kad didėjant betono stipriui, didėjo ir mazgo laikomoji galia. Lyginant beveik identiškus bandinius nustatyta, kad betono stiprį padidinus 85,75 % (nuo 33,7 MPa iki 62,6 MPa) laikomoji galia padidėja 20,62 %, o kitoje bandinių grupėje stiprį padidinus 84,11 % (nuo 34,0 MPa iki 62,6 MPa) laikomoji galia padidėja per 25,67 %, tačiau reikia paminėti, kad šioje bandinių grupėje skersinės armatūros kiekis buvo padidintas nuo 5 apkabų iki 6 apkabų,

todėl abiejų grupių rezultatus galima laikyti panašiais. Tyrimo autoriai pabrėžia, kad lyginant realių galios padidėjimą, dėl betono stiprio, su apskaičiuotu pagal PCI metodą, skaičiavimo metodas nuvertina betono stiprio poveikį laikomajai galiai. Tai akcentuoja ir Shakiras, kad jo nagrinėtuose spyrių ir stygų modelio skaičiavimuose laikomoji galia buvo nulemta armatūros suirimo arba nepakankamo armatūros strypų inkaravimo ilgio, o ne betono sugniuždymo (Shakir, 2018).

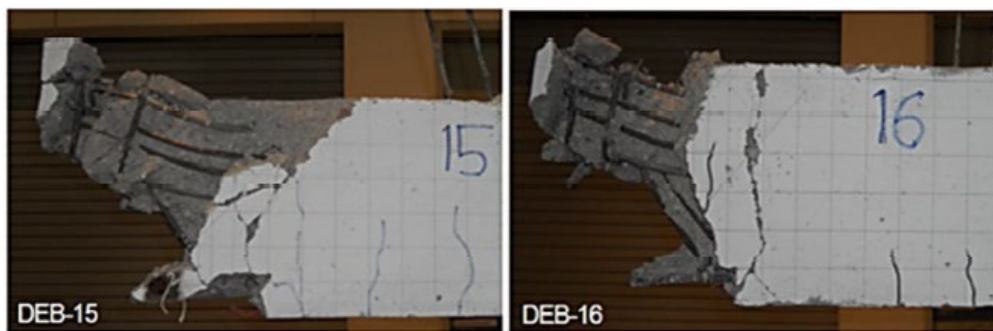
Ankstesniame poskyryje aprašytame Mohammedo ir jo kolegų tyrime buvo bandomos įvairiai armuotos sijos (Mohammed et al., 2019). 12-os sijų įpjovos zonos dalyje panaudoti didelio stiprio kompozitiniai mišiniai vietoje įprasto betono. Svarbu atkreipti dėmesį, kad kitaip nei Lu ir kt. tyrime, kai buvo sugniuždytas betono spyris, Mohammedo ir jo bendraautorių bandiniai suiro įvairiais irties pobūdžiais, tačiau laikomoji galia nuo betono stiprėjimo didėjo. Didžiausias laikomosios galios padidėjimas užfiksuotas tarp bandinių Nr. 1 ir Nr. 2 bei tarp bandinių Nr. 8 ir Nr. 11. Pirmu atveju betono stiprį įpjovos zonoje padidinus 209,96 % (nuo 27,1 MPa iki 84 MPa), laikomoji galia padidėjo 73,77 %, o antru atveju stiprį padidinus 198,91 % (nuo 27,6 MPa iki 82,5 MPa) laikomoji galia padidėjo 79,15 %. Pastebima didesnė galios padidėjimo proporcija nei Lu ir jo kolegų atliktame tyrime, nors suirimo pobūdžiai nebuvo betono sugniuždymas. Tai lemia faktorius, kad šie bandiniai yra labai mažai armuoti atraminio mazgo vietoje, o kompozitinių mišinių struktūroje buvo naudojamas didelis kiekis pluošto, didinančio tempiamąjį stiprį. Tuo tarpu kituose, gerai armuotuose bandiniuose betono stiprį padidinus vidutiniškai 202,39 %, laikomoji galia padidėjo mažiau – 60,88 %. Ši laikomosios galios padidėjimo proporcija panašesnė į Lu et al tyrimo rezultatus, tačiau būtent dėl kompozitinių mišinių struktūroje naudojamo pluošto, laikomosios galios padidėjimo efektas yra stipresnis. Kaip apžvalgoje rašo Shakiras, betono stipris nėra dominuojantis faktorius lemiantis mazgo su įpjova elgseną, nes didžioji zonos aplink įpjovą dalis yra tempimo būsenoje, todėl norint padidinti galią, betono sudėtyje rekomenduotina naudoti pluoštą betono armavimui (Shakir, 2020).

Armatūros išdėstymo įtaka

Armatūros įtaka laikomajai galiai dažniausiai siejasi su anksčiau aprašytu a/d santykiu. Wango ir kt. tyrime, bandiniuose buvo keičiamas skersinės armatūros pirmo strypo atstumas nuo įpjovos krašto, skersinės armatūros strypų kiekis, efektyvusis strypų ruožas ir strypų posvyrio kampas (Wang et al., 2005). Užfiksuota keletas pagrindinių pastebėjimų. Kuo arčiau įpjovos yra išdėstyti strypai – tuo a/d santykis yra mažesnis ir laikomoji galia didesnė. Kadangi reikšmė a tai atstumas iki strypų grupės centro linijos, o ne pirmojo skersinės armatūros strypo tai, pastebėta, kad armuojant keliais strypais, reikia kuo tankiau išdėstyti strypus, kad jų bendras svorio centras būtų arčiau įpjovos, to pasėkoje a/d santykis gaunamas mažesnis. Tai sutampa su Mata-Falcóno ir jo kolegų tyrime aprašomomis išvadomis (Mata-Falcón et al., 2019). Autoriai atliko bandymus su skirtingo armavimo schemų sijomis ir nustatė, kad esant tam pačiam strypų kiekiui, tačiau

išdėstytų didesniu žingsniu, matomas reikšmingas laikomosios galios sumažėjimas. Autoriai pabrėžia, kad armatūros išdėstymas didesniu žingsniu turi teigiamą efektą, kadangi išvengiama vieno iš irties pobūdžių užfiksuoto jų atlikto eksperimento metu – betono suirimo virš tankiai išdėstytos skersinės armatūros. Wangas ir jo bendraautoriai teigia, kad skersinė armatūra efektyviai dirba, kai pirmas strypas yra ne toliau kaip 40 mm atstumu nuo įpjovos krašto ir strypai yra išdėstyti ruože, kurio ilgis yra pusė sijos galo aukščio t.y. $0,5h$ (žr. 1.32 pav.).

Daugelis autorių rašo, kad įstrižoji armatūra daug efektyviau didina mazgo laikomąją galią ir atsparumą pleišėjimui, nei vertikaliai išdėstyta armatūra (Liem, 1983; Wang et al., 2005; Mohammed et al., 2019). Pagal Liemą efektyviausia armatūra yra pasvirusi 45 laipsnių kampu su sijos ašimi ir jos galia yra dvigubai didesnė nei analogiškos horizontalios arba vertikalios skersinės armatūros (Liem, 1983). Lyginant bandinius, kuriuose armatūra išdėstyta skirtingai, kai elementai armuoti kartu įstrižąja ir skersine armatūra, suirimo apkrova pasiekama iki 30 % didesnė ir sumažinamas maksimalus plyšio plotis ir plyšių susidarymo greitis (Shakir, 2018). Mohammedas su kolegomis rašo, kad atraminį mazgą armuoti tik įstrižąja skersinę armatūrą nerekomenduojama (Mohammed et al., 2019). Šių autorių atliktų eksperimentų metu užfiksuota, kad, be vertikalios skersinės armatūros, dalyje bandinių betonas visiškai suyra apatiniame įpjovos kampe (žr. 1.33 pav.).

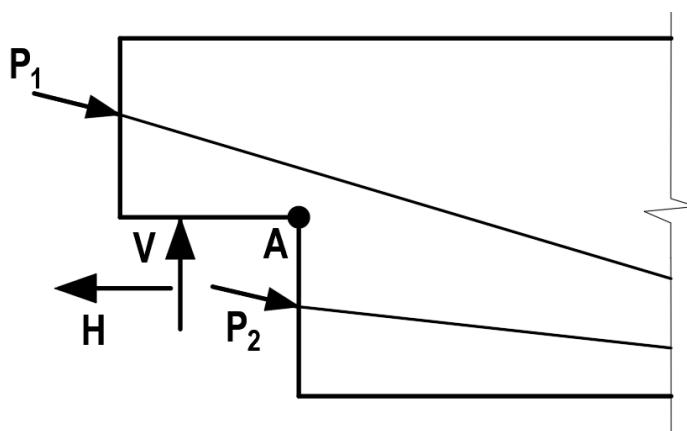


1.33 pav. Bandinių be vertikalios skersinės armatūros suirimas (Mohammed et al., 2019)

Armatūros įtempimo įtaka

Werneris ir Dilgeris 1973 metais atliko vienus pirmųjų tyrimų įtemptoms sijoms su įpjova (Werner & Dilger, 1973). Darbe jie aprašo bandymus skirtingai armuotoms T formos sijoms. Vienas iš analizuojamų faktorių tai įtemptos armatūros poveikis šlyties galiai taške „A“. Paveiksle 1.34 pavaizduotos tašką „A“ veikiančios jėgos: V – vertikali reakcija nuo apkrovos, H – horizontalios jėgos nuo atramos posvyrio ir kitų efektų, P_1 – į betoną įtemptų lynų pratęstajame sijos gale apspaudimo jėga, P_2 – į betoną įpjovoje įtemptų lynų apspaudimo jėga. Autoriai rašo, kad vientiso skerspjuvio elementuose šlyties galia susideda iš tokių komponentų: jėga, kurią gali

atlaikyti betonas ir jėga, kurią atlaiko skersinė armatūra. Tais atvejais, kai elemente yra naudojama įtempta armatūra, prisideda ir trečiasis komponentas – apspaudimo jėgos vertikalusis komponentas didinantis įstrižojo pjūvio laikomąją galią. Atlikę tamprią baigtinių elementų analizę jie nustatė, kad sijose su įpjovomis įtempta armatūra gali mažinti laikomąją galią. Armatūros apspaudimo jėgą P_2 , vertikali V jėga ir horizontali H jėga, sukelia tempiamuosius įtempius taške „A“. Darbe teigiama, kad P_2 jėgos sukiamų tempiamųjų įtempių dydis priklauso nuo kampo, kuriuo jėga veikia įpjovos kraštą ir nuo jėgos dydžio. Vadinasi, priklauso nuo įtemptų lynų išdėstymo ir armatūros įtempimo intensyvumo. Pagal atliktą analizę, P_1 jėgos sukiami gniuždymo įtempiai buvo didesni už tempiamuosius sukeltus P_2 jėgos, todėl autoriai P_2 jėgos pavojingumo toliau neanalizuoja. Būtent šios jėgos poveikis ir pavojingumas tiriamas šiame darbe.

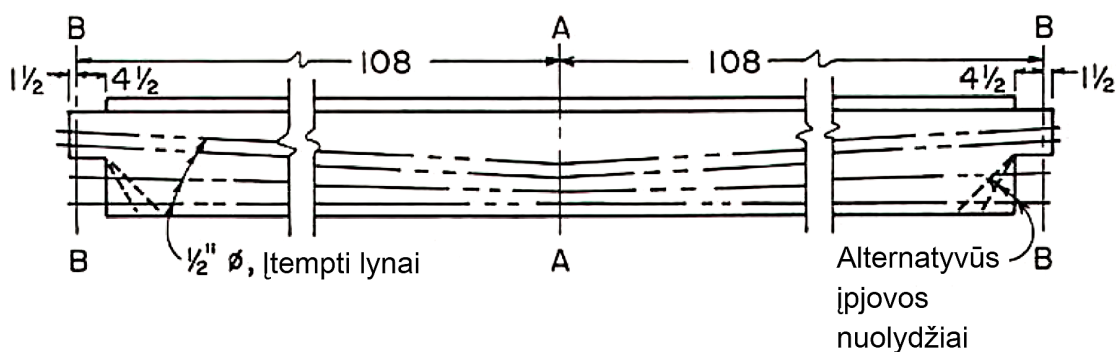


1.34 pav. Jėgos veikiančios tašką „A“ vidiniame įpjovos kampe (pagal Werner & Dilger, 1973)

Vienas iš Wernerio su Dilgerio tirtų bandinių suiro daug anksčiau nei apskaičiuota projektinė galia, nes buvo sugniuždytas betonas įtemptos armatūros inkaravimo zonoje. Autoriai pateikia išvadą, kad, dėl intensyvaus pleišėjimo įpjovos zonoje, reikia skirti didelį dėmesį tinkamam įtemptų strypų inkaravimui.

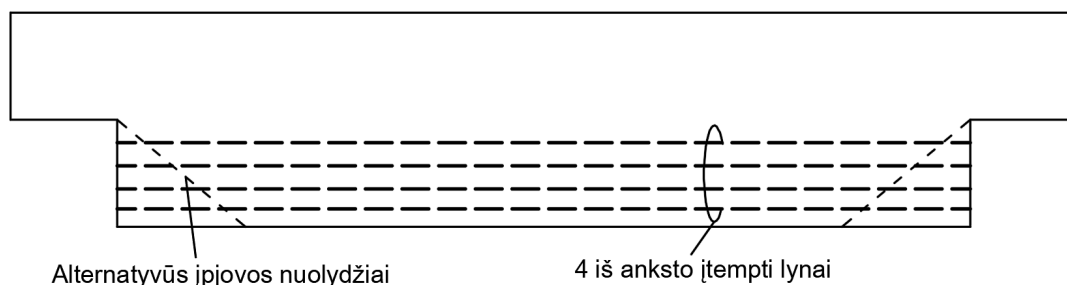
Hamoudi ir kt. savo darbe tiria T formos skerspjūvio sijas su skirtingais įpjovos aukščiais, armatūros išdėstymu ir įtempimo intensyvumu (Hamoudi et al., 1975). Visuose elementuose įtemptoji armatūra pratęsiama iki sijos galo. Autoriai rašo, kad bandiniuose su dideliu armatūros įtempimo intensyvumu, pirmieji plyšiai susidaro sijos tempiamojoje zonoje ir elementas suyra sugniuždžius betoną virš šių plyšių. Jeigu armatūra yra įtempama mažiau, tada plyšiai nuo šlyties jėgų susidaro greičiau nei nuo lenkimo ir elementas suyra mazgo su įpjova zonoje. Analizuojant rezultatus galima palyginti dviejų identiškų bandinių laikomąją galią, tarp kurių įtempimo jėga skiriasi 25%. Bandinys T10 suyra pasiekus 71,62 kN skersinę jėgą, tačiau kitame bandinyje T1 įtempimas 25 % didesnis, todėl laikomoji galia pasiekama 13,66 % didesnė t.y. 81,40 kN. Taigi, įtemptą armatūrą pratęsiant iki sijos galo galima padidinti įstrižojo pjūvio laikomąją galią.

Atlikti bandymai dviem sijoms armuojamoms tuo metu įprastomis armavimo schemomis, naudojamomis praktikoje, ir trims sijoms, sukurtoms patobulinti šias schemas ir palengvinti tokių sijų gamybą sumažinant armatūros strypų kiekį sijų galuose (Mattock & Theryo, 1986). Vienas iš tiriamų faktorių – iš anksto įtemptos armatūros lynų išdėstymas elemente. Sijų bandymai atliekami keliomis bandymų serijomis, dalinai imituojant eksploatacines apkrovas, siekiant patikrinti tokių armavimo schemų racionalų panaudojimą praktikoje. Po to, apkrova didinama iki suirimo. Tipinė sijos schema pavaizduota 1.35 pav.



1.35 pav. Tipinė Mattocko ir Theryo sijos schema (Mattock & Theryo, 1986)

Lyginami dviejų tipų lynų išdėstymai. B tipo išdėstymas pavaizduotas 1.35 paveiksle, kai 2 lynai yra pratęsiami iki sijos galo ir 2 lynai išdėstomi horizontaliai nuo vienos įpjovos krašto iki kitos, o C tipas skiriasi tuo, kad visi 4 lynai yra išdėstomi horizontaliai kaip pavaizduota 1.36 pav.



1.36 pav. Mattocko ir Theryo C tipo sijų schema (pagal Mattock & Theryo, 1986)

Autoriai nurodo, kad visomis apkrovimo stadijomis C tipas pasižymi daug prastesnėmis charakteristikomis. Strypų atleidimas C tipo sijoje sukelia didelius tempiamuosius įtempius vidiniame įpjovos kampe. Tai lemia, kad vos apkrovus siją, kampe susidaro įstrižieji plyšiai nuo pačios mažiausios apkrovos, o supleišėjimo lygis prie darbinės apkrovos lygus tokiam supleišėjimui, kuris susidaro B tipo sijoje po 20 ciklų eksploatacinės apkrovos ir vienkartinio 36 % apkrovos padidinimo. Mattockas ir Theryo pateikia išvadą, kad išvengti įpjovos vidiniame kampe susidarančių pavojingų tempiamųjų įtempių, rekomenduojama mažiausiai pusę visų iš anksto įtemptų lynų pratęsti iki sijos galo. Kitu atveju, tempiamieji įtempiai, dėl įtemptos armatūros apspaudimo jėgos, vidiniame įpjovos kampe bus didesni nei gniuždomieji.

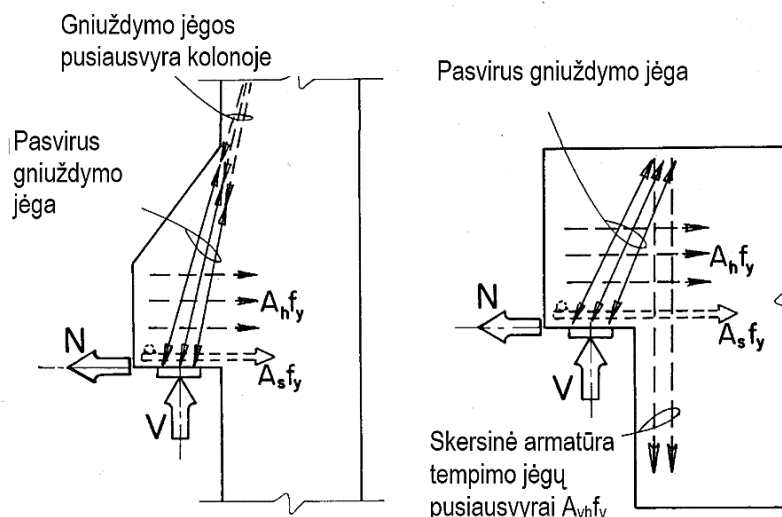
Al-Khazraji darbe nagrinėjama keleto kintamųjų įtaka stačiakampio skerspjuvio sijoms su įpjova, kai jas veikia statinės ir smūginės apkrovos (Al-Khazraji, 2014). Nagrinėjami kintamieji: armatūros įtempimo intensyvumo ir įtemptos armatūros išdėstymo poveikis, skirtingo betono stiprio bei sudėties įtaka. Autorė aprašo eksperimentų metu nustatytą elgseną. Lyginant du identiškus bandinius, vieną, kai armatūros lynai yra pratęsimi iki sijos galo, ir kitą, kai pratęsti lynai yra įtempiami iki $0,62f_{pu}$ reikšmės, suirimo apkrova dėl įtempimo padidėja nuo 122 kN iki 240 kN (96,72 %). Be to, padidėja ir pleišėjimo apkrova – vidinis įpjovos kampas, neįtempus armatūros, supleišėja prie 28 % maksimalios apkrovos, o įtempus – prie 42,5 %. Plyšio plotis sumažinamas nuo 0,14 mm iki 0,022 mm. Taigi, sutinkant su anksčiau aprašytų autorių tyrimų rezultatais, armatūrą įtempiant į sijos galą, matomas aiškus elgsenos apkrovimo metu pagerinimas. Vis dėlto, kitaip nei anksčiau aprašytų autorių tyrimuose, Al-Khazraji disertacijos išvadose teigiama, kad, kai armatūra įtempinama į įpjovos kraštus, lynus išdėstant horizontaliai, laikomoji galia padidėja 35 %, o pleišėjimo apkrova padidėja 46 %, tačiau pateikia tik to bandinio rezultatus, kai armatūra įtempinama, o palyginamasis bandinys, kai armatūra neįtempinama, darbe nėra aprašomas ir rezultatai nepateikiami. Vadinasi, tokią prieštaraujančią elgseną privalu ištirti.

1.3. Atraminio mazgo su įpjova laikomosios galios skaičiavimo metodai

Šiame poskyryje aprašomi skaičiavimo metodai, kurie buvo pasirinkti analitinei laikomosios galios analizei atlikti.

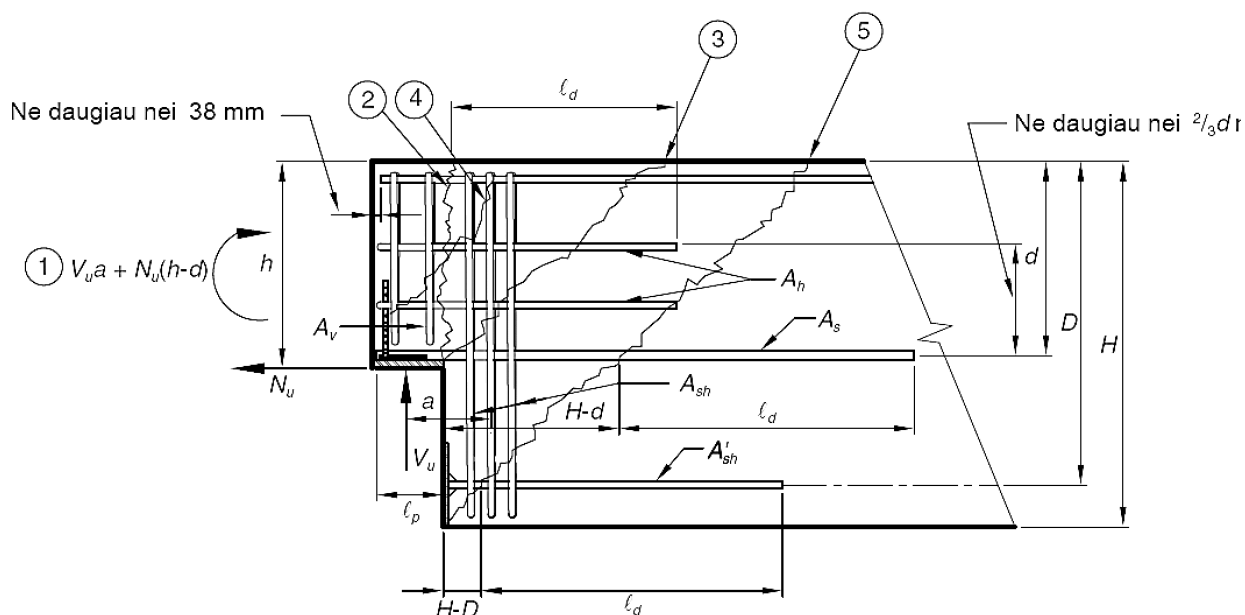
1.3.1. Šlyties – trinties metodas

Mattockas ir Chanas savo darbe pasiūlė sijų su įpjova atramoje projektavimo metodą. Metodo esmė – skaičiuoti tokio tipo mazgą kaip apverstą kolonos gembę. Esminis skirtumas, kad sijoje reikalinga skersinė armatūra, kuri pasvirusią gniuždomąją sijos galo jėgą atlaikytų tempiamąją jėgą skersinėje armatūroje prie įpjovos krašto (žr. 1.37 pav.). Pagal tyrimo rezultatus autoriai aprašė, taip vadinamą, šlyties-trinties projektavimo metodą, kurį PCI pritaikė pateikiamose projektavimo rekomendacijose.



1.37 pav. Apverstos kolonos gembės ir sijos su įpjova palyginimas (Mattock & Chan, 1979)

Mattockas ir Chanas identifikavo 3 suirimo pobūdžius, bet PCI rekomendacijos yra reguliariai atnaujinamos pagal naujus tyrimus ir, kaip ankstesniame poskyryje aprašyta, šiuo metu PCI pateikia 5 suirimo pobūdžius ir projektavimo gaires jiems išvengti. Pabrėžiama, kad šis projektavimo metodas turi būti taikomas tik tokiose situacijose, kai šlyties zonos ilgio ir efektyviojo sijos aukščio galo santykis a/d neviršija 1,0 (žr. 1.38 pav.).



1.38 pav. Rekomenduojama armavimo schema mazgui su įpjova (PCI Design Handbook, 2010)

Pirmame atraminio mazgo su įpjova projektavimo etape būtina nustatyti ar konkretus mazgas su įpjova yra identifikuojamas kaip mazgas, kuriam armatūra pagal nurodytą schema reikalinga ir veiksminga. Jeigu galioja nors viena iš toliau nurodytų sąlygų, tada mazgą galima projektuoti pagal pateiktą schemą ir rekomendacijas:

1. Įpjovos aukštis didesnis kaip $0,2H$ arba 203 mm .
2. Įpjovos gylis l_p didesnis nei 305 mm .

3. Elemento, kurio plotis mažesnis nei 203 mm, mažiau nei pusė išilginės armatūros yra pratęsta iki sijos galo virš įpjovos.
4. Elemento, kurio plotis ne mažesnis nei 203 mm, mažiau nei trečdalis išilginės armatūros yra pratęsta iki sijos galo virš įpjovos.

Lenkimas ir ašinis tempimas sijos gale

Armatūra reikalinga atlaikyti gembės lenkimą ir ašinį tempimą skaičiuojama (PCI Design Handbook, 2010):

$$A_s = \frac{1}{\phi f_y} \left[V_u \left(\frac{a}{d} \right) + N_u \left(\frac{h}{d} \right) \right], \quad (1.1)$$

čia: ϕ – atsargos koeficientas lygus 0,75; f_y – išilginės armatūros takumo stipris, Pa; a – šlyties zonos ilgis, m; h – sijos galo esančio virš įpjovos aukštis, m; d – efektyvusis sijos galo aukštis, m; N_u – ašinė tempiamoji jėga, lygi $0,2 \cdot V_u$ arba tiksliai apskaičiuota naudojamam atraminiam padui, N.

Iš šios lygties galima išsireikšti skersinę laikomąją galią pirmajam suirimo pobūdžiui:

$$V = \frac{A_s \cdot f_y}{\frac{a}{d} + 0,2 \cdot \frac{h}{d}}. \quad (1.2)$$

Tiesioginės šlyties poveikis

2 numeriu pažymėto plyšio suirimas (žr. 1.38 pav.) atlaikomas dviejų armatūros grupių – A_s ir A_h . Reikalingas armatūros kiekis apskaičiuojamas (PCI Design Handbook, 2010):

$$A_s = \frac{2 \cdot V_u}{3 \cdot \phi \cdot f_y \cdot \mu_e} + A_n, \quad (1.3)$$

$$A_n = \frac{N_u}{\phi \cdot f_y}, \quad (1.4)$$

$$A_h = 0,5 \cdot (A_s - A_n), \quad (1.5)$$

čia: ϕ – atsargos koeficientas lygus 0,75; f_y – armatūros takumo stipris, Pa; μ_e – efektyvusis šlyties-trinties koeficientas, kurio maksimalios reikšmės pateiktos PCI projektavimo rekomendacijų 5.3.1 lentelėje (PCI Design Handbook, 2010). Kai šlytis vyksta vientisame betone, μ_e maksimali reikšmė lygi 3,4. Efektyvusis šlyties-trinties koeficientas apskaičiuojamas pagal tokią formulę (PCI Design Handbook, 2010):

$$\mu_e = \frac{\phi \cdot 6,895 \text{ MPa} \cdot \lambda b h \mu}{V_u} \leq 3,4, \quad (1.6)$$

čia: ϕ – atsargos koeficientas lygus 0,75; λ – transformacijos koeficientas lengvajam betonui, lygus 1, kai naudojamas normalusis betonas; b – šlyties veikiamo pjūvio plotis, m; h – šlyties veikiamo pjūvio aukštis, m; μ – šlyties-trinties koeficientas lygus $1,4 \cdot \lambda$.

Maksimali V_u/ϕ reikšmė negali viršyti (PCI Design Handbook, 2010):

$$0,3\lambda \cdot f'_c \cdot A_{cr} \leq 6,895 \text{ MPa} \cdot \lambda \cdot A_{cr}, \quad (1.7)$$

čia: f'_c – betono gniuždomasis stipris, Pa; A_{cr} – šlyjamo pjūvio plotas; λ – transformacijos koeficientas lengvajam betonui.

Iš lygčių išsireiškus V_u apskaičiuojama maksimali atlaikoma skersinė jėga:

$$V \leq 0,3\lambda \cdot f'_c \cdot b \cdot h, \quad (1.8)$$

$$V \leq 6,895 \cdot \lambda \cdot b \cdot h, \quad (1.9)$$

$$V = \sqrt{1,153 \cdot A_s \cdot 1,4 \cdot f_y \cdot \lambda^2 \cdot b \cdot h \cdot 6,895 \text{ MPa}}. \quad (1.10)$$

Istrižasis tempimas vidiniame įpjovos kampe

Įstrižąjį plyšį iš vidinio įpjovos kampo atlaiko vertikali arba įstriža armatūra išdėstyta prie įpjovos krašto A_{sh} . Paveiksle 1.38 plyšys pažymėtas numeriu 3. Reikalingas armatūros kiekis apskaičiuojamas pagal tokią formulę (PCI Design Handbook, 2010):

$$A_{sh} = \frac{V_u}{\phi \cdot f_y}, \quad (1.11)$$

čia: ϕ – atsargos koeficientas lygus 0,75; f_y – armatūros takumo stipris, Pa; A_{sh} – vertikalios arba įstrižos armatūros prie įpjovos krašto plotas, m^2 .

Tada, atlaikomoji skersinė jėga lygi:

$$V = A_{sh} \cdot f_y. \quad (1.12)$$

Istrižasis tempimas pratęstajame gale

Plyšį, pažymėta numeriu 4, atlaiko betonas ir armatūra A_h ir A_v išdėstyta sijos gale. Šių komponentų kombinuota laikomoji galia apskaičiuojama taip (PCI Design Handbook, 2010):

$$V = A_v \cdot f_y + A_h \cdot f_y + 2 \cdot b \cdot d \cdot \lambda \cdot \sqrt{f'_c}, \quad (1.13)$$

čia: f_y – armatūros takumo stipris, Pa; A_v – vertikalios armatūros sijos gale plotas, m^2 ; A_h – horizontalios armatūros sijos gale plotas, m^2 ; b – elemento plotis, m; d – efektyvusis sijos galo aukštis, m; λ – transformacijos koeficientas lengvajam betonui; f'_c – betono gniuždomasis stipris, Pa.

Istrižasis plyšys pilno aukščio skerspjūvyje

PCI rekomendacijose rašoma, kad 5 numeriu pažymėtas plyšys ir suirimas yra išvengiamas tinkamai suarmavus pagal ankstesnius 4 punktus ir užtikrinus pakankamą išilginės galo armatūros inkaravimo ilgį l_{bd} .

1.3.2. Stygų ir spyrių modelio metodas

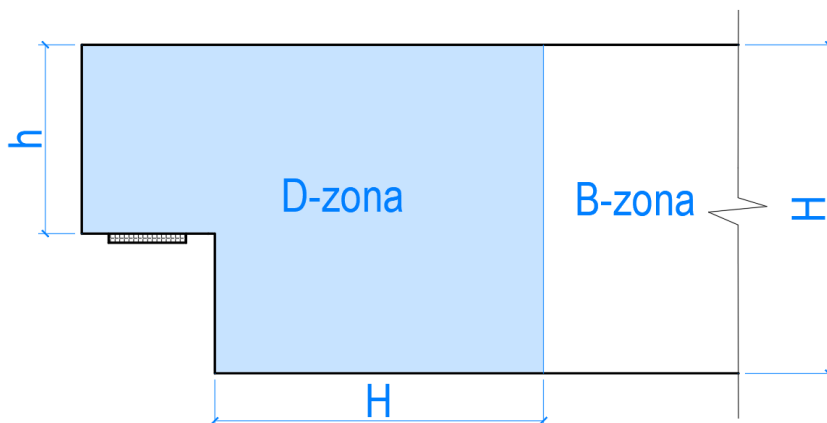
Kaip minėta 1.2.1 poskyryje, elementai gali būti dalinami į dviejų tipų ruožus – B-zonas, kuriose galioja Bernulio hipotezė, ir D-zonas, kuriose pasireiškia didelis įtempių ir deformacijų netiesiškumas. Daugelis projektavimo normų rekomenduoja D-zonas projektuoti taikant spyrių-stygų modelį (LST EN 1992-1-1 6.5.1 1 pastaba; ACI-318 23.1 pastaba) ir, nors, konkretaus spyrių-stygų modelio kiekvienam individualiam atvejui nepateikia, tačiau, remiantis normose aprašomais STM principais ir atsižvelgiant į suirimo pobūdžius, galima sudaryti modelį bet kuriai sijai su įpjova atraminiame mazge.

Goodchildas ir kt. aprašo 4 pagrindinius STM projektavimo etapus (Goodchild et al., 2014):

1. B- ir D-zonų elemente identifikavimas ir izoliavimas;
2. Spyrių-stygų modelio, kuris atvaizduoja įtempių pasiskirstymą D-zonoje, sudarymas ir modelyje veikiančių jėgų apskaičiavimas;
3. STM elementų projektavimas pagal apskaičiuotas jėgas;
4. 1 – 3 punktų kartojimas, kol bus pasiektas racionalus tikslumas pagal minimalią deformacinę energiją.

STM modeliavimas

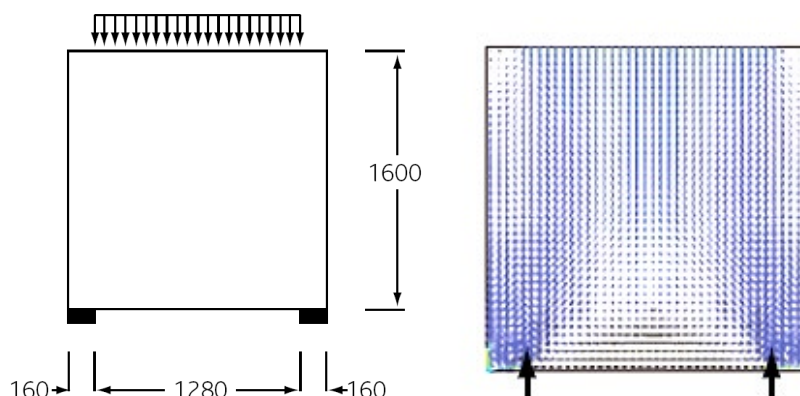
Identifikuoti ir atskirti sutrikdytus ruožus galima pagal 1.2.1 poskyryje aprašytą San Venano principą – įtempiai ir deformacijos pasiskirsto netiesiškai H atstumu nuo netiesiškumą sukėlusios sąlygos (žr. 1.39 pav.).



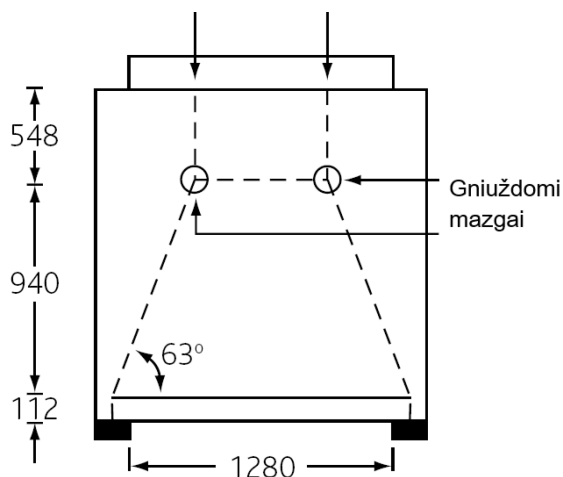
1.39 pav. Sijos su įpjova padalinimas į zonas

Spyrių ir stygų modeliai tai yra hipotetinės santvaros, kurias sudaro 3 tipų elementai: spyriai, stygos ir mazgai (ACI Committee 318, 2019). Spyriai atlaiko gniuždomąsias jėgas, stygos – tempiamąsias, o mazgai reprezentuoja vietas, kur stygos ir spyriai susijungia. Jų laikomąją galią taip pat reikia skaičiuoti. Priimama, kad tempimą atlaiko tik armatūra, o gniuždymą – tik betonas. Vadinasi, stygos – armatūros strypai, o spyriai – ruože esantis betonas.

Goodchildas su kolegomis teigia, kad, kaip galimybė, kuriant STM, pirmu žingsniu galima įvertinti įtempių kryptį pagal tiesinę analizę (Goodchild et al., 2014) (žr. 1.40 ir 1.41 pav.). Svarbu, kad gniuždomų įtempių krypties linijos per konstrukciją eitų nekertant viena kitos (ACI Committee 318, 2019; Goodchild et al., 2014). Toliau, įtempių srautai pakeičiami tiesiomis jėgų linijomis papildomai pridėdant trūkstamus spyrius ir stygas jėgų pusiausvyrai. Autoriai pabrėžia, kad spyriai gali būti orientuoti pagal principinių gniuždymo įtempių kryptis, tačiau armatūra turėtų būti orientuota lygiagrečiai arba statmenai elemento kraštams. Parenkant stygų išdėstymą, turi būti įvertintas armatūrai reikalingas apsauginis betono sluoksnis ir galimas poreikis armatūrą išdėstyti ne viena eile (Goodchild et al., 2014). Naudojant trigonometriją apskaičiuojamos idealizuotos jėgos spyriuose ir stygose.

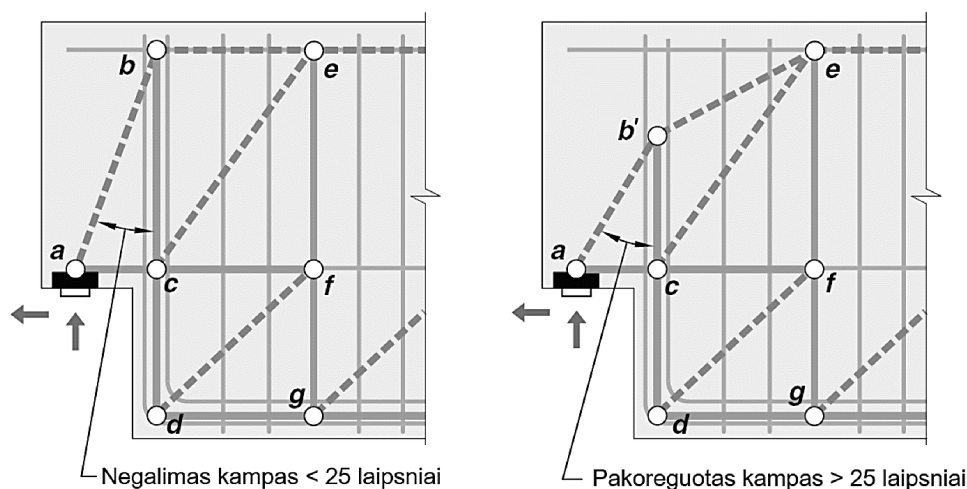


1.40 pav. Pavyzdinio elemento schema (kairėje) ir principinių įtempių kryptys iš tiesinės BE analizės (dešinėje) (Goodchild et al., 2014)



1.41 pav. Pavyzdinio elemento STM (Goodchild et al., 2014)

Kampas tarp stygos ir spyrio ašių, veikiančių viename mazge, turi būti pakankamo dydžio, kad apriboti betono pleišėjimą ir išvengti deformacijų nesuderinamumo, kai trumpėja spyris ir ilgėja styga į apytiksliai tą pačią pusę (ACI Committee 318, 2019). Goodchildas ir bendraautoriai rekomenduoja, kad kampas nebūtų mažesnis nei 35 laipsniai, o ACI-318 projektavimo normos pateikia mažiau griežtą reikalavimą, kad kampas negali būti mažesnis nei 25 laipsniai (Goodchild et al., 2014; ACI Committee 318, 2019). ACI-318 pateikia pavyzdį kaip mazgo su įpjova modelis gali būti pakoreguotas, kad ši sąlyga būtų tenkinama (žr. 1.42 pav.) LST EN 1992-1-1 6.5.4. 5 pastaboje pabrėžiama, kad jeigu visi kampai tarp spyrių ir stygų yra ne mažesni nei 55 laipsniai, gniuždomųjų įtempių ribinės reikšmės gali būti padidintos 10 %.

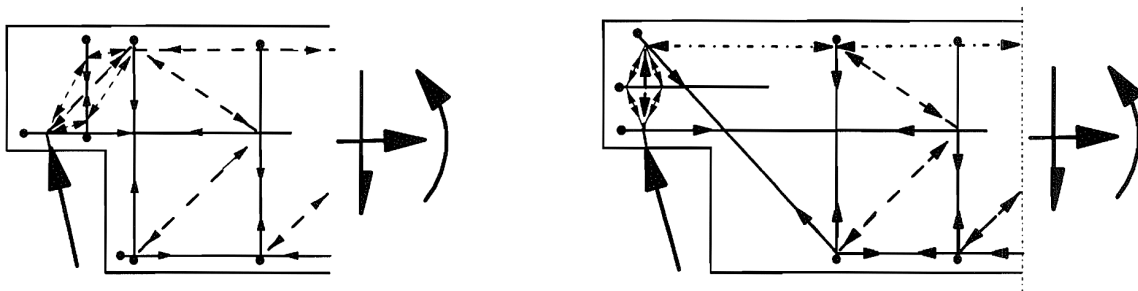


1.42 pav. Pakoreguotas mazgo su įpjova spyrio kampas (ACI Committee 318, 2019)

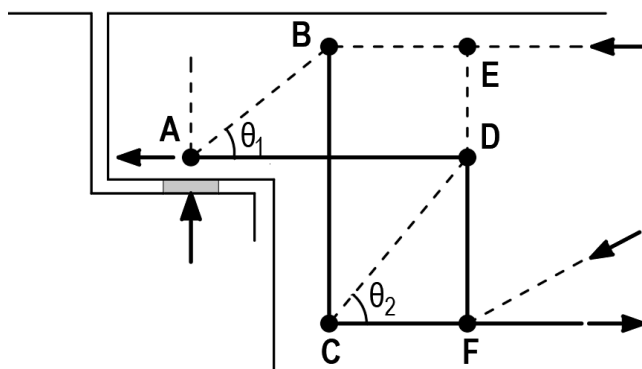
Vienai elemento apkrovimo situacijai dažnai galima suformuoti ne vieną tinkamą STM (Goodchild et al., 2014). Desnerckas ir bendraautoriai rašo, kad konkrečiam mazgui su įpjova, spyrio ir stygos modelis nėra unikalus, kadangi STM turi tenkinti tik jėgų pusiausvyrą ir suirimo kriterijus, tačiau neturi tenkinti deformacijų suderinamumo (Desnerck et al., 2018). Tai lemia, kad norint apskaičiuoti konkretaus mazgo laikomąją galią, sukurti naujo STM modelio nereikia – galima pritaikyti daugelį jau egzistuojančių modelių su sąlyga, kad išorinės apkrovos ir reakcijos jėgos yra pusiausvyroje tenkinamose ribose su numatomu vidinių jėgų pasiskirstymu.

Mazgo su įpjova modeliai literatūroje

Norint apskaičiuoti jau esamo mazgo su įpjova laikomąją galią, galima parinkti modelį, kurio stygos glaudžiai atitiktų esamo mazgo armatūros išdėstymą. Kai kurios projektavimo normos, tokios kaip EC2 (žr. 1.43 pav.) arba fib (žr. 1.44 pav.) pateikia rekomenduojamus orientacinius modelius atraminiams mazgams su įpjovomis. EC2 atveju galima taikyti vieną arba kitą, arba derinti kartu. Brūkšninės linijos žymi gniuždomuosius spyrius, o ištisinės – tempiamąsias stygas, o taškai žymi mazgus.

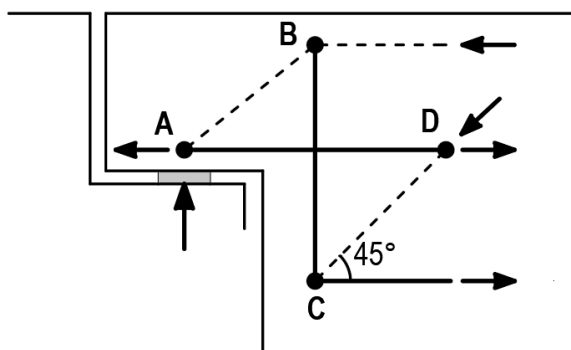


1.43 pav. Pavyzdinis EC2 jungties su įpjova modelis (LST EN 1992-1-1, 10.4 pav.)

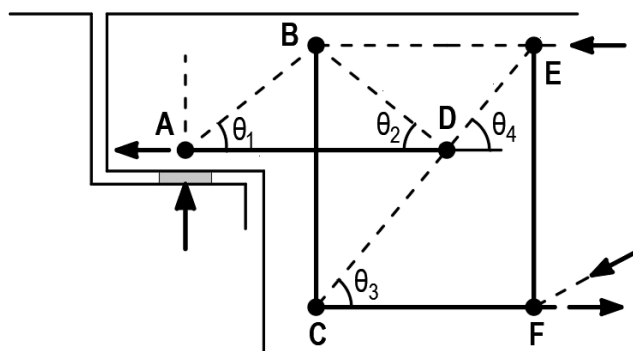


1.44 pav. Pavyzdinis fib jungties su įpjova modelis (pagal fib International Federation..., 2013)

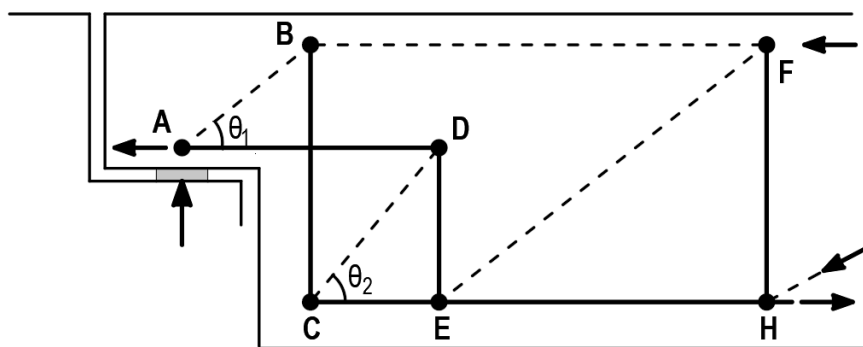
Literatūroje galima rasti ir įvairių autorių pateikiamus STM atraminiams mazgams su įpjovomis. Toliau pateikiami skirtingi modeliai (žr. 1.45, 1.46, 1.47 pav.).



1.45 pav. Supaprastintas STM modelis pagal Mattocką (pagal Mattock, 2012)



1.46 pav. Cooko ir Mitchello pasiūlytas STM modelis (pagal Cook and Mitchell, 1988)



1.47 pav. Schlaicho ir Schäferio pasiūlytas STM modelis (pagal Schlaich and Schäfer, 2001)

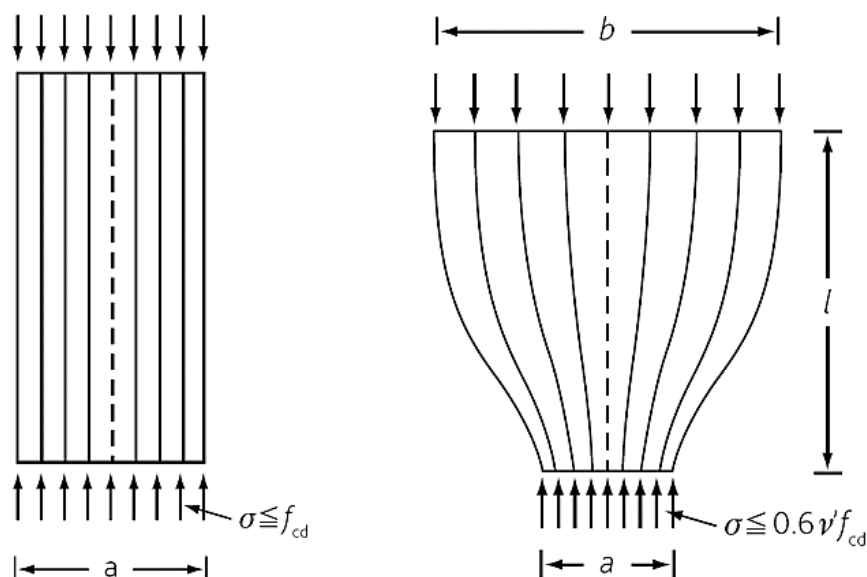
Cooko ir Mitchello pasiūlytas modelis buvo pritaikytas ACI projektavimo pavyzdžiuose SP-208 ir SP-273 (Sanders, 2002; Mitchell et al., 2010), tačiau Mattockas nustatė, kad 1.46 pav. pavaizduotas modelis nėra nuoseklus stebimai mazgo elgsenai. Vienas iš jo didelių trūkumų yra tai, kad šis modelis stipriai pervertina jėgą, kurią perima skersinė armatūra stygoje BC ir to pasėkoje reikalauja daugiau armatūros, negu iš tiesų yra būtina (Mattock, 2012). 1.44 pav. atvaizduotas fib spyrių ir stygų modelis teisingai įvertina reikalingą skersinės armatūros kiekį stygoje BC, tačiau, jeigu AD stygai už D mazgo yra užtikrinamas pakankamas inkaravimas, tuomet DF styga yra apskritai nebūtina (Mattock, 2012). Šių modelių trūkumams spręsti Mattockas siūlo 1.45 pav. pavaizduotą supaprastintą modelį, kuris, anot autoriaus, nuosekliausiai ir racionaliausiai įvertina reikalingą armatūros kiekį mazge su įpjova.

Spyrių laikomoji galia

Projektavimo normos ir autoriai literatūroje pateikia skirtingus betono stiprius spyriuose. Desnerckas susistemina įvairius reikalavimus ir teigia, kad stipriai, atsižvelgiant į įvairias aplinkybes, kinta nuo $0,3 \cdot f_c$ iki $1,0 \cdot f_c$ priklausomai nuo apkrovimo sąlygų, spyrių vietos, kampo, veikiančių vidinių jėgų, numatomo pleišėjimo ir elemento tipo (Desnerck et al., 2018). Šiame darbe pasirenkama skaičiuoti pagal EC2 rekomendacijas.

Pagal EC2 spyrius galima klasifikuoti į 2 pagrindines kategorijas (žr. 1.48 pav.):

1. Prizminiai spyriai, dažniausiai pasireiškiantys B-zonose.
2. Butelio formos spyriai aptinkami D-zonose dėl įtempių sklaidos nuo koncentruotų apkrovų ar reakcijų.



1.48 pav. Prizminiai (kairėje) ir butelio formos (dešinėje) spyriai (Goodchild et al., 2014)

Skersinio tempimo neveikiamų betono spyrių (prizminių spyrių) skaičiuotinis stipris yra lygus (LST EN 1992-1-1, 1 pastaba):

$$\sigma_{Rd,max} = f_{cd}, \quad (1.14)$$

čia: f_{cd} – betono skaičiuotinis gniuždomasis stipris, Pa; $\sigma_{Rd,max}$ – betono spyrio skaičiuotinis stipris, Pa.

Vadinasi, maksimali spyrio atlaikomoji jėga F_{Rd} apskaičiuojama taip:

$$F_{Rd} = f_{cd} \cdot t \cdot a, \quad (1.15)$$

čia: t – spyrio storis (pagal EC2, jį galima prilyginti elemento storiui), m; a – spyrio plotis, kuris priklauso nuo mazgo išmatavimų (apie spyrio plotį bus aprašoma vėliau), m.

Supleišėjusiose gniuždomosiose zonose, ten kur veikia bet koks skersinis tempimas, betono spyrių skaičiuotinis stipris prilyginamas tokiai reikšmei (LST EN 1992-1-1, 2 pastaba):

$$\sigma_{Rd,max} = 0,6 \cdot \nu \cdot f_{cd}, \quad (1.16)$$

čia: f_{cd} – betono skaičiuotinis gniuždomasis stipris, Pa; $\sigma_{Rd,max}$ – betono spyrio skaičiuotinis stipris, Pa; ν – supleišėjusio betono stiprį įvertinantis koeficientas, kuris yra apskaičiuojamas pagal tokią formulę:

$$\nu = 1 - \frac{f_{ck}}{250}, \quad (1.17)$$

čia: f_{ck} – betono charakteristinis stipris.

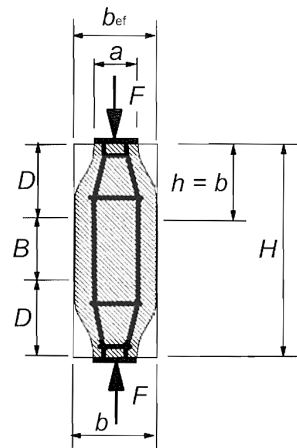
Vadinasi, ten kur veikia skersinis tempimas, spyrio laikomoji jėga lygi:

$$F_{Rd} = 0,6 \cdot v \cdot f_{cd} \cdot t \cdot a. \quad (1.18)$$

Jeigu spyrio laikomoji galia yra nepakankama, galima skaičiuoti spyrio skersinio armavimo armatūrą ir stiprį padidinti nuo $0,6 \cdot v \cdot f_{cd}$ iki $1,0 \cdot v \cdot f_{cd}$ (Goodchild et al., 2014). EC2 pateikia formules apskaičiuoti tempiamąją jėgą dviejose netolydumo situacijose.

Dalinio netolydumo srityse ($b \leq \frac{H}{2}$) tempiamoji jėga apskaičiuojama taip (LST EN 1992-1-1, 6.58 formulė) (žr. 1.49 pav.):

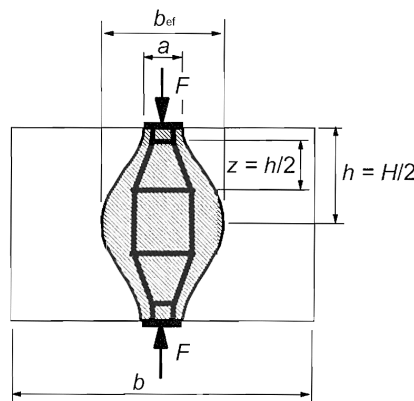
$$T = \frac{1}{4} \cdot \frac{b - a}{b} \cdot F. \quad (1.19)$$



1.49 pav. Dalinis netolydumas (LST EN 1992-1-1, 6.25 pav.)

Visiško netolydumo srityse ($b > \frac{H}{2}$) tempiamoji jėga apskaičiuojama taip (LST EN 1992-1-1, 6.59 formulė) (žr. 1.50 pav.):

$$T = \frac{1}{4} \cdot \left(1 - 0,7 \cdot \frac{a}{h}\right) \cdot F. \quad (1.20)$$



1.50 pav. Visiškas netolydumas (LST EN 1992-1-1, 6.25 pav.)

Apskaičiavus tempiamąsias jėgas, butelio formos spyriuose reikia patikrinti ar skersiniai įtempiai nesuardys spyrio pagal tokią formulę (Goodchild et al., 2014):

$$T \leq 0,3 \cdot t \cdot H \cdot f_{ctd}, \quad (1.21)$$

čia: t – spyrio storis, m ; H – spyrio ilgis, m ; f_{ctd} – tempiamasis betono skaičiuotinis stipris, Pa .

Jeigu sąlyga netenkinama, reikia skaičiuoti reikalingą armatūros kiekį (Goodchild et al., 2014):

$$T = \sum A_{si} \cdot f_{yd} \cdot \sin \alpha, \quad (1.22)$$

čia: A_{si} – armatūros plotas, m^2 ; f_{yd} – armatūros skaičiuotinis stipris, Pa ; α – kampas, kurį armatūra sudaro su spyrio ašimi.

Stygų laikomoji galia

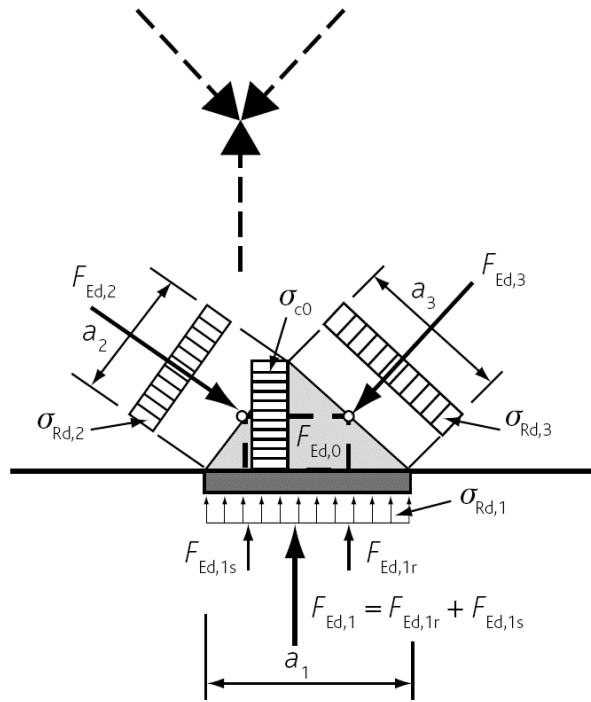
Priimama, kad tempimo jėgas stygose atlaiko tik armatūros strypai. Todėl stygų laikomoji galia gali būti apskaičiuojama taip:

$$F_{Rd} = A_s \cdot f_{yd}, \quad (1.23)$$

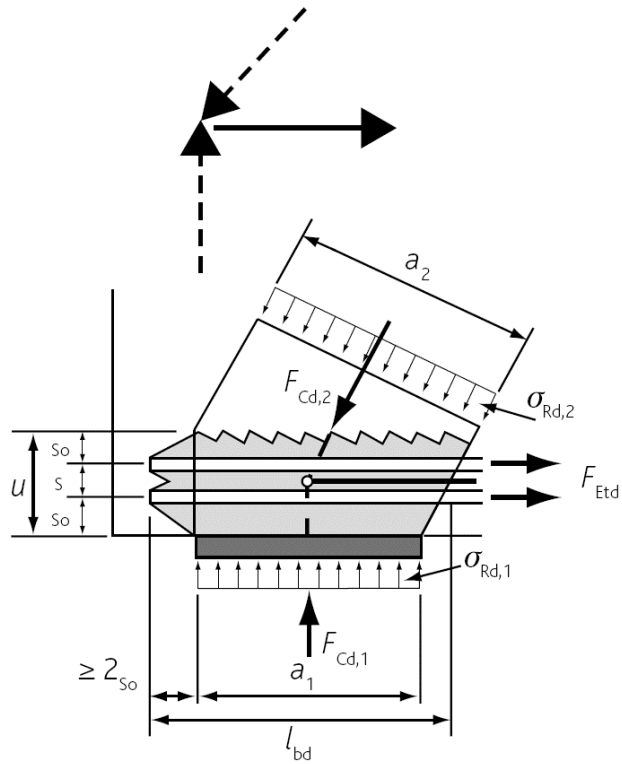
čia: A_s – visų armatūros strypų esančių stygoje plotas, m^2 ; f_{yd} – armatūros skaičiuotinis stipris, Pa .

Mazgų laikomoji galia

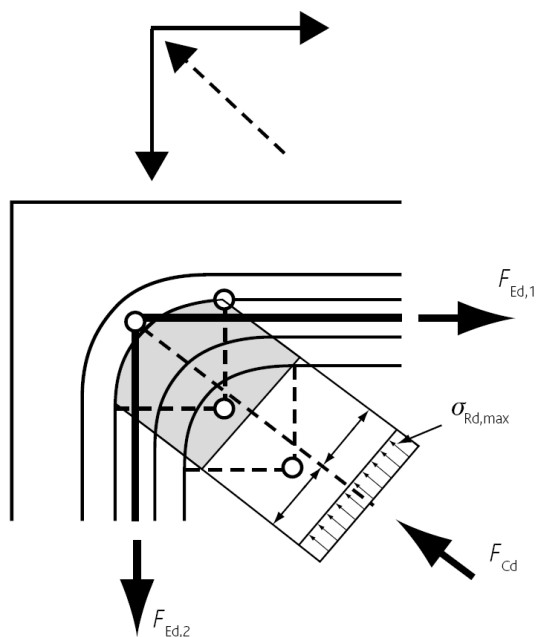
EC2 spyrių ir stygų modelio mazgus klasifikuoja į 3 kategorijas – gniuždomasis mazgas be stygų (LST EN 1992-1-1, 6.26 pav.) arba gniuždymo-gniuždymo-gniuždymo mazgas (toliau – GGG mazgas) (žr. 1.51 pav.), gniuždymo ir tempimo veikiamas mazgas su vienakrypte armatūra (LST EN 1992-1-1, 6.27 pav.) arba gniuždymo-gniuždymo-tempimo mazgas (toliau – GGT) (žr. 1.52 pav.), gniuždymo ir tempimo mazgas su dvikrypte armatūra (LST EN 1992-1-1, 6.28 pav.) arba gniuždymo-tempimo-tempimo mazgas (toliau – GTT mazgas) (žr. 1.53 pav.)



1.51 pav. GGG mazgas pagal EC2 (Goodchild et al., 2014)



1.52 pav. GGT mazgas pagal EC2 (Goodchild et al., 2014)



1.53 pav. GTT mazgas pagal EC2 (Goodchild et al., 2014)

Desnerckas ir kt. rašo, kad mazguose su įpjova įprastai aptinkami GGT ir GTT mazgai, daug rečiau – GGG ir TTT mazgai (Desnerck et al., 2018). EC2 nurodo kiekvieno mazgo tipo didžiausius įtempius, kurie gali veikti mazgo kraštuose. GGG mazge maksimalūs leidžiami įtempiai apskaičiuojami taip (LST EN 1992-1-1, 6.60 formulė):

$$\sigma_{Rd,max} = k_1 \cdot \nu \cdot f_{cd}, \quad (1.24)$$

čia: k_1 – koeficientas, kurio reikšmę rekomenduojama priimti lygią 1,0; f_{cd} – skaičiuotinis betono stipris, Pa; ν – supleišėjusio betono stiprį įvertinantis koeficientas, apskaičiuojamas pagal anksčiau nurodytą formulę:

$$\nu = 1 - \frac{f_{ck}}{250}. \quad (1.25)$$

GGT mazge maksimalūs leidžiami betono įtempiai (LST EN 1992-1-1, 6.61 formulė):

$$\sigma_{Rd,max} = k_2 \cdot \nu \cdot f_{cd}, \quad (1.26)$$

čia: k_2 – koeficientas, kurio reikšmę rekomenduojama priimti lygią 0,85; f_{cd} – skaičiuotinis betono stipris, Pa; ν – supleišėjusio betono stiprį įvertinantis koeficientas.

GTT mazge maksimalūs leidžiami betono įtempiai (LST EN 1992-1-1, 6.62 formulė):

$$\sigma_{Rd,max} = k_3 \cdot \nu \cdot f_{cd}, \quad (1.27)$$

čia: k_3 – koeficientas, kurio reikšmę rekomenduojama priimti lygią 0,75; f_{cd} – skaičiuotinis betono stipris, Pa; ν – supleišėjusio betono stiprį įvertinantis koeficientas.

Mazgo krašto laikomoji galia F_{Rd} apskaičiuojama:

$$F_{Rd} = \sigma_{Rd,max} \cdot a_i \cdot t, \quad (1.28)$$

čia: $\sigma_{Rd,max}$ – maksimalūs leidžiami krašto įtempiai, Pa; a_i – i krašto mazgo plotis, kuris lemia ir nuo jo prasidedančio spyrio plotį m ; t – elemento plotis, m .

Mazgo ir spyrio pločiai nustatomi pagal pavyzdines mazgo schemas. GGT mazge a_2 plotį galima apskaičiuoti (Goodchild et al., 2014):

$$a_2 = a_1 \cdot \sin \theta + u \cdot \cos \theta, \quad (1.29)$$

čia: θ – kampas tarp spyrio ašies ir atramos, laipsniais; a_1 – atraminio mazgo krašto plotis apskaičiuojamas:

$$a_1 = l_b - 2 \cdot s_0, \quad (1.30)$$

čia: l_b – atramos ilgis, m; s_0 – atstumas nuo armatūros strypų centrinės ašies iki krašto, m;

Rekomenduojama tempiamosios stygos plotį u apskaičiuoti (Goodchild et al., 2014):

$$u = 2 \cdot s_0 + (n - 1) \cdot s, \quad (1.31)$$

čia: s – atstumas tarp armatūros eilių, m; n – armatūros eilių skaičius.

Mazgo su įpjova laikomoji galia

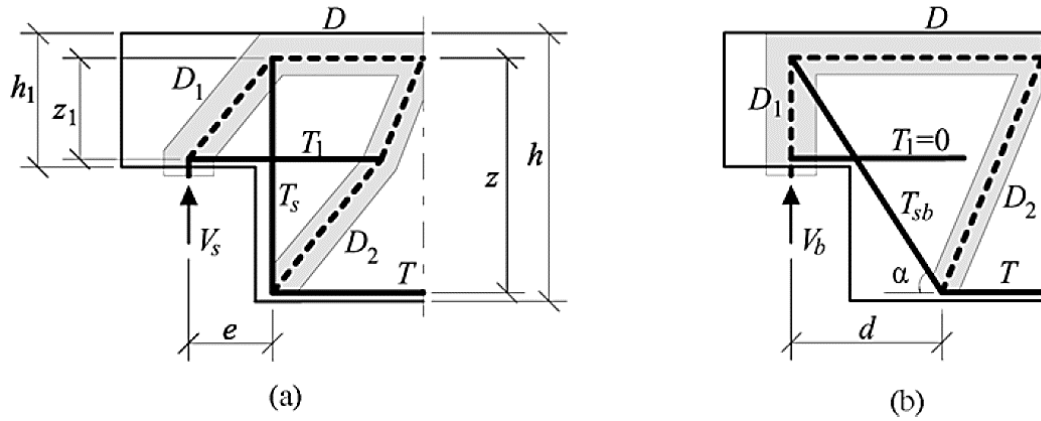
Galiausiai, atsižvelgiant į 4 pagrindinius STM projektavimo etapus, galima suformuoti 4 mazgo su įpjova laikomosios galios apskaičiavimo 4 etapus:

1. D- ir B-zonų nagrinėjamame elemente identifikavimas.
2. Pagal esamą elemento armavimo schemą, sudarymas arba parinkimas tinkamiausio spyrių–stygų modelio iš pateikiamų literatūroje, kuris kuo tiksliau atitiktų realią mazgo elgseną.
3. Jėgų, veikiančių hipotetinės santvaros elementuose, apskaičiavimas ir jų santykio su išorinės apkrovos reikšme nustatymas.
4. Santvaros elementų laikomosios galios apskaičiavimas ir pagal jėgų santykį su išorine apkrova, nustatymas, kuris elementas atlaiko mažiausią išorinės apkrovos reikšmę. Ta reikšmė yra mazgo laikomoji galia.

1.3.3. Pusiau empirinis santvaros metodas

Wangas pasiūlė pusiau empirinį santvaros modelį skirtą skaičiuoti mazgų su įpjovomis laikomąją galią (Wang et al., 2005). Autoriai pasiūlė du santvarų variantus – (a) santvaros modelį,

skirtą skaičiuoti laikomąją galią, kai skersinė armatūra išdėstyta vertikaliai ir (b) – galią, kai naudojama įstriža armatūra (žr. 1.54 pav.).



1.54 pav. Vidinės jėgos sijų su įpjova atraminiuose mazguose (Wang et al., 2005)

Ištisinės linijos ir raidės T žymi tempimo vidines jėgas, o brūkšniuotos linijos ir raidės D žymi veikiančias gniuždymo jėgas. Tokiais pažymėjimais ir schema vaizduojamas ryšys tarp išorinių šlyties jėgų V_s , atlaikomų santvaros, ir veikiančių vidinių jėgų. Autoriai siūlo pirmines pusiausvyros lygtis (a) (Wang et al., 2005):

$$V_s = T_s, \quad (1.32)$$

$$T_1 = V_s \cdot \frac{e}{z_1}, \quad (1.33)$$

čia: V_s – šlyties jėga; T_s – visos skersinės armatūros prie įpjovos krašto suminė jėga; T_1 – išilginės armatūros sijos gale suminė jėga; e – atstumas nuo atramos vidurio taško iki jėgos T_s veikimo ašies; z_1 – atstumas nuo T_1 veikimo ašies iki D veikimo ašies.

Kai atraminiame mazge naudojama įstriža armatūra pasvirusi kampų α , pagal (b) schemą užrašomos lygtys (Wang et al., 2005):

$$V_b = D_1, \quad (1.34)$$

$$D_1 = T_{sb} \cdot \sin \alpha, \quad (1.35)$$

$$T_{sb} = A_{sb} \cdot f_y, \quad (1.36)$$

$$V_b = A_{sb} \cdot f_y \cdot \sin \alpha, \quad (1.37)$$

čia: V_b – skersinė jėga tenkanti įstrižajai armatūrai; T_{sb} – visos įstrižosios armatūros suminė tempiamoji jėga; A_{sb} – įstrižosios armatūros skerspjūvio plotas; f_y – ribiniai armatūros įtempiai.

Mazgo įstrižojo pjūvio laikomąją galią V_N lemia suma dviejų pagrindinių komponentų – nesupleišėjusio betono dalis, kuri perima šlytį V_c ir tempiamoji jėga V_s veikianti skersinėje armatūroje (Wang et al., 2005):

$$V_N = V_c + V_s. \quad (1.38)$$

čia: V_s – atlaikomoji vertikalios arba įstrižos armatūros jėga.

Jeigu naudojama vertikali ir įstriža armatūra vienu metu, laikomoji galia lygi:

$$V_N = V_c + V_s + V_b, \quad (1.39)$$

čia: V_s – atlaikomoji vertikalios armatūros jėga, N ; V_b – atlaikomoji įstrižosios armatūros jėga, N .

Atskirų komponentų laikomoji galia nustatoma (Wang et al., 2005):

$$V_c = \beta_1 \cdot f_c \cdot b \cdot h_{10}, \quad (1.40)$$

čia: V_c – betono atlaikomos skersinės jėgos dalis, N ; f_c – betono gniuždomasis stipris; b – elemento plotis; h_{10} – efektyvusis sijos galo aukštis; β_1 – koeficientas įvertinantis supleišėjusio betono įtaką skersinei jėgai. Regresinės analizės metu nustatyta, kad $\beta_1 = 0,0546$.

$$V_s = \beta_2 \cdot A_{sv} \cdot f_{yv}, \quad (1.41)$$

čia: V_s – skersinės jėgos dalis, kurią atlaiko vertikalioji armatūra; A_{sv} – vertikaliai išdėstytos armatūros prie įpjovos krašto plotas; f_{yv} – armatūros ribiniai įtempiai; β_2 – koeficientas, įvertinantis armatūros jėgų persiskirstymą į bendrą darbą. Regresinės analizės metu nustatyta, kad $\beta_2 = 0,8583$.

$$V_b = \beta_3 \cdot A_{sb} \cdot f_y \cdot \sin \alpha, \quad (1.42)$$

čia: V_b – skersinės jėgos dalis, kurią atlaiko įstrižoji armatūra; A_{sb} – įstrižos armatūros prie įpjovos krašto plotas; f_y – armatūros ribiniai įtempiai; β_3 – koeficientas, įvertinantis armatūros jėgų persiskirstymą į bendrą darbą. Autoriai tyrime pateikia, kad $\beta_3 = 1,0$.

Galutinę įstrižojo pjūvio laikomosios galios formulę galima užrašyti taip (Wang et al., 2005):

$$V_N = 0,0546 \cdot f_c \cdot b \cdot h_{10} + 0,8583 \cdot A_{sv} \cdot f_{yv} + A_{sb} \cdot f_y \cdot \sin \alpha. \quad (1.43)$$

Jeigu mazgo laikomąją galią lemia sijos galo gembinio lenkimo laikomoji galia, tuomet ribinė reikšmė gali būti apskaičiuota (Wang et al., 2005):

$$V_N = \frac{A_{s1} \cdot f_y \cdot h_{10}}{1,18 \cdot e}, \quad (1.44)$$

čia: A_{s1} – išilginės armatūros sijos gale plotas; f_y – armatūros ribiniai įtempiai; h_{10} – efektyvusis sijos galo aukštis; e – šlyties ruožo ilgis pavaizduotas 1.54 pav.

1.3.4. Įstrižojo pjūvio laikomosios galios skaičiavimas pagal EC2

1.2.2 poskyryje nustatyta, kad dominuojantis atraminio mazgo su įpjova suirimas yra dėl šlyties jėgų poveikio, todėl universalus EC2 įstrižojo pjūvio skaičiavimo metodas gali būti kaip galima alternatyva mazgo laikomosios galios skaičiavimui. Šis skaičiavimo metodas pasirenkamas dėl dviejų priežasčių. Pirmą yra tam, kad palyginti anksčiau aprašytų tikslingų metodų atraminiams mazgams su įpjova rezultatus su projektavimo normose pateikiamu universaliu metodu skirtu įvairių tipų elementams. Antra priežastis yra ta, kad šis metodas gali įvertinti armatūros įtempimo sukeltą poveikį laikomajai galiai.

Pagal EC2, galima išskirti dvi pagrindines įstrižojo pjūvio skaičiavimo situacijas. Pirmą situaciją, kai elemente nėra skersinės armatūros ir šlyties jėgas atlaiko betonas, o antra – kai jėgas atlaiko skersinė armatūra ir gniuždomi betono spyriai.

Pirmuoju atveju, įstrižojo pjūvio laikomoji galia yra didesnė reikšmė pagal žemiau pateiktas formules (LST EN 1992-1-1, 1 pastaba):

$$V_{Rd,c} = \left[C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} + k_1 \cdot \sigma_{cp} \right] \cdot b_w \cdot d, \quad (1.45)$$

ir

$$V_{Rd,c} = [v_{min} + k_1 \cdot \sigma_{cp}] \cdot b_w \cdot d, \quad (1.46)$$

čia: $C_{Rd,c}$ – koeficientas, kurio reikšmę rekomenduojama priimti lygiai $\frac{0,18}{\gamma_c}$; k – efektyvųjų aukštį įvertinantis koeficientas, apskaičiuojamas pagal tokią formulę:

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0, \quad (1.47)$$

čia: d – efektyvusis skerspjūvio aukštis.

ρ_1 – tempiamosios armatūros kiekį už $l_{bd} + d$ atstumo įvertinantis koeficientas, jis apskaičiuojamas taip:

$$\rho_1 = \frac{A_{s1}}{b_w \cdot d} \leq 0,02, \quad (1.48)$$

čia: A_{s1} – tempiamosios armatūros skerspjūvio plotas; b_w – mažiausias nagrinėjamo elemento plotis nagrinėjamoje zonoje.

f_{ck} – charakteristinis gniuždomasis betono stipris; k_1 – skerspjūvio įtempių nuo ašinės jėgos įtaką įstrižojo pjūvio jėgai įvertinantis koeficientas, kurį rekomenduojama prilyginti 0,15;

σ_{cp} – per visą skerspjūvį suvidurkinti įtempiai susidarantys nuo ašinių jėgų. Jie yra ribojami tokios sąlygos:

$$\sigma_{cp} = \frac{N_{Ed}}{A_c} < 0,2 \cdot f_{cd}, \quad (1.49)$$

čia: N_{Ed} – ašinė jėga skerspjūvyje susidariusi dėl apkrovos arba išankstinio įtempimo; A_c – elemento skerspjūvio plotas; f_{cd} – skaičiuotinis gniuždomasis betono stipris.

v_{min} apskaičiuojamas pagal tokią lygtį:

$$v_{min} = 0,035 \cdot k^{\frac{3}{2}} \cdot f_{ck}^{\frac{1}{2}}. \quad (1.50)$$

Kai elementas yra armuotas skersine armatūra, o atraminio mazgo su įpjova atveju taip ir yra, įstrižojo pjūvio laikomoji galia yra mažesnė iš dviejų reikšmių:

$$V_{Rd} = \min[V_{Rd,s}; V_{Rd,max}], \quad (1.51)$$

čia: $V_{Rd,s}$ – skersinės armatūros laikomoji galia; $V_{Rd,max}$ – maksimali įstrižojo pjūvio laikomoji galia atsižvelgiant į gniuždomo betono stiprį;

Šias laikomąsias galias galima apskaičiuoti pagal LST EN 1992-1-1 dviem atvejais – vertikalios skersinės armatūros ir įstrižos armatūros. Statmenai skerspjūvyje išdėstytos armatūros laikomoji galia apskaičiuojama taip (LST EN 1992-1-1, 6.8 formulė):

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot \theta, \quad (1.52)$$

čia: A_{sw} – skersinės armatūros skerspjūvio plotas; s – tarpas tarp apkabų; z – vidinis petys, kurį galima prilyginti apytikslei $0,9d$ reikšmei; f_{ywd} – skaičiuotinis skersinės armatūros stipris; θ – spyrio posvyrio kampas, ribojamas nuo 22 laipsnių iki 45 laipsnių. Posvyrio kampui esant 45 laipsniams, $V_{Rd,s}$ laikomoji galia yra mažiausia.

Gniuždomo betono spyrio laikomoji galia apskaičiuojama taip (LST EN 1992-1-1, 6.9 formulė):

$$V_{Rd,max} = \frac{\alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd}}{\cot \theta + \tan \theta}, \quad (1.53)$$

čia: b_w – mažiausias elemento plotis nagrinėjamoje zonoje; z – vidinis petys, kurį galima prilyginti apytikslei $0,9d$ reikšmei; v_1 – supleišėjusio betono įstrižajame pjūvyje stiprį įvertinantis koeficientas, kuris apskaičiuojamas pagal anksčiau šiame poskyryje nurodytą formulę arba gali

būti padidintas pagal toliau nurodytas sąlygas, sumažinus skersinės armatūros skaičiuotinius įtempius iki mažiau kaip 80 % charakteristinio stiprio:

$$v_1 = 0,6, \text{ kai } f_{ck} \leq 60 \text{ MPa}, \quad (1.54)$$

$$v_1 = 0,9 - \frac{f_{ck}}{200}, \text{ kai } f_{ck} \geq 60 \text{ MPa}. \quad (1.55)$$

θ – spyrio posvyrio kampas, ribojamas nuo 22 laipsnių iki 45 laipsnių. Posvyrio kampui esant 22 laipsniams, $V_{Rd,max}$ laikomoji galia yra mažiausia. Koeficientas α_{cw} įvertina gniuždomosios juostos įtempių būvio įtaką skersinei galiai. Konstrukcijoms be išankstinio įtempimo jis prilyginamas 1,0. Kitais atvejais jis apskaičiuojamas taip:

$$\alpha_{cw} = \left(1 + \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}}\right), \text{ kai } 0 < \sigma_{cp} < 0,25f_{cd}; \quad (1.56)$$

$$\alpha_{cw} = 1,25, \text{ kai } 0,25f_{cd} < \sigma_{cp} < 0,5f_{cd}; \quad (1.57)$$

$$\alpha_{cw} = 2,5 \left(1 - \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}}\right), \text{ kai } 0,5f_{cd} < \sigma_{cp} < 1,0f_{cd}; \quad (1.58)$$

čia: σ_{cp} – per visa skerspjūvį suvidurkinti įtempiai nuo ašinės jėgos. Jie yra teigiami, kai skerspjūvis gniuždomas.

Jeigu elemente skersinė armatūra išdėstyta įstrižai, tuomet laikomoji galia apskaičiuojama taip (LST EN 1992-1-1, 6.13 formulė):

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot (\cot \theta + \cot \alpha) \cdot \sin \alpha, \quad (1.59)$$

čia: α – posvyrio kampas tarp skersinės armatūros ir ašies statmenos skersinei jėgai, laipsniais.

Gniuždomojo spyrio laikomoji galia skaičiuojama taip (LST EN 1992-1-1, 6.14 formulė):

$$V_{Rd,max} = \frac{\alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd} \cdot (\cot \theta + \cot \alpha)}{1 + \cot^2 \theta}, \quad (1.60)$$

čia: α – posvyrio kampas tarp skersinės armatūros ir ašies statmenos skersinei jėgai, laipsniais.

Skyriaus išvados:

1. Mazgus su įpjovomis dėl geometrijos ir apkrovos nevientisumo nerekomenduojama projektuoti įprastais metodais. Norint užtikrinti skaičiavimų patikimumą ir saugumą reikia projektuoti taikant metodus skirtus tokio tipo mazgų projektavimui. Du pagrindiniai metodai – tai PCI šlyties-trinties metodas ir spyrių-stygų modelio metodas.
2. Elementai, turintys įpjovas atraminiuose mazguose, dažniausiai suyra dėl šlyties jėgų atraminio mazgo zonoje, nes tai yra pavojingiausias elemento ruožas dėl didelės įtempių koncentracijos aplink įpjovą.
3. Pagrindinis parametras nusakantis mazgo su įpjova elgseną yra a/d santykis. Jam mažėjant, mazgo laikomoji galia didėja, o suirimo pobūdis artėja prie gryniosios šlyties. Santykiui didėjant, laikomoji galia mažėja, o suirimas artėja prie lenkimo pobūdžio.
4. Pagerinti elemento su įpjova elgseną darbinės stadijos metu ir padidinti maksimalią laikomąją galią galima naudojant įtemptąją armatūrą, daugiau nei pusė įtemptos armatūros pratęsiant iki sijos galo.
5. Įtempta armatūra, kuri nepratęsima iki sijos galo, sukelia pavojingus tempimo įtempius vidiniame įpjovos kampe ir labai stipriai padidina pleišėjimą.
6. Yra trūkumas tyrimų, kurie analizuotų įtemptos armatūros poveikį mazgo su įpjova laikomosios galios mažėjimui.
7. Literatūroje trūksta STM modelių mazgams su įpjova, kurie įvertintų papildomas jėgas, kai elemente yra naudojama įtemptą armatūrą. Dažniausiai tik įprastos įstrižojo pjūvio projektavimo metodai įvertina įtemptos armatūros įtaką.

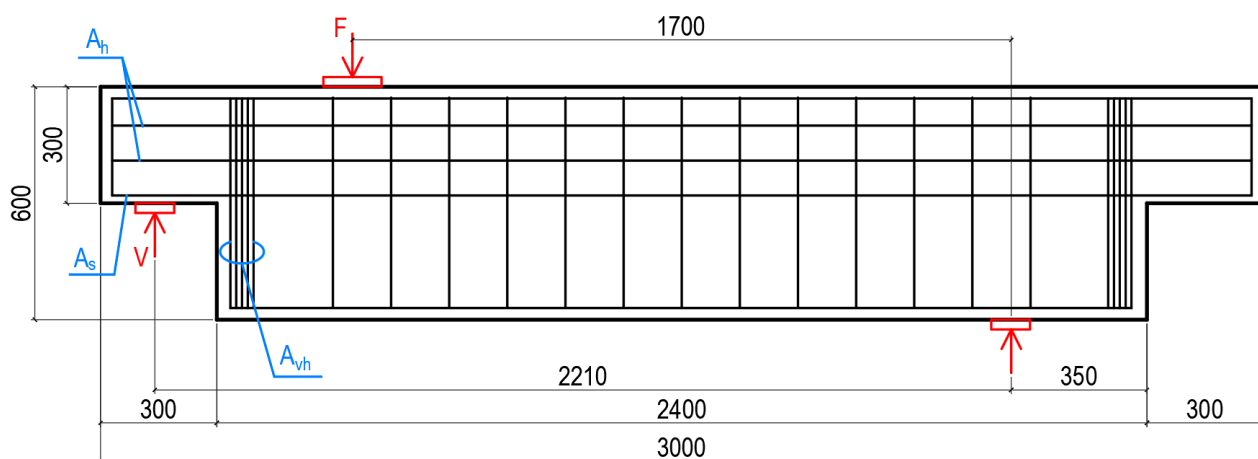
2. ANALITINIAI GELŽBETONINIŲ SIJŲ SU ĮPJOVA SKAIČIAVIMAI

Šiame skyriuje tirta surenkamų gelžbetoninių sijų su įpjova atraminiame mazge laikomoji galia. Skirtingais metodais apskaičiuojama laikomoji galia ir palyginamas skaičiavimų metodų tikslumas. Atliekama parametrinė analizė, palyginami rezultatai tarp metodų ir patikrinamos koreliacijos su literatūroje aprašoma elgsena. Analitiškai nustatomas įtemptos armatūros poveikis laikomajai galiai.

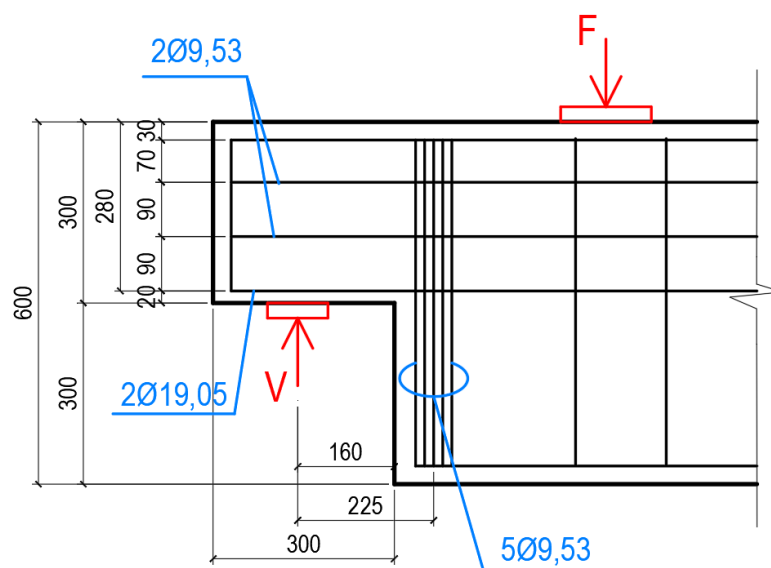
2.1. Analitinė atraminio mazgo laikomosios galios analizė

Analizei atlikti parenkamas pagal PCI armavimo schemą suprojektuotas sijos su įpjova lenkiamas elementas, aprašytas Lu ir kt. tyrime (Lu et al., 2003). Jo schema pateikiama 2.1 paveiksle, o atraminis mazgas detalizuojamas 2.2 paveiksle. Sijos betono gniuždomasis stipris $f_c = 33,7 \text{ MPa}$. Vertikalios skersinės armatūros skerspjūvio plotas $A_{vh} = 713,3 \text{ mm}^2$, stipris $f_{yv} = 416,14 \text{ MPa}$. Horizontalios sijos galo armatūros skerspjūvio plotas $A_h = 285,3 \text{ mm}^2$, stipris $f_{yh} = 368 \text{ MPa}$. Sijos galo išilginės armatūros skerspjūvio plotas $A_s = 573,0 \text{ mm}^2$, stipris $f_y = 461,82 \text{ MPa}$. Bandinio a/d santykis lygus 0,80. Gniuždomosios zonos aukščio skaičiavimams, STM metodui, sijos gniuždomosios zonos išilginė armatūra priimama lygi A_h armatūrai.

Eksperimento metu bandinys apkraunamas tolygiai didėjančia apkrova F iki mazgo suirimo. Pasiiekta maksimali apkrova $F = 378 \text{ kN}$. Esant maksimaliai apkrovai, skersinė jėga, veikianti mazgą (atraminė reakcija), lygi $V = F \cdot \frac{1700}{2210} = 290,77 \text{ kN}$.

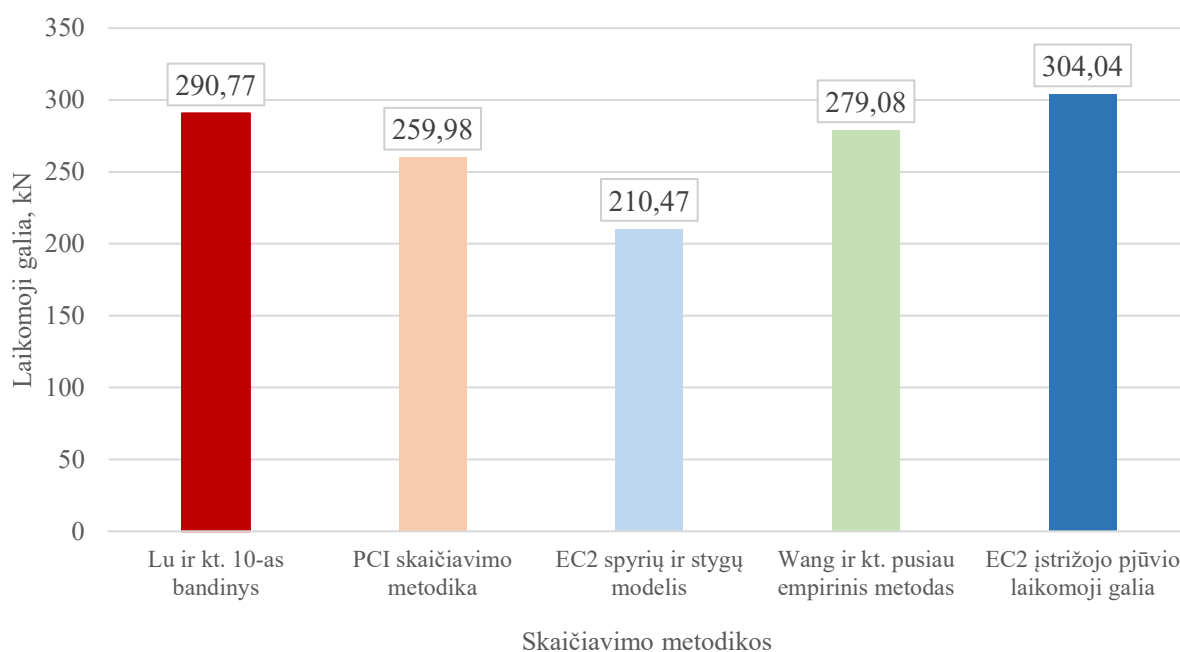


2.1 pav. Lu ir kt. bandinio Nr. 10 schema (matmenys nurodyti **mm**)

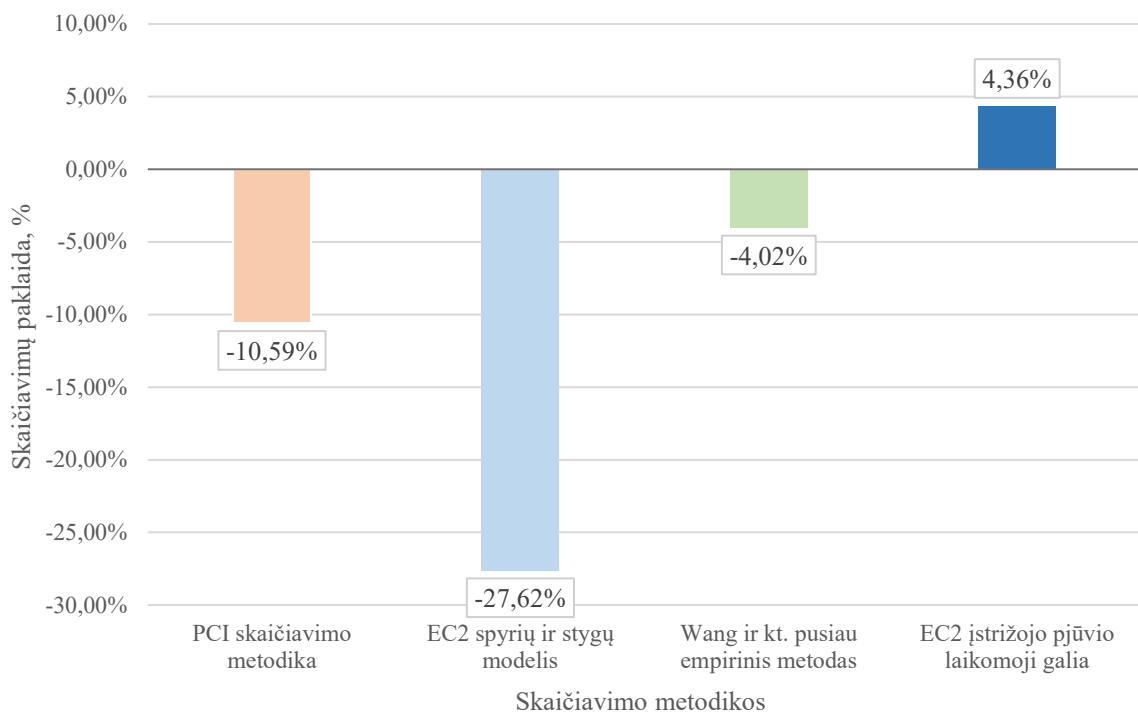


2.2 pav. Lu ir kt. bandinio atraminio mazgo schema (matmenys nurodyti *mm*)

Pagal skirtingus metodus apskaičiuota mazgo laikomoji galia pateikiama 2.3 paveiksle, o rezultatų reikšmių santykinis palyginimas su eksperimentine reikšme 2.4 paveiksle. Kaip matoma rezultatuose, konservatyviausias metodas yra EC2 spyrių ir stygų modelis. Apskaičiuota laikomoji galia gaunama 27,62 % mažesnė nei atlaikė bandinys eksperimento metu.



2.3 pav. Laikomosios galios skaičiavimo rezultatų palyginimas

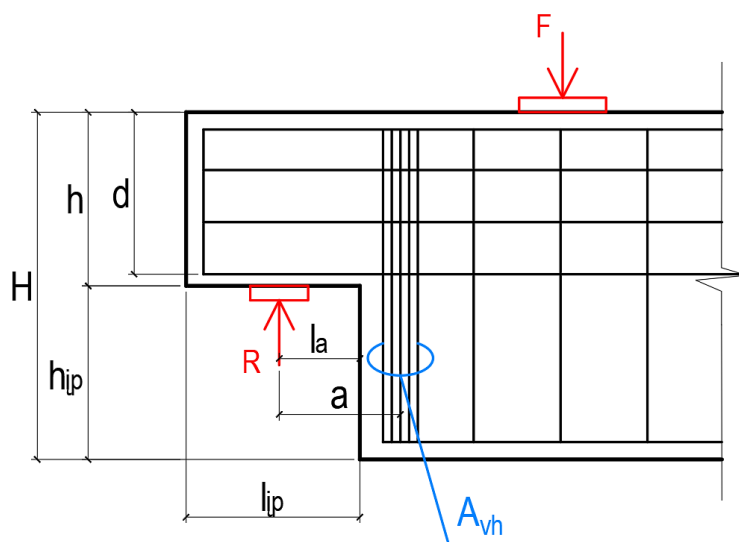


2.4 pav. Laikomosios galios skaičiavimo rezultatų paklaidos palyginimas

Skaiciuojant PCI metodu, laikomoji galia gaunama 10,59 % mažesnė nei eksperimento. Tiksliausia reikšmė apskaičiuojama Wango ir kt. pusiau empiriniu santvaros metodu (toliau – Wango metodas). Šiuo metodu skaičiuojant, laikomoji galia skiriasi nuo eksperimento 4,02 %. Skaiciuojant EC2 įstrižojo pjūvio laikomosios galios skaičiavimo metodu (toliau – EC2 metodas) laikomoji galia apskaičiuojama tiksliau nei PCI ir EC2 STM metodais, tačiau esminis skirtumas, kad, kitaip nei kiti metodai, EC2 metodas, laikomąją galią pervertina. Tai lemia faktas, kad PCI, EC2 STM ir Wango metodai yra rekomenduojami tokio mazgo skaičiavimui, o EC2 įstrižojo pjūvio laikomosios galios skaičiavimo metodas yra universalus. Vis dėlto, iškart teigti, kad vienas ar kitas metodas projektavimui yra tinkamiausias – negalima. Metodai skirtingai vertina įvairių kintamųjų įtaką. Skaiciuojant EC2 STM metodu bandinys suyrą dėl skersinės armatūros suirimo prie įpjovos krašto. Wango ir PCI metodais skaičiuojant suirimas įvyksta dėl sijos galo lenkimo. EC2 metodu skaičiuojant suirimas sutampa su eksperimento suirimo pobūdžiu – bandinys suyra nuo betono skersinio sugniuždymo įstrižajame pjūvyje.

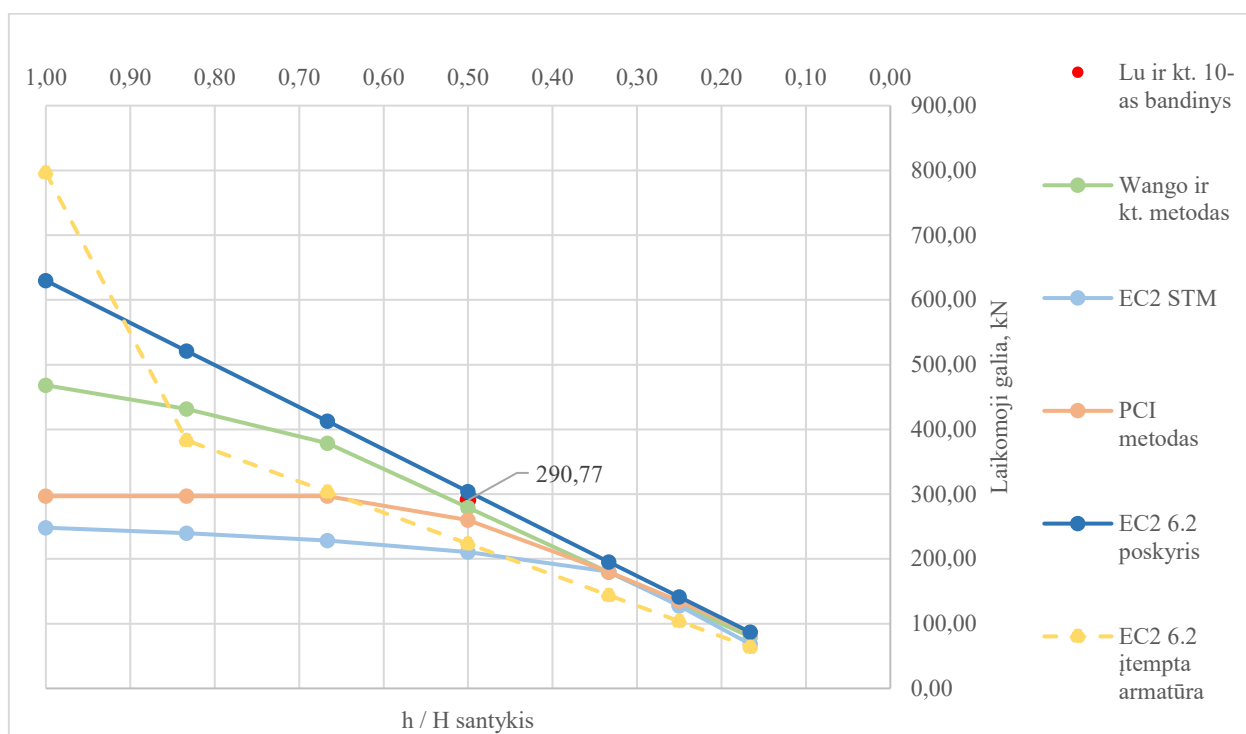
2.2. Analitinė parametrinė analizė

Atlikta sijos atraminio mazgo su įpjova parametrinė analizė. Skaičiavimai atlikti keturiais skaičiavimo metodais. Norint įvertinti armatūros įtempimo poveikį, EC2 įstrižojo pjūvio laikomosios galios skaičiavimuose priimama, kad įpjovos kraštą apspaudžia šeši 15,7 mm diametro lynai, įtempti iki 1000 MPa.



2.5 pav. Mazgo kintamųjų schema parametrinei analizei

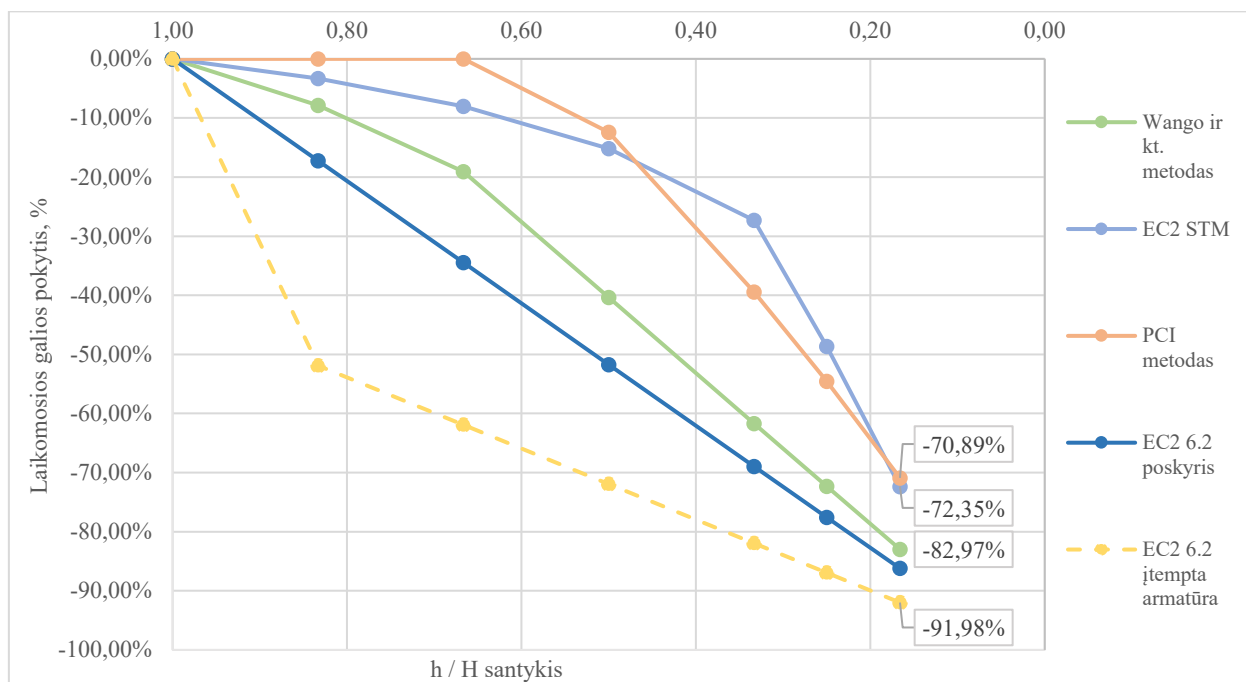
Pirmasis nagrinėjamas kintamasis buvo įpjovos aukštis h_{ip} , kuris buvo keičiamas iki kol įpjova panaikinama (rezultatus žr. 2.5 pav.). Nustatyta, kad h/H santykiui esant lygiam 0,33, trijų metodų – EC2 STM, PCI ir Wango – apskaičiuotos laikomosios galios reikšmės beveik identiškos. Esant bet kokiam įpjovos aukščiui EC2 STM metodu apskaičiuota laikomoji galia yra mažiausia iš pateiktų analitinių metodų. EC2 STM laikomoji galia kinta pagal dvi, beveik tiesiškas, priklausomybes. Nuo h/H santykio 1,0 iki 0,33 laikomoji galia kinta pagal vieną priklausomybę, ir nuo santykio 0,33 iki 0,17 toliau laikomoji galia mažėja labiau.



2.6 pav. Įpjovos aukščio įtaka laikomajai galiai

h/H santykiui esant intervale tarp 1,0 ir 0,67, skaičiuojant pagal PCI metodą įpjovos aukštis nedaro įtakos mazgo laikomajai galiai, tačiau, kai h/H reikšmė mažesnė nei 0,67, santykiui mažėjant, mažėja ir laikomoji galia. Wango metodo laikomosios galios rezultatų kreivė susideda iš dviejų tiesių. Pirmoji tiesė yra h/H santykio intervale tarp 1,0 ir 0,67 ir antroji yra tarp 0,67 ir 0,17. Matoma, kad pagal Wango metodo skaičiavimus mažėjant h/H santykiui mažėja ir laikomoji galia, tačiau mažėjimas antrojoje tiesėje žymesnis nei pirmojoje. EC2 įstrižojo pjūvio laikomosios galios skaičiavimų rezultatai pasiskirsto tiesiškai – h/H santykiui mažėjant, mažėja ir laikomoji galia. Visuose taškuose EC2 laikomoji galia yra didžiausia iš taikytų metodų.

2.6 pav. nagrinėjant armatūros įtempimo poveikį matoma, kad įtempimas nekeičia pagrindinio h/H poveikio mazgo elgsenai – santykiu mažėjant, laikomoji galia mažėja. Esminis skirtumas, kad h/H santykiui esant lygiam 1,0 (kai nėra įpjovos), įtempta armatūra įstrižąjį pjūvį apgniuždo, todėl laikomoji galia gaunama didesnė nei armatūros neįtempus. Kituose kreivės taškuose, kai įpjova yra, mazgo laikomosios galios reikšmė gaunama mažesnė, nei neįtemptiant armatūros. h/H santykiui esant apytiksliai intervale tarp 0,45 iki 0,17, laikomoji galia yra mažiausia iš visų taikytų metodų.

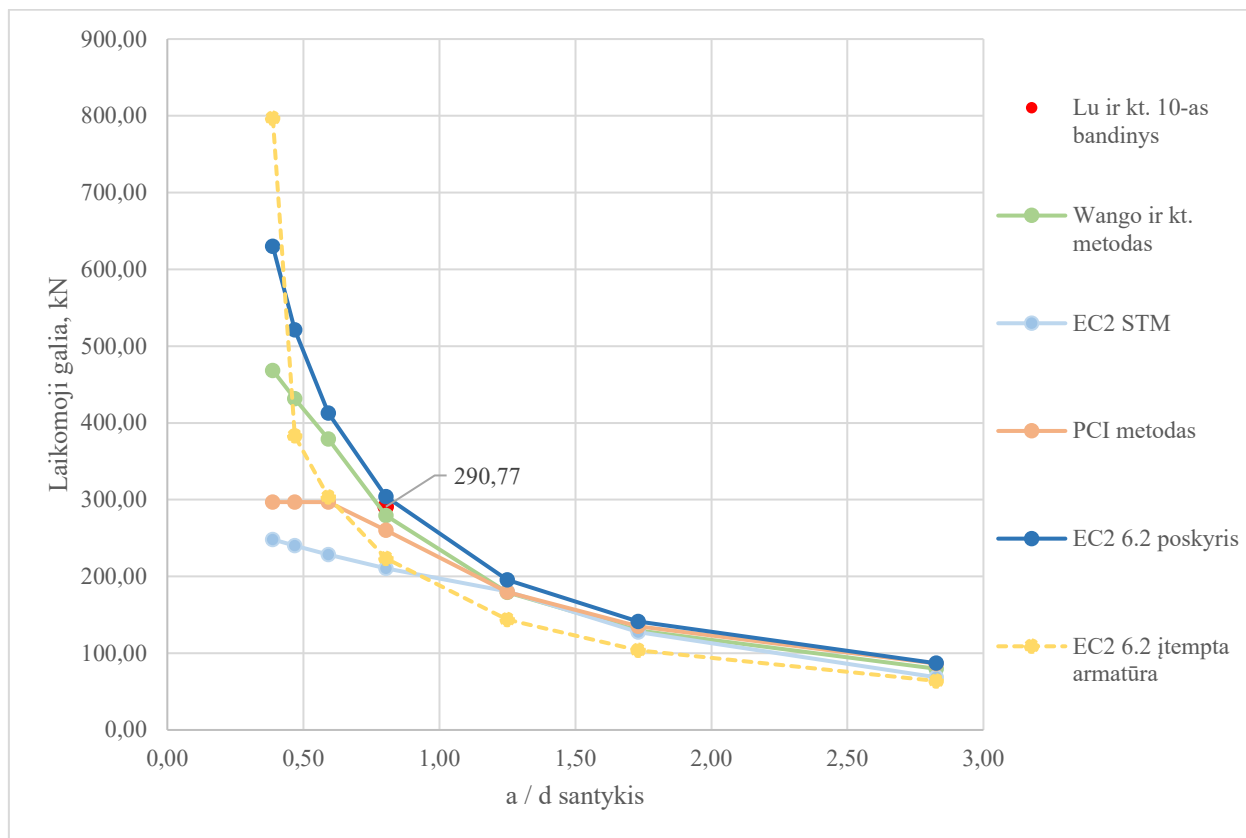


2.7 pav. Įpjovos aukščio įtaka laikomosios galios pokyčiui

2.7 pav. pavaizduota laikomosios galios pokyčio priklausomybė nuo h/H santykio. Iš jos galima pastebėti, kad, nors EC2 STM ir PCI apskaičiuotos laikomosios galios reikšmės skiriasi, tačiau šių metodų laikomosios galios pokyčio nuo h/H santykio kreivės panašios. Iš EC2 STM, PCI ir Wango metodų rezultatų matoma tendenciją – šiais metodais skaičiuojant, yra pasiekama h/H santykio reikšmė, po kurios laikomosios galios mažėjimas pasireškia labiau. Skaičiuojant

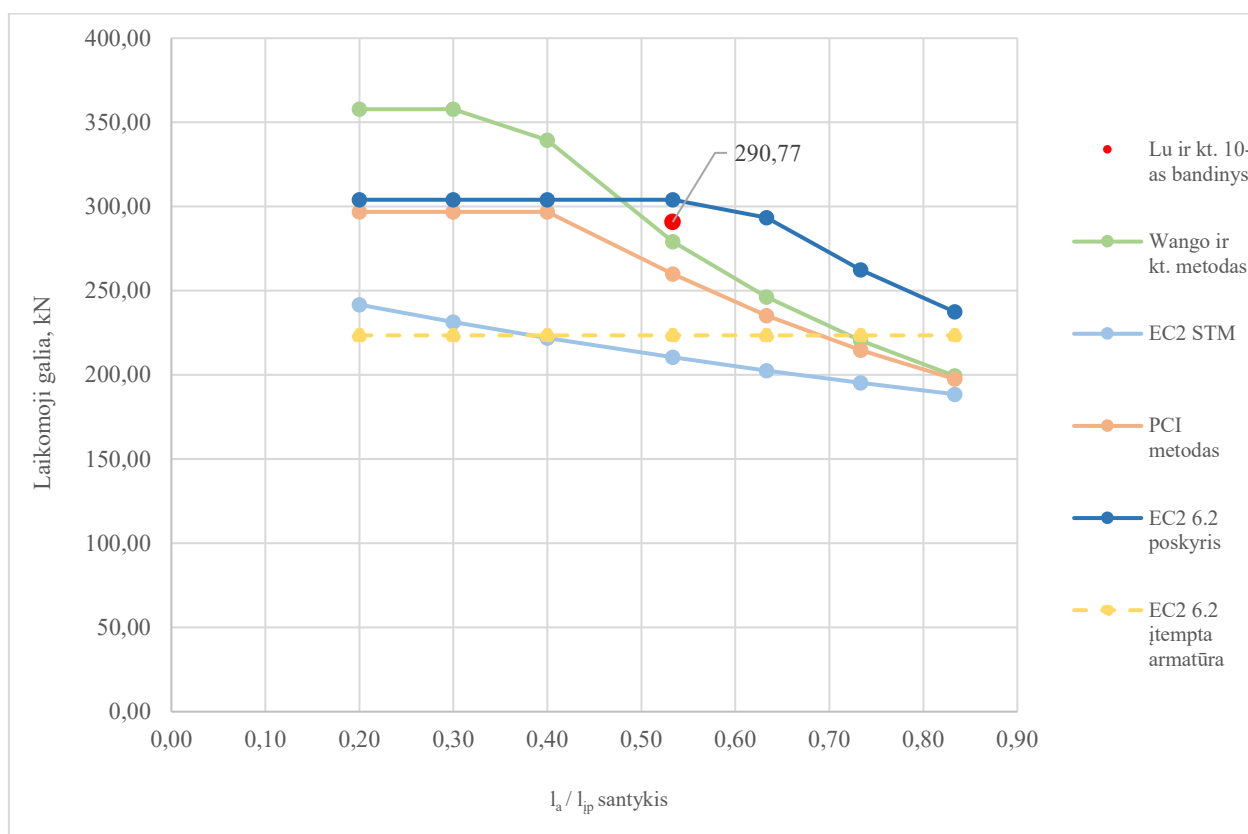
Wango metodu ši santykio reikšmė lygi 0,67, PCI metodo atveju lygi 0,50, o EC2 STM – lygi 0,33. Skaičiuojant EC2 metodu rezultatai įtempus armatūrą nėra identiški rezultatams be įtempimo. Įpjovai nesant įstrižojo pjūvio laikomoji galia nuo apspaudimo didėja, todėl yra matomas didesnis laikomosios galios sumažėjimas naudojant įtemptą armatūrą nei neįtemptą. Vadinas, armatūros įtempimas daro įtaką laikomosios galios pokyčio priklausomybei nuo h/H santykio (žr. 2.7 pav.).

Įpjovos aukščio pokyčio įtaką galima sulyginti su a/d santykio įtaka laikomajai galiai. 2.8 paveiksle vaizduojami įpjovos aukščio keitimo skaičiavimų rezultatai per laikomosios galios priklausomybę nuo a/d santykio. Kaip ir 1.2.3 poskyryje aprašyta, tyrimuose fiksuojamas nuoseklus a/d santykio poveikis mazgo su įpjova elgsenai. Kai santykis mažėja, laikomoji galia didėja, o kai santykis didėja – galia mažėja. Tokią tendenciją matoma visų skaičiavimo metodų rezultatuose (žr. 2.8 pav.). a/d santykiui pasiekus 1,25 reikšmę ir daugiau, skirtumai tarp metodų rezultatų ženkliai sumažėja, o šiam santykiui esant mažesniui nei 1,25, matomas didėjantis skirtumas tarp metodų rezultatų. Analizuojant įtemptos armatūros poveikį mazgo laikomajai galiai, matoma, kad elgsena nesikeičia nuo armatūros įtempimo. a/d pokyčiui galioja ta pati tendencija, kaip ir neįtempus armatūros. Svarbu pabrėžti, kad skaičiavimuose su įtempta armatūra, viršijus apytiksliai 0,9 a/d santykio reikšmę, apskaičiuota laikomoji galia yra mažiausia iš visų metodų.



2.8 pav. a/d santykio įtaka laikomajai galiai

Pagal suirimo pobūdį, a/d santykiui mažėjant irimas dažniausiai vyksta dėl šlyties, o šiam santykiui didėjant – dėl lenkimo momento poveikio. Tokią elgseną galima pastebėti Wango ir PCI metodų skaičiavimuose. Pirmuose 3 taškuose (nuo 0,39 iki 0,59 a/d), atraminio mazgo laikomąją galią apriboja šlyties jėgas atlaikanti skersinė armatūra ir įstrižai gniuždomas betonas, o kai a/d santykis didesnis nei 0,8 – lenkimo momentą atlaikanti sijos galo išilginė armatūra. Pagal skaičiavimo rezultatų kreives (2.8 pav.), galima teigti, kad kuo a/d santykis mažesnis, tuo saugiau yra projektuoti taikant EC2 STM metodą, o kuo santykis didesnis, tuo visų metodų skaičiavimo rezultatai panašesni.



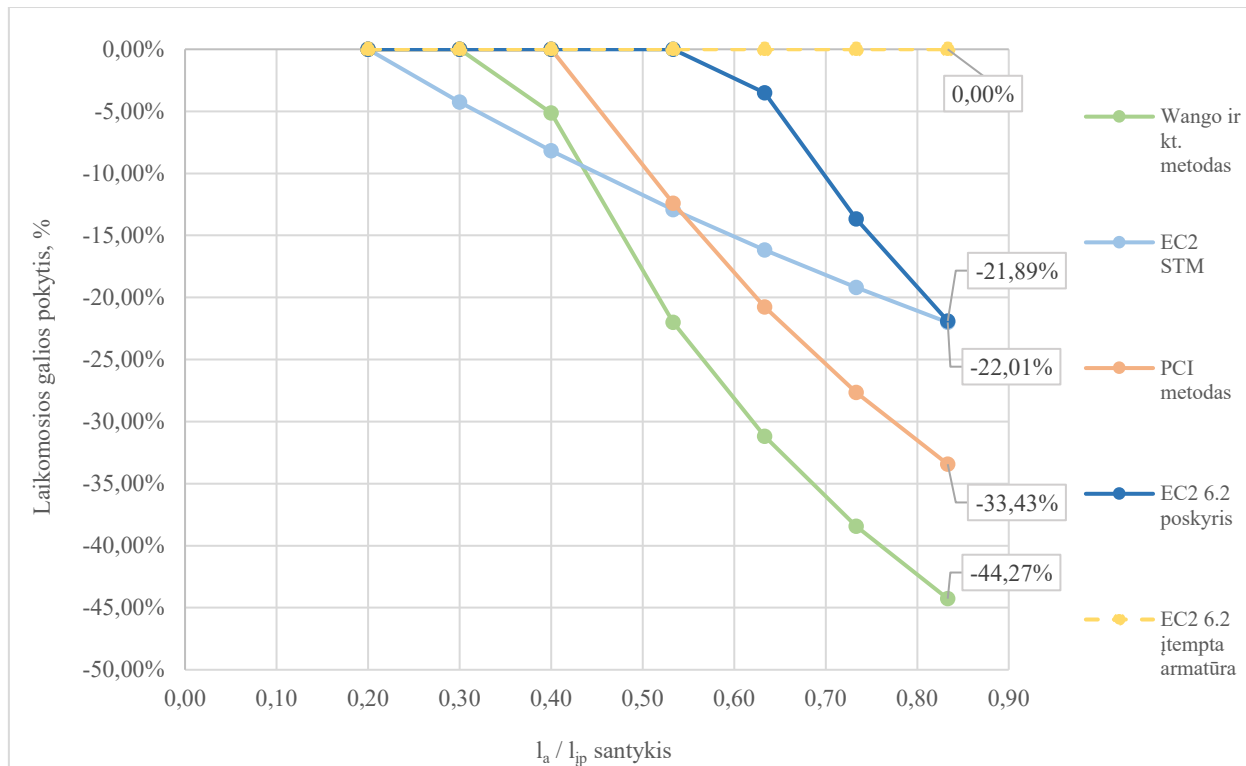
2.9 pav. l_a/l_{ip} santykio įtaka laikomajai galiai

Kitas nagrinėtas parametras – apkrovos pridėties vietos įtaka laikomajai galiai. Gauti rezultatai pavaizduoti 2.9 ir 2.10 paveiksluose. Šis parametras išreiškiamas per l_a/l_{ip} santykį (žr. 2.5 pav.), kuris kito nuo 0,20 iki 0,83. Tai ribinės galimos reikšmės, kadangi atraminei plokštei paliekama mažiausiai po 60 mm į kiekvieną pusę nuo atramos vidurio. l_a – atstumas nuo įpjovos krašto iki atraminės plokštelės centro, l_{ip} – įpjovos ilgis. Bendra matoma tendencija – santykiui didėjant, t.y. atramai tostant nuo įpjovos krašto, laikomoji galia mažėja, tačiau šis mažėjimas per metodus skiriasi. Kaip ir ankstesniuose skaičiavimuose, EC2 STM metodas išlieka konservatyviausias. Jo rezultatuose matoma aiški tiesinė priklausomybė per visą santykio diapazoną. PCI metodo rezultatus galima padalinti į dvi tiesines priklausomybes. Pirmoji, kai

laikomoji galia nekinta l_a/l_{ip} santykiui esant intervale tarp 0,20 ir 0,40, o antroji, kai ji tiesiškai mažėja nuo 0,40 iki 0,90 l_a/l_{ip} . Keičiant atramos pridėties vietą, kitaip nei ankstesniuose skaičiavimuose, EC2 skaičiavimų rezultatai nėra didžiausi visais skaičiuojamaisiais etapais. Kai l_a/l_{ip} santykis yra tarp 0,2 ir apytiksliai 0,48, tai Wango metodo laikomosios galios reikšmės gaunamos iki 17,4 % didesnės, tačiau, kai l_a/l_{ip} santykis didesnis nei 0,48, EC2 metodu apskaičiuota laikomoji galia yra mažiausiai konservatyvi.

Šias laikomosios galios mažėjimo tendencijas, dėl l_a/l_{ip} santykio didėjimo, galima prilyginti anksčiau aprašytam a/d santykio pokyčiui. Kai l_a/l_{ip} reikšmė didėja, tada ir a/d santykis didėja, o to pasekoje, kaip įprasta tokio mazgo elgsenai, laikomoji galia mažėja. Viena tendencija atsikartoja tik dalinai. Kaip anksčiau aprašyta, kuo a/d santykis didesnis, tuo visų metodų skaičiavimų rezultatai panašesni, o santykiui mažėjant – priešingai. Šiuo atveju, didėjant a/d santykiui EC2 metodo rezultatai nesupanašėjo su kitų metodų rezultatais.

EC2 įtemptos armatūros poveikis atspindi kitokią įtaką laikomajai galiai, nei įpjovos aukščio pokytis. l_a/l_{ip} santykiui kintant, laikomoji galia neatkartoja identiškos priklausomybės EC2 neįtemptos armatūros rezultatams. Šiuo atveju, pagal EC2, atramos pridėties vieta nedaro įtakos numatomo suirimo pobūdžio laikomajai galiai.

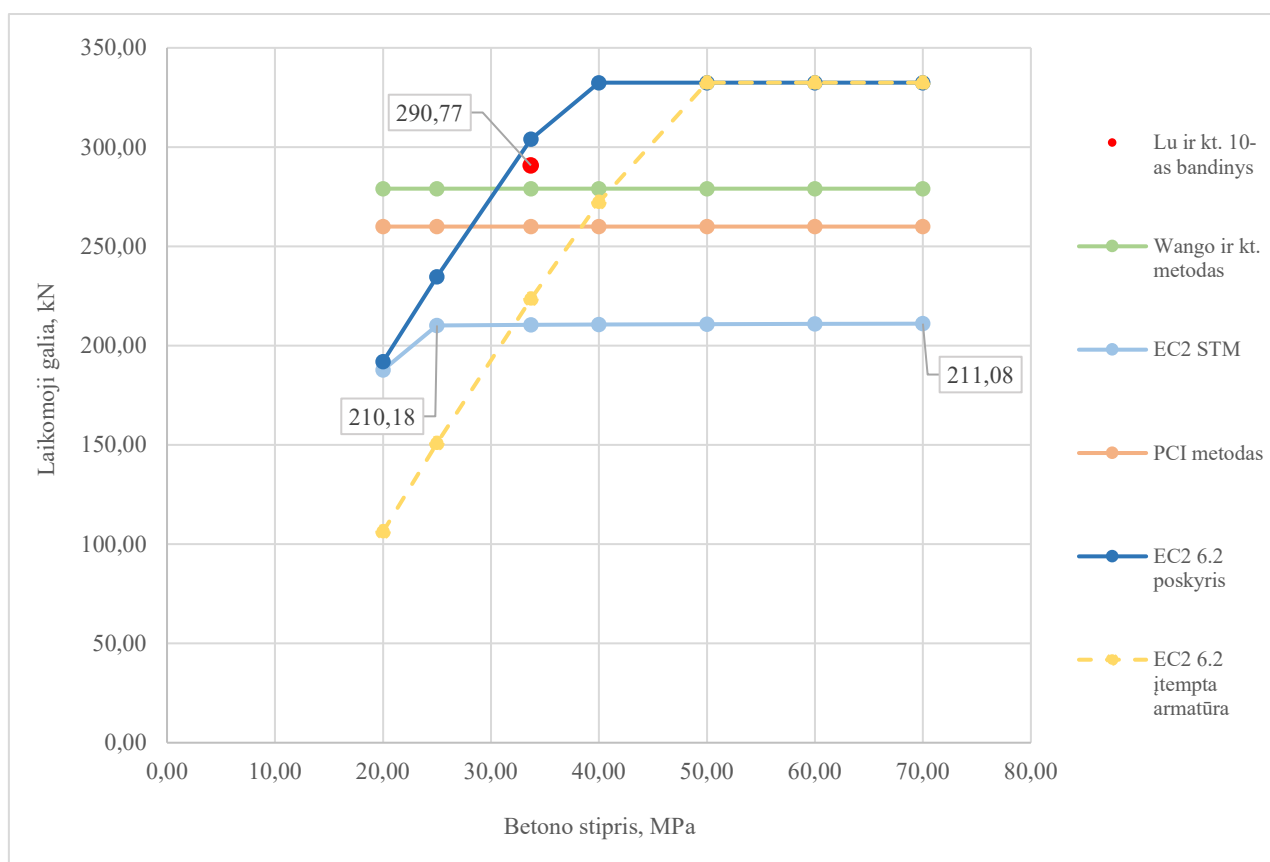


2.10 pav. l_a/l_{ip} santykio įtaka laikomosios galios pokyčiui

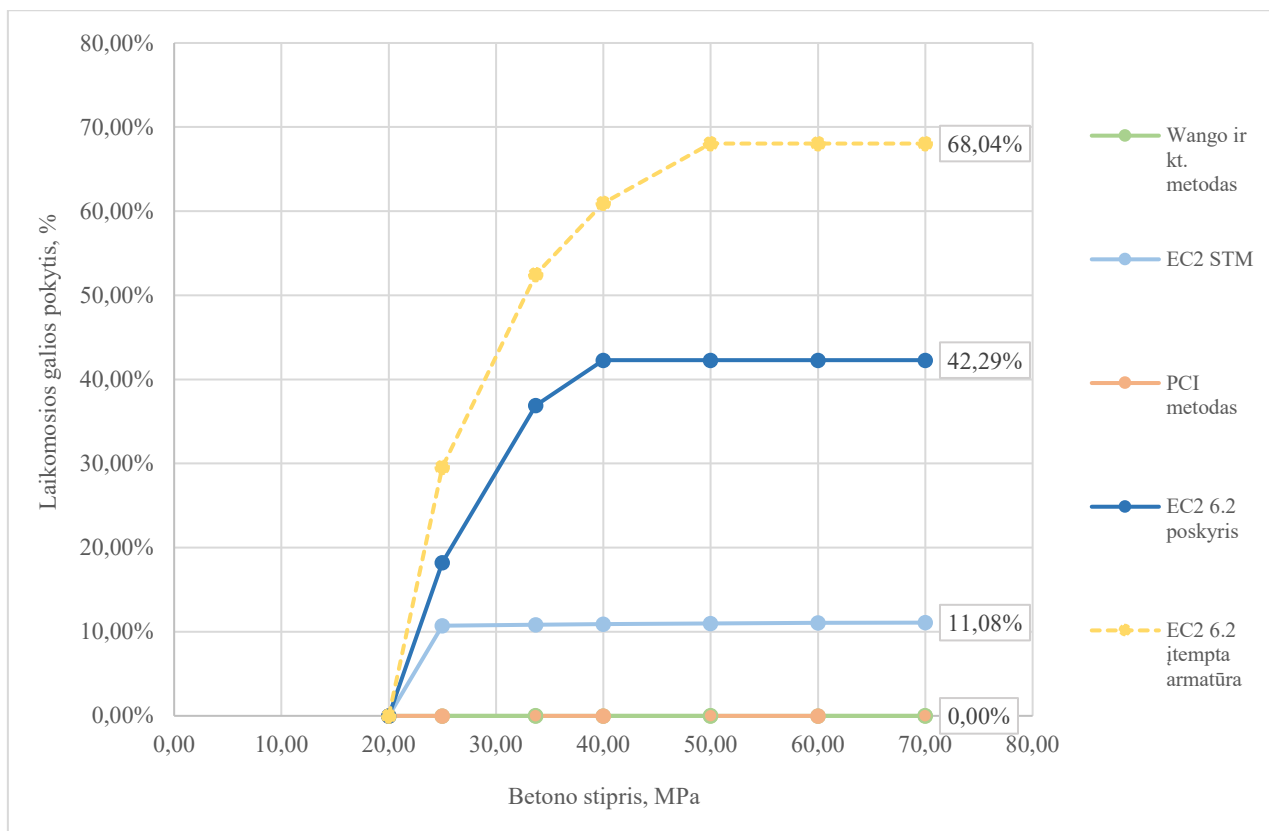
Nagrinėjant 2.10 paveikslą, galime pamatyti, kad pagal skaičiavimo metodus, laikomoji galia, nuo atramos pridėties vietos, gali skirtis iki 44,27 % (Wango metodo atveju). PCI metodas

laikomosios galios pamažėjimą įvertina šiek tiek konservatyviau – 33,43 %, o abu EC2 metodai labai panašiai – apie 22 %. Įtemptos armatūros atveju laikomoji galia nagrinėjamame diapazone nemažėja. Apibendrinant rezultatus, atramos pridėties vieta įpjovoje neįtempus armatūros daro didelę įtaką laikomajai galiai, tačiau įtakos nedaro, kai armatūra yra įtempta.

Ketvirtasis nagrinėtas parametras – betono stipris. Jis buvo keičiamas nuo 20 MPa iki 70 MPa. Rezultatai pavaizduoti 2.11 ir 2.12 paveiksluose. Nustatyta, kad didžioji dalis skaičiavimo metodų, betono suirimo nevertina kaip suirimo pobūdžio, kurio laikomoji galia yra mažiausia. Tik prie minimalaus betono stiprio EC2 STM metodas rodo laikomosios galios padidėjimą viename žingsnyje betono stiprio padidinimo, nuo 20 MPa iki 25 MPa, o toliau – laikomoji galia didėja labai nežymiai, kadangi ją apriboja skersinės armatūros atlaikomoji galia, o betono stiprio padidinimas skaičiavimuose pakeičia tik gniuždomosios zonos aukštį. PCI ir Wango metodų skaičiavimais atraminis mazgas suyra dėl sijos galo lenkimo, todėl pagal šių metodų skaičiavimus betono stipris poveikio laikomajai galiai neturi. Kiek kitokia situacija matoma nagrinėjant EC2 metodo rezultatus. Nuo 20 iki 40 MPa, pagal šį metodą, laikomąją galią apriboja gniuždomasis spyris, o įtemptos armatūros atveju nuo 20 iki 50 MPa. Toliau laikomosios galios reikšmės identiškos.



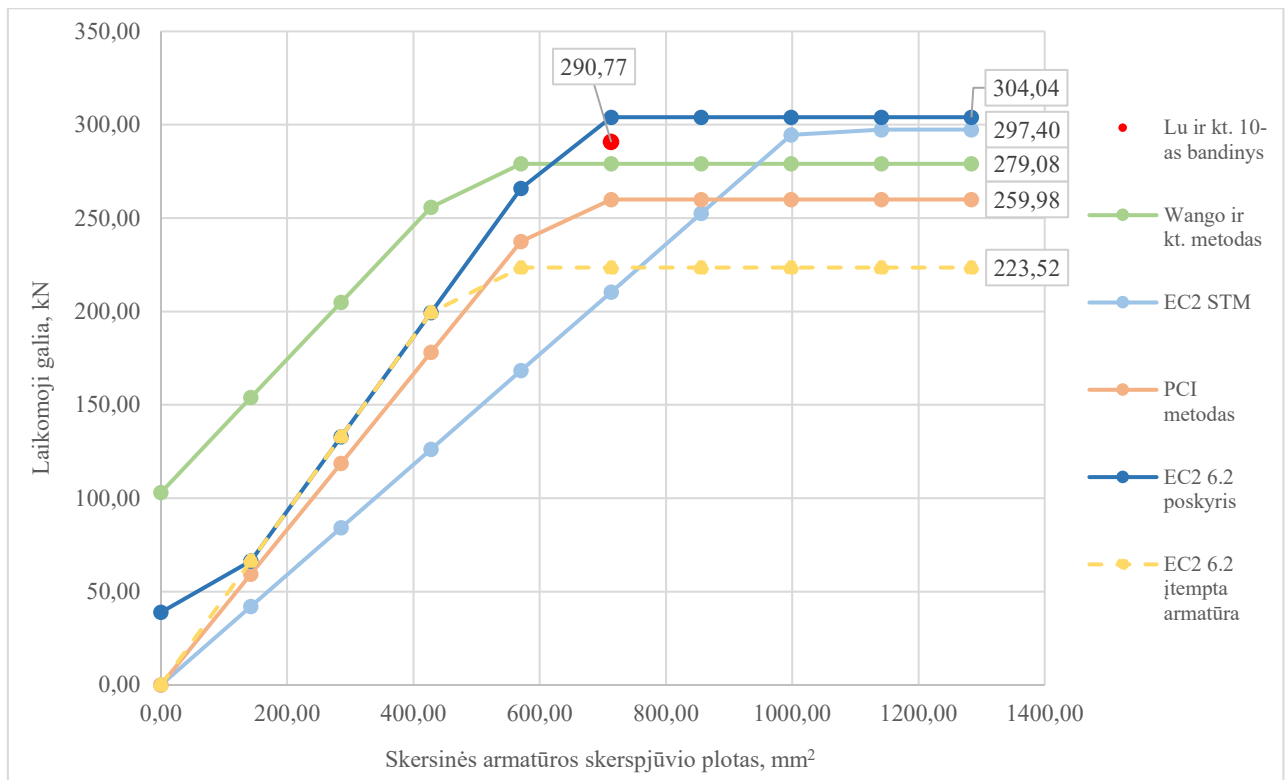
2.11 pav. Betono stiprio įtaka laikomajai galiai



2.12 pav. Betono stiprio įtaka laikomosios galios pokyčiui

Tiriant įtemptosios armatūros poveikį atraminiam mazgui nustatyta, kad naudojant įtemptą armatūrą, betono stiprio įtaka laikomajai galiai ženkliai padidėja (žr. 2.12 pav.). Įtemptos armatūros atveju betono stiprį padidinus nuo 20 MPa iki 70 MPa, tai laikomoji galia padidinama 68,04 %, o neįtemptos armatūros atveju laikomoji galia padidėja mažiau – 42,29 %. EC2 STM betono stiprio vertinimas atitinka Shakiro pastebėjimus skaičiavimo metodų apžvalgoje, kad STM metodu apskaičiuota laikomoji galia dažniausiai yra apribojama stygų, o ne spyrių atlaikomosios galios (Shakir, 2018). Taigi, PCI, EC2 STM ir Wango skaičiavimo metodai armatūros suirimą dažniausiai vertina kaip mažiausios laikomosios galios irties pobūdį, o EC2 metodu skaičiuojant betono stipris daro didelį įtaką mazgo laikomajai galiai.

Penktasis nagrinėtas parametras buvo skersinės armatūros kiekio A_{vh} (žr. 2.5 pav.), prie įpjovos krašto, įtaka laikomajai galiai. Šis parametras buvo keičiamas priimant, kad 100 % armatūros atitinka pradinį bandinio armavimo kiekį $713,3 \text{ mm}^2$. Laikomoji galia buvo skaičiuojama koreguojant šį kiekį nuo 0 % iki 180 %, žingsniais po 20 %. Rezultatai pateikiami 2.13 ir 2.14 paveiksluose.

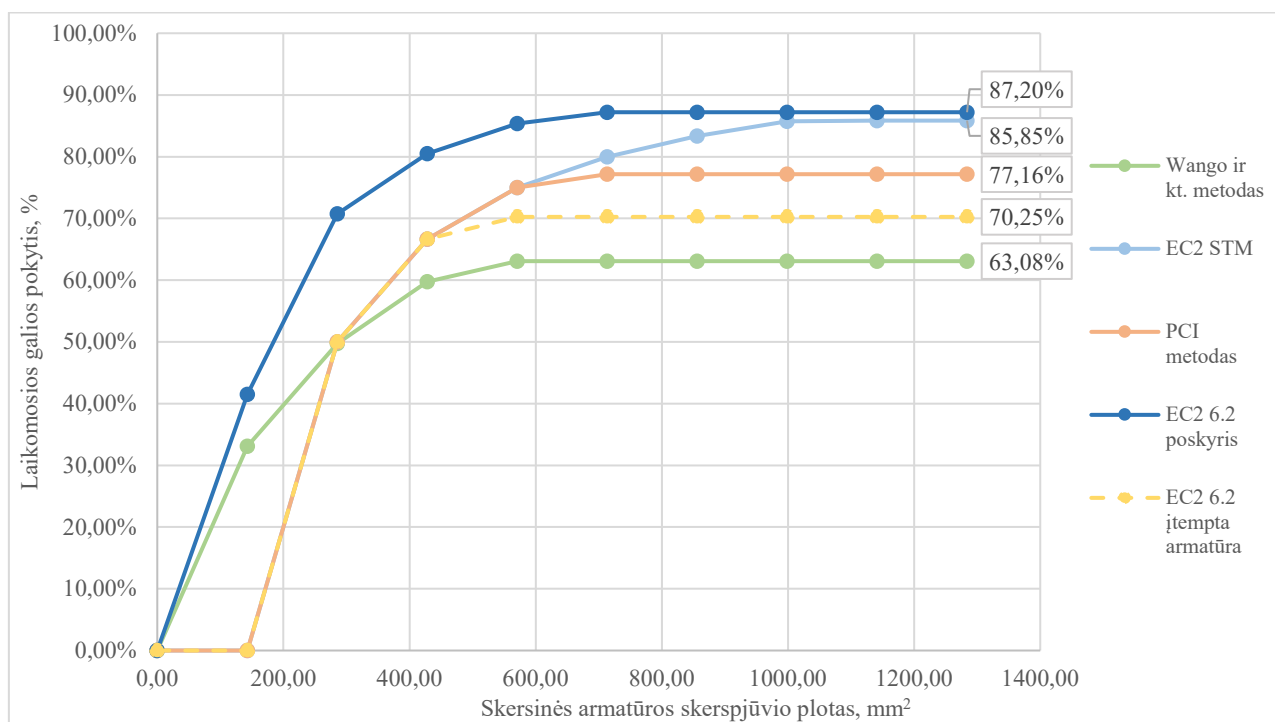


2.13 pav. A_{vh} armatūros kiekio įtaka laikomajai galiai

Analizuojant rezultatus, pirmiausia galima pastebėti, kad visais metodais skaičiuojant, prie atitinkamo armatūros kiekio pasiekama maksimali galios padidėjimo reikšmė (žr. 2.13 pav.). Vėliausiai maksimali laikomoji galia pasiekama skaičiuojant EC2 STM metodu, nes esant 160 % armatūros kiekio suirimo pobūdis pasikeičia į betono sugniuždymą. Reikia pabrėžti, kad EC2 STM metodu laikomoji galia neskaičiuota esant nulinei skersinei armatūrai, kadangi, pašalinus skersinę armatūrą, reikia pašalinti ir BC stygą (žr. 1.45 – 1.47 pav.), vadinasi, pasikeistų STM modelis.

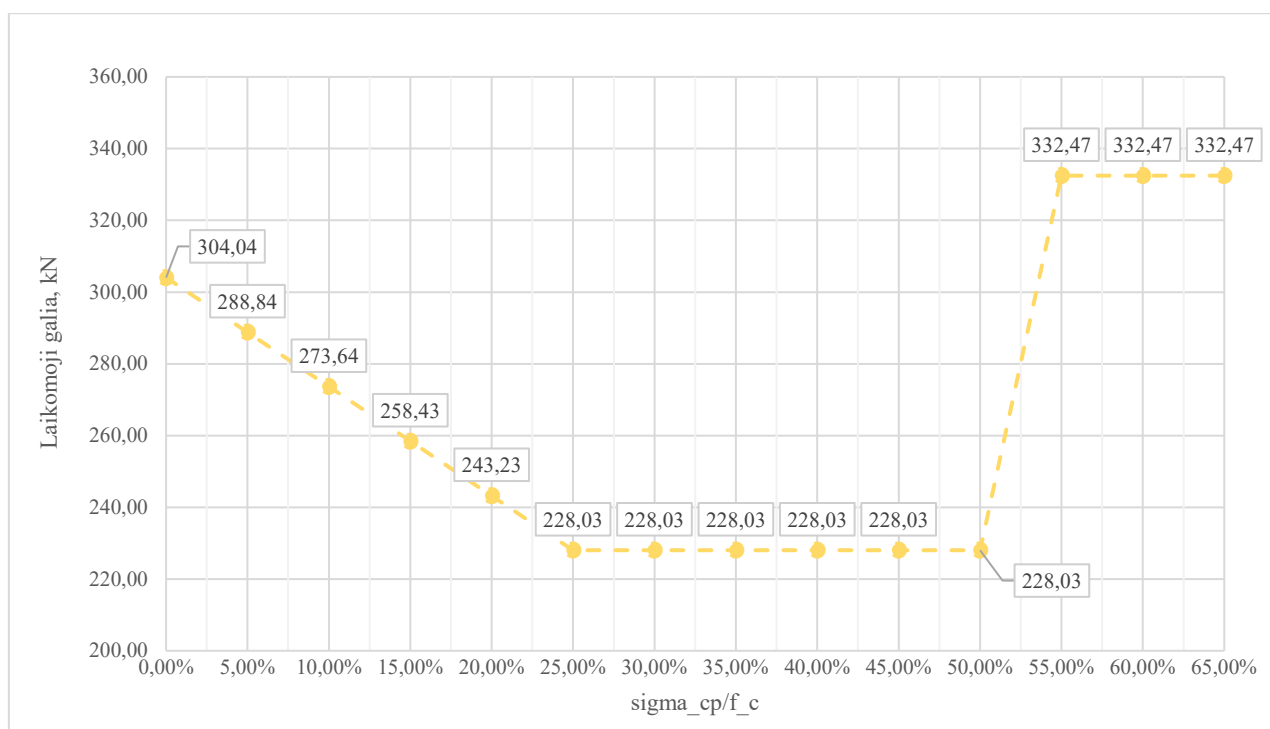
Nagrinėjant armatūros įtempimo poveikį, matoma, kad skaičiavimai atspindi tokią elgseną – laikomosios galios didėjimas sutampa su neįtemptos armatūros elementu, tačiau dėl armatūros įtempimo, maksimali galia yra mažesnė, nes suirimas įvyksta dėl sumažinto betono spyrio galios įstrižajame pjūvyje. Dar vienas svarbus aspektas yra tai, kad elemente be skersinės armatūros sukėlus tokio dydžio tempiamuosius įtempius (skaityti poskyrio pradžią) laikomoji galia yra neigiama. Vadinasi, elementas suyra nuo tempimo įstrižajame pjūvyje, todėl priimama, kad pradinė galia nulinė.

Lyginant metodų konservatyvumą matoma, kad EC2 STM metodo apskaičiuota laikomoji galia pirmą kartą nėra mažiausia visuose taškuose (nevertinant EC2 rezultatų su įtempta armatūra). Esant 140 % skersinės armatūros, laikomoji galia gaunama didesnė už PCI per 13,33 %, už Wango – 5,57 %, tačiau išlieka mažesnė nei EC2 metodo per 3,18 %. Pastebima, kad esant mažesniai armavimui, iki apytiksliai 90%, EC2 metodu apskaičiuota laikomoji galia yra mažesnė nei Wango metodu.



2.14 pav. A_{vh} armatūros kiekio įtaka laikomosios galios pokyčiui

2.14 pav. matoma, kad keičiant skersinės armatūros kiekį neįtemptos armatūros atveju EC2 metodu apskaičiuota laikomoji galia gali skirtis iki 87,20 %, o įtemptos armatūros atveju skiriasi mažiau – iki 70,25 %. EC2 STM atveju iki 85,85 %, PCI metodo atveju – 77,16 %, o Wango metodo – iki 63,08 %.



2.15 pav. Armatūros įtempimo intensyvumo įtaka laikomajai galiai

Paskutinis nagrinėtas parametras buvo iš anksto įtemptos armatūros įtempimo intensyvumo įtaka laikomajai galiai. Skaičiavimai atlikti taikant tik EC2 metodą, kadangi kiti aprašyti metodai įtempimo nevertina. Rezultatai pateikiami 2.15 ir 2.16 paveiksluose. Armatūros įtempimo intensyvumas išreiškiamas σ_{cp}/f_c santykiu. σ_{cp} – apspaudimo jėgos sukelti vidutiniai įtempiai per visą skerspjūvį, f_c – betono gniuždomasis stipris.

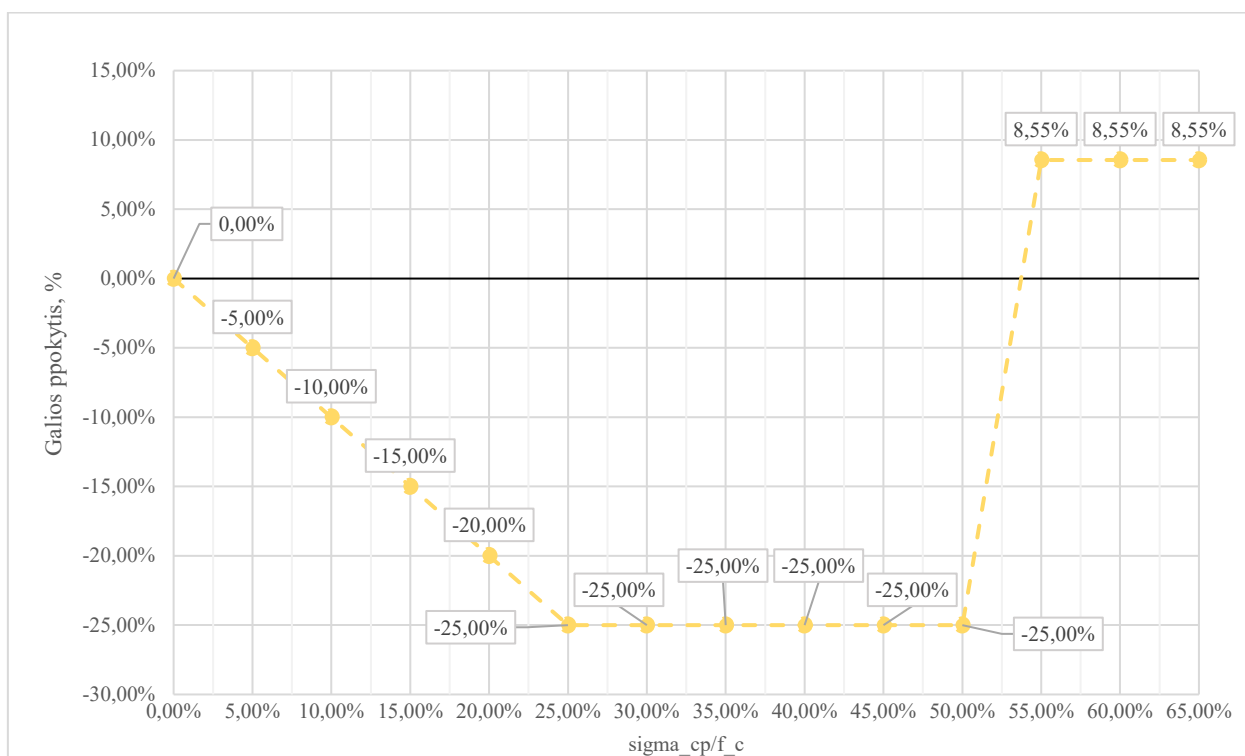
Iš rezultatų matomas neįprastas galios kitimas. Žiūrint į 1.3.4 poskyrį, matoma, kad EC2 armatūros įtempimo įtaką vertina 3 skirtingais intensyvumo intervalais:

$$\alpha_{cw} = \left(1 + \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}}\right), \text{ kai } 0 < \sigma_{cp} \leq 0,25f_{cd},$$

$$\alpha_{cw} = 1,25, \text{ kai } 0,25f_{cd} < \sigma_{cp} \leq 0,5f_{cd},$$

$$\alpha_{cw} = 2,5 \left(1 - \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}}\right), \text{ kai } 0,5f_{cd} < \sigma_{cp} < 1,0f_{cd},$$

čia: σ_{cp} – per visa skerspjūvį suvidurkinti įtempiai nuo ašinės jėgos. Jie yra teigiami, kai skerspjūvis gniuždomas, neigiami – kai tempiamas.



2.16 pav. Armatūros įtempimo intensyvumo įtaka laikomosios galios pokyčiui

Tai lemia, kad laikomoji galia kinta pagal tris tiesines priklausomybes. Pirmoji dalis – tai tiesioginė laikomosios galios mažėjimo priklausomybė nuo σ_{cp}/f_c santykio, kol apspaudimo jėgos sukelti įtempiai pasiekia $0,25f_c$ reikšmę. Antrojoje dalyje laikomoji galia nekinta, kai apspaudimas yra intervale tarp $0,25f_c$ ir $0,5f_c$. Sudėtingesnė situacija yra su trečiąja dalimi. Pagal

EC2 pateikiamą išraišką, kai įtempiai yra didesni nei $0,5f_c$, tada ženklas formulėje pasikeičia. Šioje situacijoje tai lemia, kad laikomoji galia staiga padidėja ir pasikeičia irtis iš betono spyrio suirimo į skersinės armatūros suirimą.

Skyriaus išvados:

1. Metodai, skirti skaičiuoti sijų atraminius mazgus su įpjovomis, daugelyje skirtingų mazgo konfigūracijų yra konservatyvesni nei EC2 įstrižoji pjūvio laikomosios galios skaičiavimo metodas. Konservatyviausias metodas yra EC2 STM, o tiksliausias metodas yra Wango.
2. Didžiausią įtaką mazgo su įpjova laikomajai galiai daro skersinės armatūros kiekis ir įpjovos aukštis, o mažiausią – betono stipris.
3. Taikant EC2 metodą, įvertintas įtemptos armatūros poveikis yra reikšmingas mazgo laikomajai galiai, kadangi, nagrinėjant kiekvieną parametą, pasikartoja ruožai, kuriuose apskaičiuota laikomoji galia yra ženkliai mažesnei nei konservatyviausiu EC2 STM metodu. Jeigu reali mazgo elgsena atitinka skaičiavimus, suprojektavus mazgą nevertinant armatūros įtempimo poveikio, yra didelis suirimo pavojus.
4. Elementuose su įtempta armatūra, betono stipris daro didesnę įtaką mazgo laikomajai galiai, negu neįtemptos armatūros elementuose.
5. Armatūros įtempimas pagal EC2 metodo skaičiavimus gali pakeisti mazgo suirimo pobūdį iš skersinės armatūros suirimo į betono suirimą įstrižajame pjūvyje. Suirimo pobūdžiui pasikeitus, kai naudojama įtempta armatūra, apkrovos pridėties vieta nedaro įtakos mazgo laikomajai galiai.
6. Elementuose be skersinės armatūros mazgas su įpjova gali suirti dėl įpjovos krašto apspaudimo nuo įtemptos armatūros.
7. Sijų atraminiuose mazguose su įpjovomis naudojant iš anksto įtemptą armatūrą mazgo laikomoji galia gali sumažėti iki 25 % priklausomai nuo įtempimo intensyvumo.
8. EC2 6.2 poskyrio rekomendacijomis apskaičiuojama įtemptos armatūros įtaką laikomajai galiai, kai σ_{cp} kinta nuo $0,5f_c$ iki $1,0f_c$, vaizduoja galimai nerealistišką poveikį.
9. Norint patikrinti skaičiavimų tikslumą, reikia atlikti skaitinę analizę.

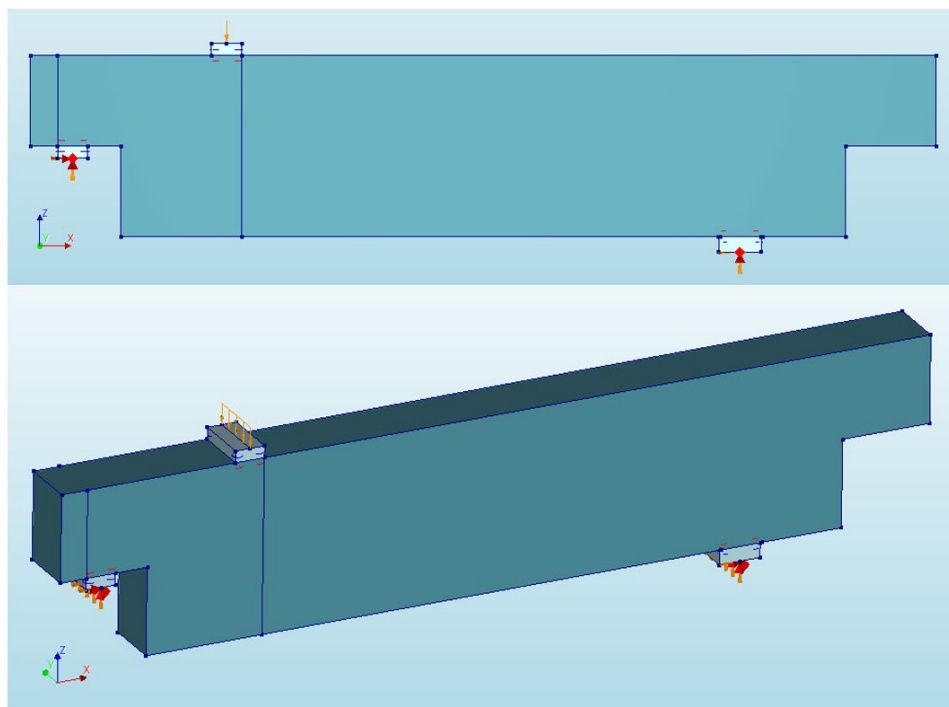
3. SKAITMENINĖ GELŽBETONINIŲ SIJŲ SU ĮPJOVA ANALIZĖ

Šiame skyriuje atliekama skaitinė surenkamos gelžbetoninės sijos su įpjova atraminiame mazge analizė. Aprašomas modelio sudarymas, medžiagų charakteristikos, analizės atlikimas. Atliekamas modelio patikrinimas palyginant su eksperimento rezultatais. Atliekama parametrinė analizė ir lyginama su analitiniais rezultatais. Nustatomas iš anksto įtemptos armatūros poveikis laikomajai galiai ir nustatoma įtemptos armatūros išdėstymo įtaka.

3.1. Skaitmeninis sijos modeliavimas

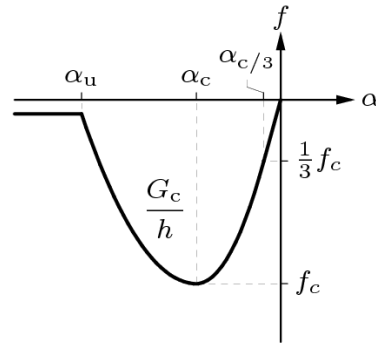
Skaitmeninis sijos modelis buvo sudarytas DIANA FEA baigtinių elementų analizės programa. Modeliuotas analitinės analizės metu aprašytas ir skaičiuotas Lu ir kt. eksperimento 10-as bandinys (Lu et al., 2003) (žr. 2.1 poskyrį).

Sija modeliuojama kaip tūrinis elementas (žr. 3.1 pav.). Modelis atraminėse zonose remiamas per 100 mm ilgio, 200 mm pločio ir 40 mm aukščio plokšteles. Tokių matmenų plokštelės naudojamos ir apkrovų pridėjimo vietoje. Kairiosios atramos poslinkiai suvaržomi visomis kryptimis ir suvaržomas pasisukimas apie z ir x ašis. Dešinioji atrama įveda identiška kairiajai, bet padaroma paslanki x ašies kryptimi.

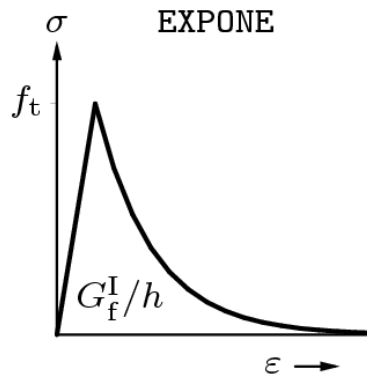


3.1 pav. Sijos modelis

Sijos betonas aprašomas kaip tampriai plastinė medžiaga. Parenkamas *Total strain based crack model*. Betono gniuždomoji kreivė parenkama *Parabolic* (žr. 3.2 pav.), o tempiamoji – *Exponential* (žr. 3.3 pav.).



3.2 pav. Betono gniuždomoji kreivė *Parabolic* (DIANA FEA BV, 2015)



3.3 pav. Betono tempiamoji kreivė *Exponential* (DIANA FEA BV, 2015)

Nurodytam betono modeliui reikėjo betono charakteristikų, kurios nebuvo pateikiamos Lu ir kt. tyrimo aprašyme. Toliau pateikiamos formulės, panaudotos apskaičiuoti trūkstamus parametrus.

Gniuždomoji betono suirimo energija (Valivonis et al., 2014):

$$G_{fc} = 15 + 0,43 \cdot f_c - 0,0036 \cdot f_c^2,$$

čia: f_c – vidutinis gniuždomasis cilindrinis betono stipris.

Tempiamoji betono suirimo energija (Valivonis et al., 2014):

$$G_F = 0,03 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{0,7},$$

čia: f_{cm} – vidutinis gniuždomasis betono stipris pagal LST EN 1992-1-1 3.1 lentelę.

Tempiamasis stipris skaičiuotas pagal LST EN 1992-1-1 3.1 lentelės pateikiamas formules:

$$f_{ctm} = 0,3 \cdot f_{ck}^{\frac{2}{3}}, \text{ kai } f_{ck} \leq C50/60,$$

$$f_{ctm} = 2,12 \cdot \ln \left[1 + \left(\frac{f_{cm}}{10} \right) \right], \text{ kai } f_{ck} > C50/60,$$

čia: f_{ck} – charakteristinis gniuždomasis stipris, f_{cm} – vidutinis gniuždomasis betono stipris.

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \text{ MPa},$$

$$f_{ck} = f_{cm} - 8 \text{ MPa}.$$

Betono tamprumo modulis apskaičiuojamas pagal tokią formulę (LST EN 1992-1-1 3.1 lentelė):

$$E_{cm} = 22 \cdot \left[\frac{f_{cm}}{10} \right]^{0,3}.$$

Galutinės betono savybės pateikiamos 3.1 lentelėje.

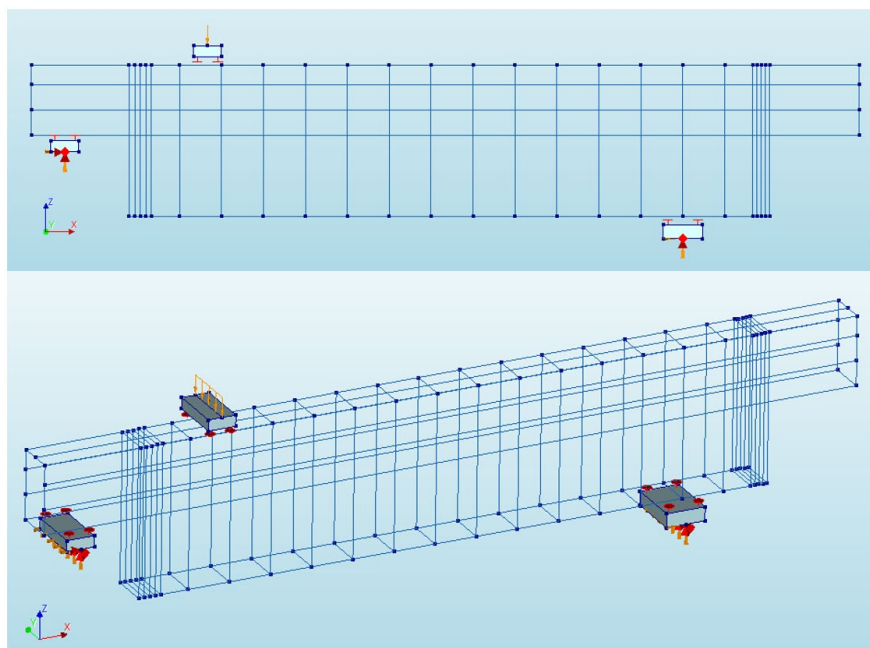
3.1 lentelė. Betono modelis ir savybės

Betono modelis	Tiesinės betono savybės		
Pleišėjimo modelis pagrįstas visa deformacija	Tamprumo modulis, GPa	Puasono koeficientas	Betono tankis, kg/m^3
Besisukanti plyšių kryptis	31,675	0,2	2400
Betono tempiamosios savybės ir elgsena			
Tempimo kreivė	Tempiamasis stipris, MPa	Suirimo energija, N/mm	Puasono koeficiento mažinimo modelis
Eksponentinė	2,613	0,07	Pagrįstas žala
Betono gniuždomosios savybės ir elgsena			
Gniuždymo kreivė	Gniuždomasis stipris, MPa	Suirimo energija, N/mm	Mažėjimas dėl skersinio pleišėjimo
Parabolinė	33,7	25,403	JSCE 2012 pav. 2.2.5

Sudarytas armatūros strypynas (žr. 3.4 pav.). Priimama, kad sijos gniuždomojoje zonoje yra trys armatūros A_h strypai, o tempiamojoje zonoje – du A_s armatūros strypai. Von Miseso plastiškumas parenkamas kaip medžiagos modelis. Savybės pateikiamos 3.4 lentelėje.

3.2 lentelė. Armatūros savybės

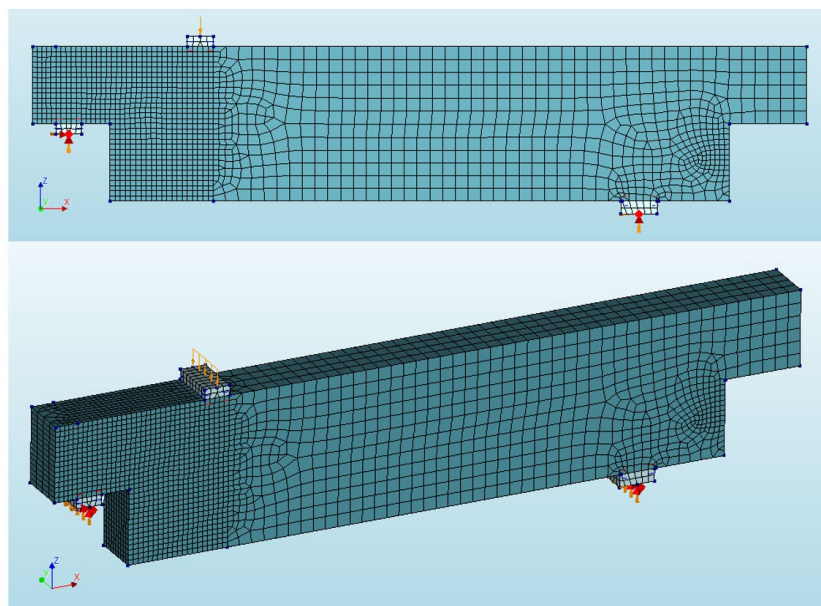
Armatūros grupė	Medžiagos modelis	Tamprumo modulis, GPa	Takumo įtempiai, MPa
A_s	Von Miseso plastiškumas	200	461,82
A_h	Von Miseso plastiškumas	200	368,00
A_{vh}	Von Miseso plastiškumas	200	416,14



3.4 pav. Armatūros išdėstymas modelyje

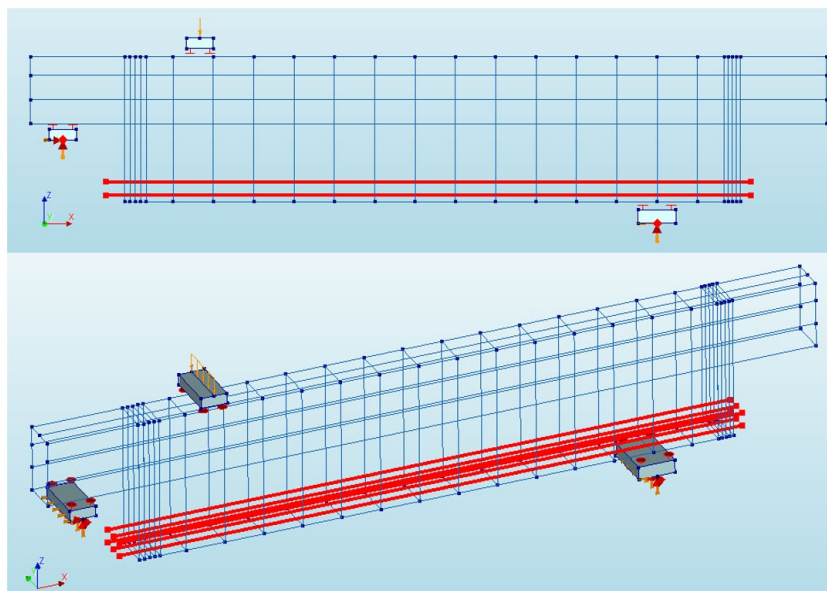
Siją veikia dvi apkrovos – savojo svorio apkrova ir apkrova ant apkrovimo plokštelės. Tarp plokštelių paviršiaus ir jų įspaudo ant sijos įvedama jungtis *3D surface interface*. Plokštelių plienui parenkamas tiesinis medžiagos modelis, kurio tamprumo modulis E prilyginamas 210 GPa , Puasono koeficientas $\nu = 0,3$, o tankis $\rho = 7850\text{ kg/m}^3$.

Baigtinių elementų (toliau - BE) tinklas sudaromas skirtingo dydžio BE (žr. 3.5 pav.), kad pasiekti reikiamą skaičiavimų tikslumą, bet ir palaikyti racionalią kompiuterinių skaičiavimų trukmę. Sija yra paskirstoma į kelias zonas, kuriose skiriasi BE dydžiai: zona aplink kairiąją įpjovą padalinama į kvadratinis 20 mm kraštinės dydžio BE, įpjovos vidinis kampas į 10 mm BE, o dešinėsios įpjovos sienelė į 20 mm dydžio BE (tam, kad tiksliau įvertinti įtemptos armatūros sukeltas deformacijas įpjovos krašte). Likusioji sijos modelio dalis dalinama į 50 mm orientacinių, bet adaptivių pagal situaciją, matmenų dydžio BE. Plokštelių BE dydis parenkamas toks, kad susidarytų bent du BE per plokštelės storį.



3.5 pav. Baigtinių elementų tinklas

Iš anksto įtemptos armatūros poveikio įvertinimui, modelyje yra įvedami šeši $15,7 \text{ mm}$ diametro lynai tempiamojoje sijos zonoje (žr. 3.6 pav.). Armatūros savybės nurodytos 3.5 lentelėje. Armatūros įtempimas įvedamas kaip trečioji apkrova – 1000 MPa įtempiai lynuose, tačiau ši apkrova pirminės analizės metu, kai tikrinamas modelio atitikimas eksperimentui, yra nevertinama.



3.6 pav. Įtemptos armatūros lynai

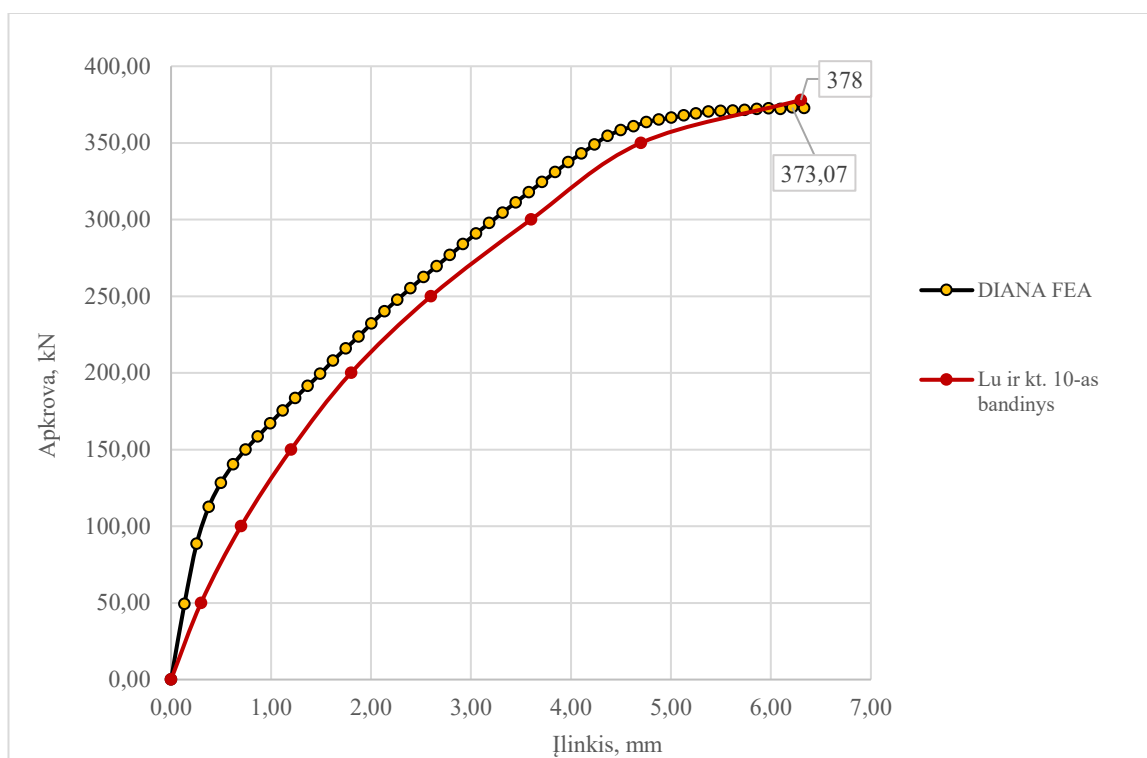
3.3 lentelė. Iš anksto įtemptos armatūros savybės

Armatūros grupė	Medžiagos modelis	Tamprumo modulis, GPa	Takumo įtempiai, MPa
A_{sp}	Von Miseso plastiškumas	195	1600

3.2. Skaitmeninė sijos analizė

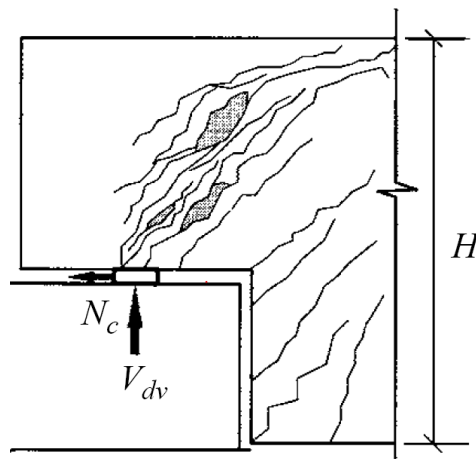
Atliekama analizė susideda iš dviejų etapų. Pirmasis etapas – elemento savojo svorio įvertinimas. Šis etapas yra skaičiuojamas Niutono-Rhapsono žingsniu apkrovos kontrolės metodu. Antruoju etapu yra didinama išorinė apkrova, skaičiuojant arkos ilgio kontrolės metodu, iki kol elementas suyra.

3.7 paveiksle vaizduojamas įlinkių nuo apkrovos priklausomybės rezultatų palyginimas tarp eksperimento ir atliktos skaitinės analizės. Iš rezultatų galima pastebėti, kad skaitiniai rezultatai glaudžiai atkartoja eksperimentinės kreivės formą, tačiau su nedidele įlinkio paklaida iki kol pasiekama suirimo apkrova ir kreivės susikerta. Šią įlinkio paklaidą galima priskirti pirmojo apkrovos žingsnio dydžio įtakai netiesinės analizės metu, kadangi, pritaikius mažesnę pirmąją žingsnį, pirminės deformacijos būtų didesnės. Maksimalios apkrova skaitinės analizės metu $F = 373,07 \text{ kN}$, o eksperimento metu $F = 378 \text{ kN}$. Reikšmės tarp rezultatų skiriasi 1,30 %. Taigi, įvertinant įlinkių kreivę ir maksimalią apkrovą, galima teigti, kad skaitinio modelis tikslumas tenkinamas.



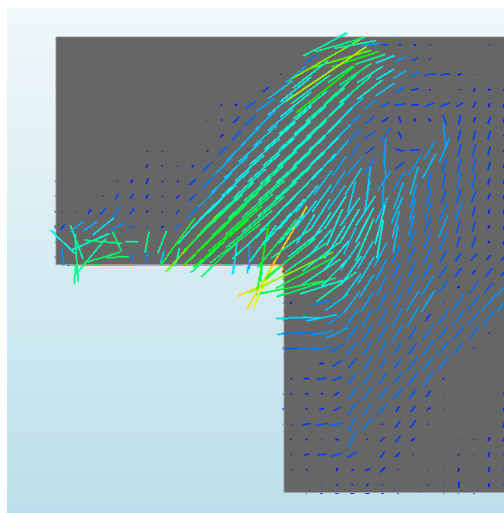
3.7 pav. Skaitinė ir eksperimentinė įlinkių nuo apkrovos priklausomybė

Eksperimento autoriai konkretaus suirimo pobūdžio kiekvienam bandiniui nepateikia, tačiau nurodo tipinį tyrimo bandinių pleišėjimą ir irties pobūdį. Jis pavaizduotas 3.8 pav.

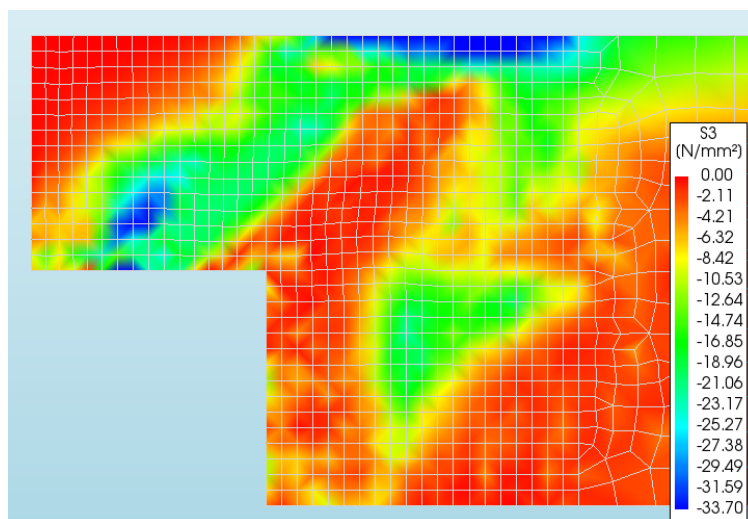


3.8 pav. Tipinis Lu ir kt. eksperimento suirimas (Lu et al., 2003)

Kadangi, 3.8 pav. tai nėra konkretaus analizuojamo bandinio suirimas, todėl negalima taikyti šio paveikslėlio modelio verifikacijai, bet galima naudoti kaip orientaciją bendrai mazgo elgsenai palyginti. 3.9 paveiksle yra pavaizduotas skaitinio modelio pleišėjimas prie maksimalios apkrovos. Pirmiausia, galima pastebėti, kad didžiausias pleišėjimas tiek eksperimento metu, tiek skaitinio modelio, dominuoja toje pačioje zonoje – virš atramos, įstriža kryptimi link apkrovos pridėjimo vietos. Be to, atsikartoja ir įstriži plyšiai nuo įpjovos pilno aukščio sijos dalyje. Vis dėlto matoma ir skirtumų, kuriuos galėjo lemti netiesinės analizės apkrovos žingsnio dydis, kadangi skaitinis modelis stipriau pleišėja įpjovos vidiniame kampe bei matoma plyšių sijos gale. 3.10 paveiksle matomi vidutiniai principiniai gniuždomieji įtempiai esant maksimaliai apkrovai. Virš atramos matomas įstrižojo gniuždomojo spyrio ruožas, turintis ribinių gniuždomųjų įtempių. Tai atitinka tiek autorių aprašomą bandinių elgseną, tiek susidarancius plyšius nuo įstrižojo gniuždymo. Įvertinus, kad 3.8 paveikslas yra tik orientacinio pobūdžio, galima teigti, kad skaitinis modelis tinkamai atvaizduoja realią sijos atraminio mazgo elgseną.

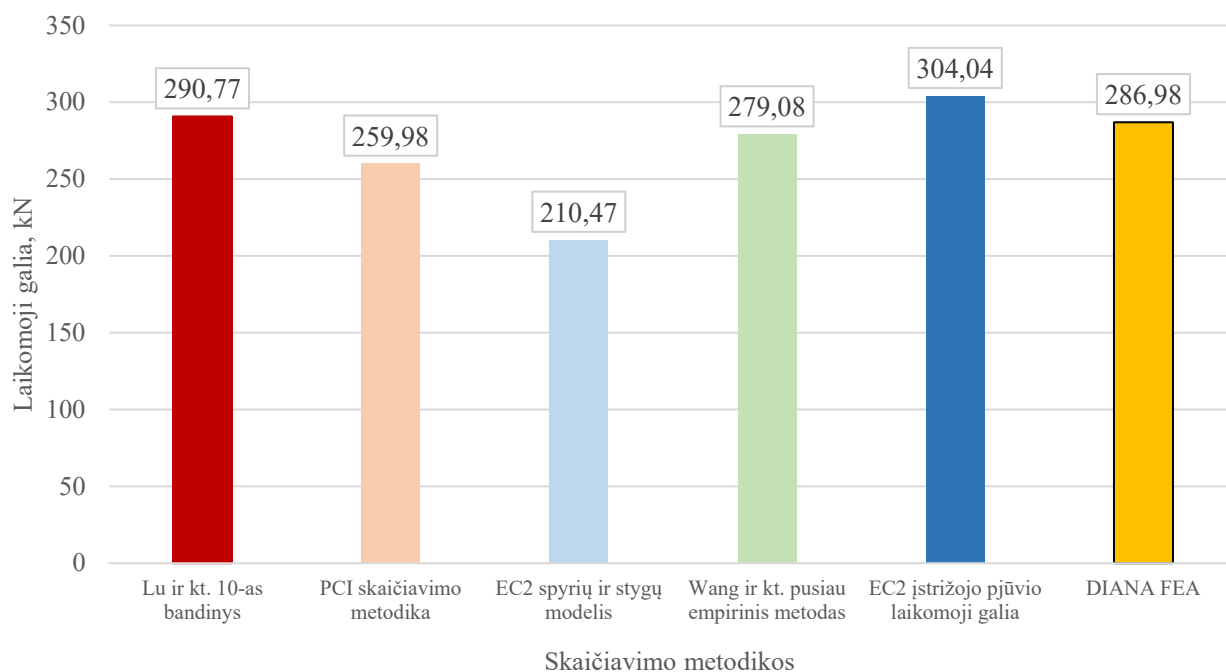


3.9 pav. Skaitinio modelio pleišėjimas esant maksimaliai apkrovai

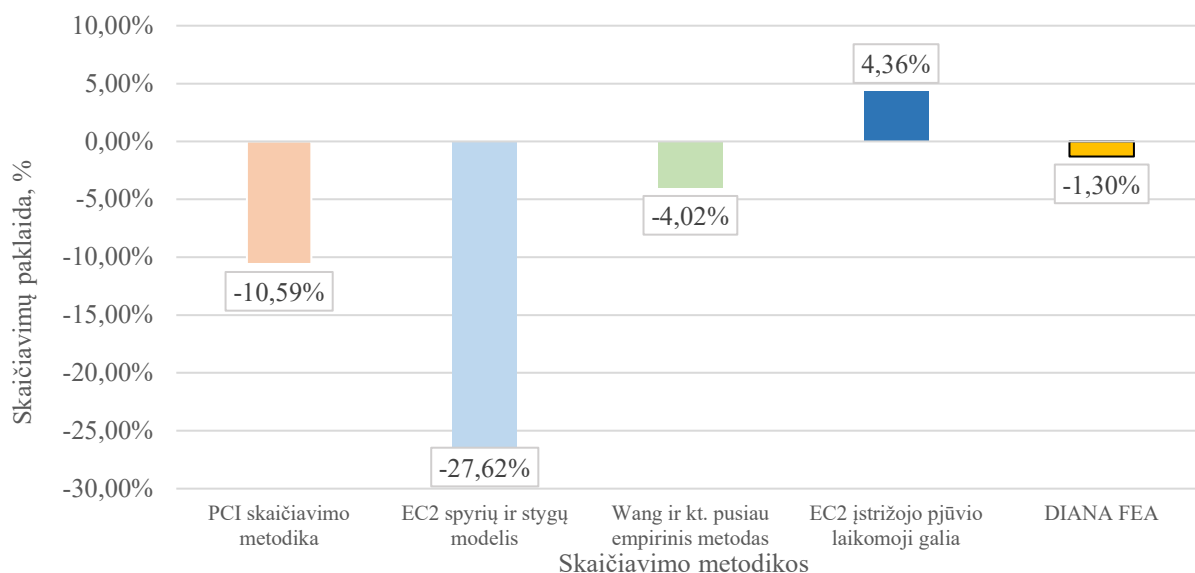


3.10 pav. Principiniai gniuždomieji įtempiai esant maksimaliai apkrovai

Skaitinio modelio skersinė laikomoji galia $V = 286,98 \text{ kN}$. Lyginant rezultatus su eksperimento (3.11 ir 3.12 pav.) matoma, kad modelis pakankamai tiksliai apskaičiuoja laikomąją galią, nuvertindamas tik 1,30 %. Pastebima, kad Wango metodo analitiniai skaičiavimai yra artimiausi skaitinio modelio rezultatams, reikšmės skiriasi 2,72 %. Šiek tiek mažiau panašus rezultatas gaunamas skaičiuojant pagal EC2 metodą – skirtumas 5,66 %.



3.11 pav. Eksperimentinės, analitinės ir skaitinės laikomosios galios palyginimas



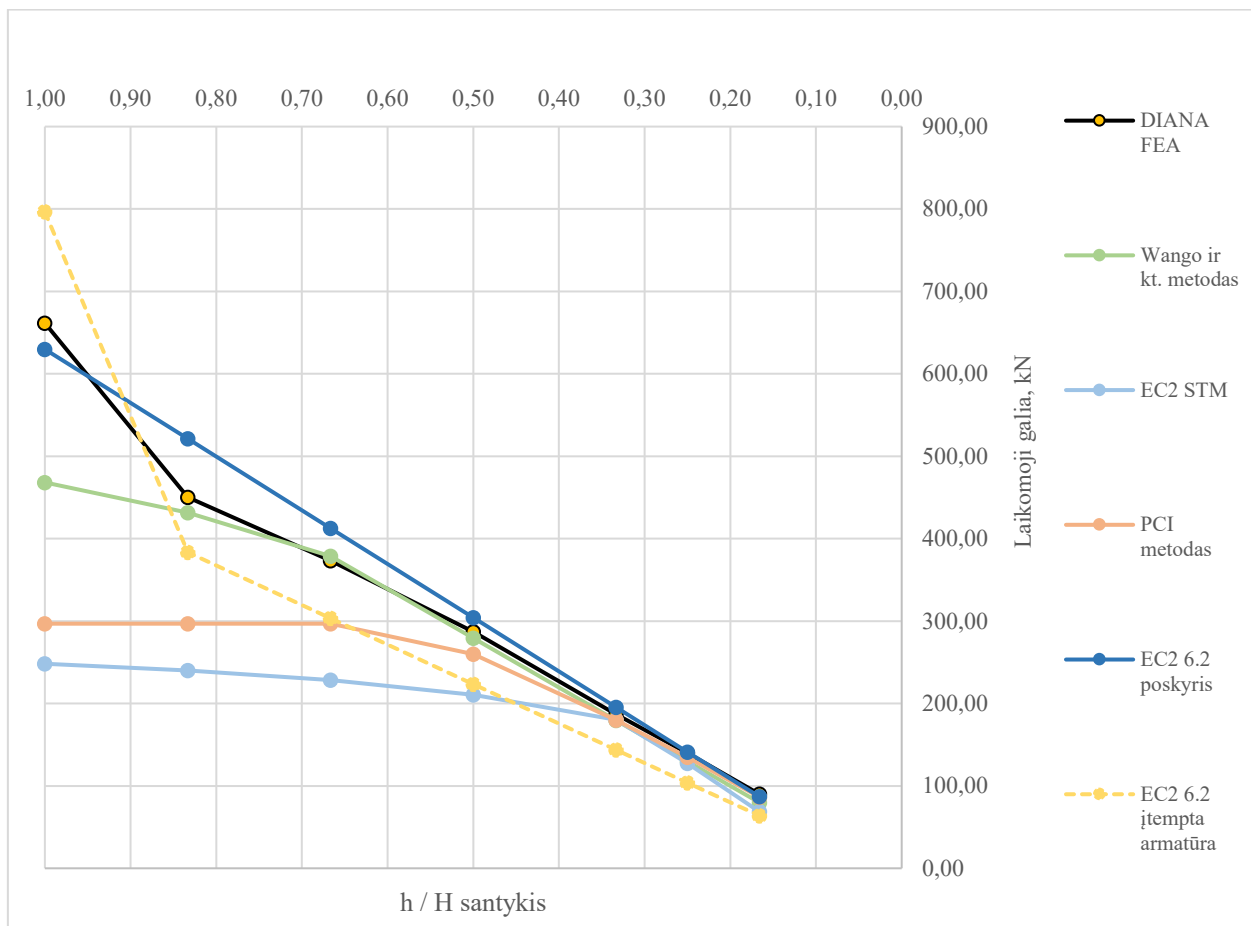
3.12 pav. Eksperimentinės, analitinės ir skaitinės laikomosios galios santykinis skirtumas

3.3. Skaitmeninė parametrinė analizė

Norint nustatyti iš anksto įtemptos armatūros įtaką mazgo su įpjova elgsenai, skaitinė parametrinė analizė buvo atliekama du kartus. Pirmą kartą analizė atlikta nevertinant armatūros įtempimo, o antrą kartą atliekant analizę, pirmiausiai armatūra buvo įtempama ir tik tada sija buvo apkraunama. Nagrinėjami parametrai buvo tie patys kaip ir analitinės analizės metu. Toliau pateikiami skaitinės analizės rezultatai yra lyginami su analitiniais. Svarbu paminėti, kad įtemptos armatūros įtaka laikomajai galiai, esant tokiam mazgo armavimui ir suirimo pobūdžiui, buvo per maža, kad lyginti gautus rezultatus bendruose grafikuose, todėl ji yra lyginama atskirai. Vis dėlto, nepaisant suirimo pobūdžio, kaip rašo ir autoriai literatūroje (Mattock & Theryo, 1986), armatūros įtempimas nepratęsiant lynų iki sijos galo ženkliai padidina elemento pleišėjimą, todėl papildomas nagrinėtas parametras buvo įtempimo intensyvumo įtaka elemento pleišėjimui.

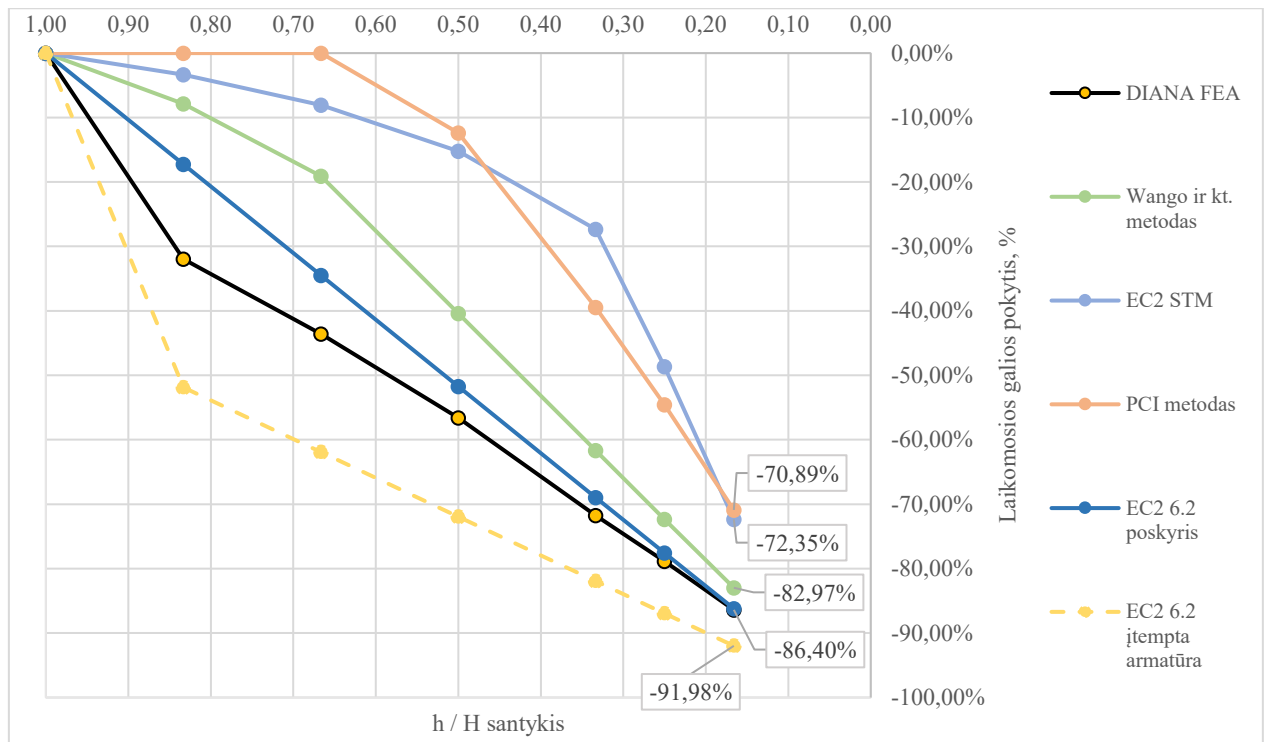
Pirmasis parametras – įpjovos aukščio įtaka. Rezultatai pavaizduoti 3.13 ir 3.14 paveiksluose. h/H santykiui esant lygiam 1,0 (kai nėra įpjovos), armatūros lynai yra išdėstyti skersai susidarantiems plyšiams. Šiam santykiui esant lygiam 0,83 (ir mažiau) – lynai išdėstyti įpjovos aukštyje, todėl pavojingiausių plyšių nekerta skersai. 3.13 pav. „DIANA FEA“ kreive pateikiami rezultatai, kai šie armatūros lynai nėra įtempiami. Kai įpjovos nėra ir lynai išdėstomi skersai plyšių, tada matoma, kad laikomoji galia gaunama 31,98 % didesnė nei atraminio mazgo su 100 mm įpjova. Lyginant analitinius metodus tikslumo atžvilgiu, kai įpjova yra, geriausiai skaitinio modelio rezultatus atitinka Wango metodas. Įvertinant tą faktą, kad Wango metodas buvo sudarytas siekiant kuo tiksliau apskaičiuoti galią, o ne skirtas mazgų projektavimui, tai, galima

teigi, kad šis rezultatų sutapimas patvirtina skaitinio modelio teisingumą. Be to, mažesnis rezultatų sutapimas, kai įpjovą labai maža ir ypač, kai panaikinama, parodo, kad Wango metodas yra optimizuotas būtent elementams su įpjova. EC2 STM ir PCI skaičiavimai rodo dėsningumą, kad projektavimo metodai galią įvertina konservatyviai dėl atsargos. EC2 metodas visuose taškuose galią pervertina, išskyrus skaičiavimo situacijoje, kai įpjova panaikinama.



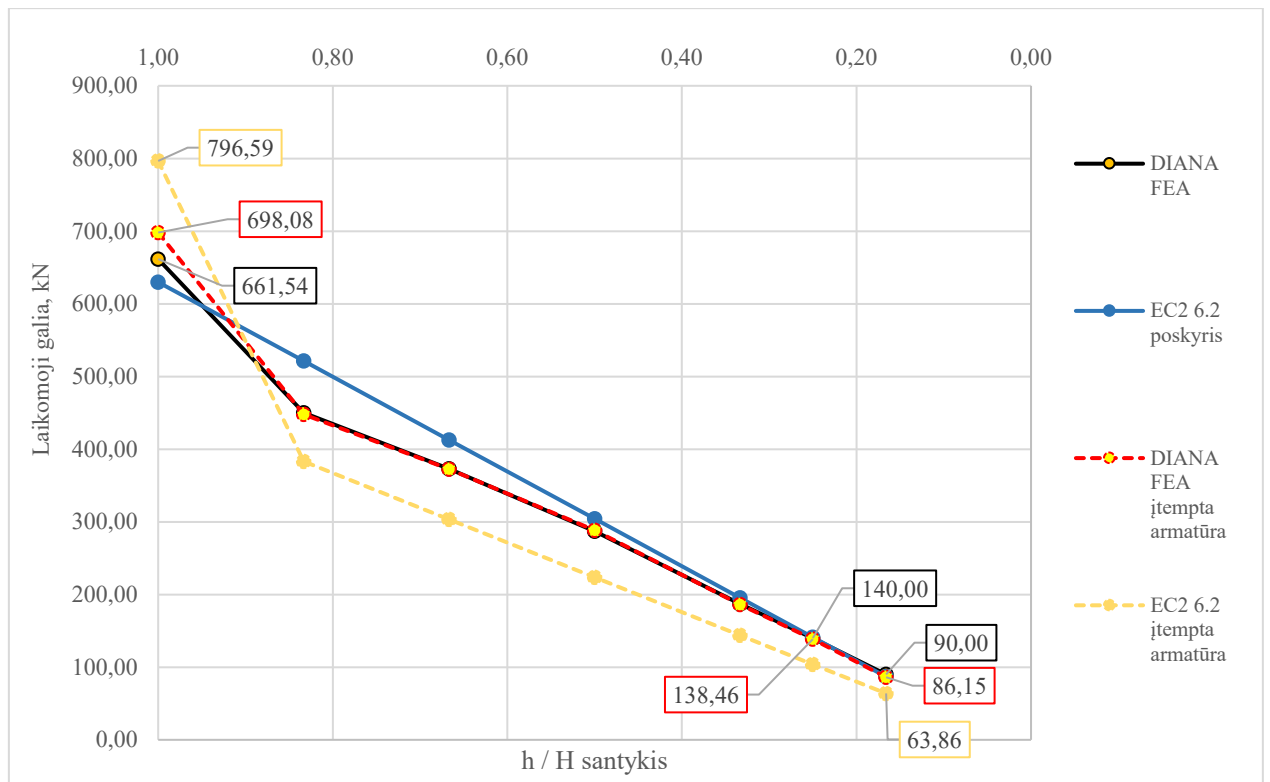
3.13 pav. Įpjovos aukščio įtaka laikomajai galiai

Iš 3.14 paveikslo matomas galios mažėjimo kitimas DIANA FEA rezultatuose. Įpjova didinama vienodais žingsniais. Didžiausias pokytis matomas po pirmojo žingsnio – laikomoji galią sumažėja 31,98 %. Tokį laikomosios galios skirtumą lemia anksčiau minėtas faktas, kad kai įpjovos nėra, armatūros lynai išdėstyti skersai susidarantių plyšių. Po antrojo įpjovos didinimo žingsnio laikomoji galia sumažėja dar 11,62 %, po trečiojo 13,02 % ir ketvirtojo – 15,12 %. Taigi, didėjant įpjovai, laikomoji galia mažėja netiesiškai, tačiau tokio eksponentiško sumažėjimo, kaip EC2 STM ir PCI metodais, skaitiniame modelyje nėra.



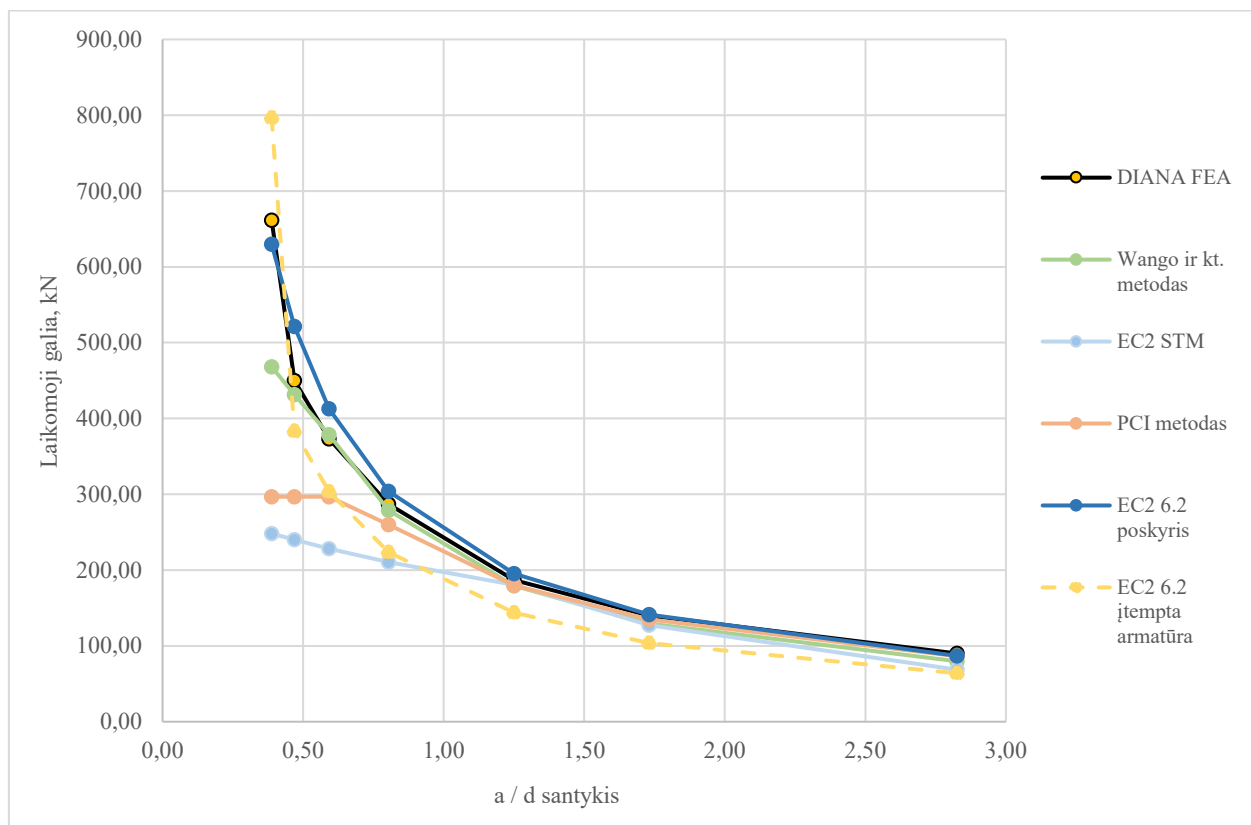
3.14 pav. Įpjovos aukščio įtaka laikomosios galios pokyčiui

3.15 paveiksle pavaizduotas palyginimas tarp įtemptos armatūros rezultatų ir neįtemptos. Rezultatuose matoma, kad h/H santykiui esant lygiam 1,0 (kai nėra įpjovos), iš anksto įtempti lynai apspaudžia įstrižąją pjūvį ir mazgo laikomoji galia dėl apspaudimo padidinama nuo 661,54 kN iki 698,08 kN (5,52 % didesnė laikomoji galia).



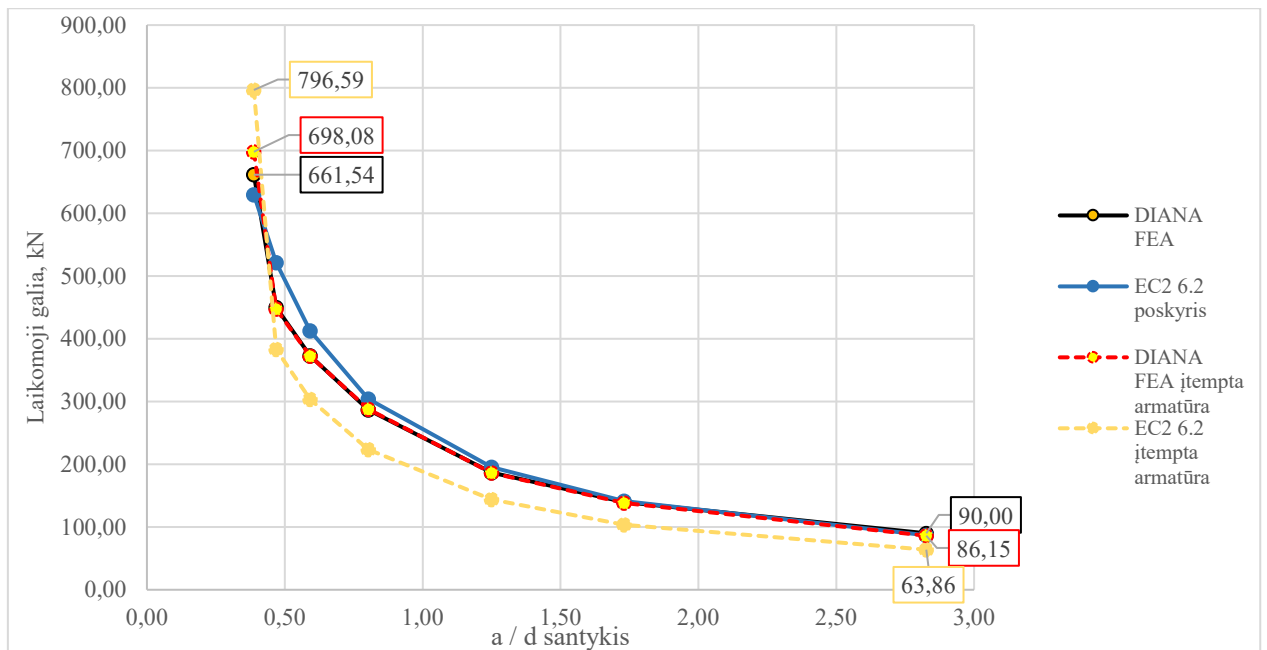
3.15 pav. Įpjovos aukščio įtaka laikomajai galiai įtempus armatūrą,

Kai atraminiame mazge padaroma įpjova ir lynai apspaudžia įpjovos kraštą, tada laikomosios galios padidėjimo nėra (žr. 3.15 pav.). Rezultatuose matoma, kad prie pačių mažiausių h/H santykio reikšmių, matomas laikomosios galios mažėjimas dėl armatūros įtempimo. Kai $h/H = 0,17$, tada galia nuo įtemptos armatūros sukeliamų tempiamųjų įtempių pamažėja per 4,27 %. Lyginant skaitinio modelio rezultatus su analitiniais matoma, kad EC2 stipriai pervertina tiek laikomosios galios padidėjimą, kai įpjovos nėra, tiek ir laikomosios galios sumažėjimą, kai įpjova yra.



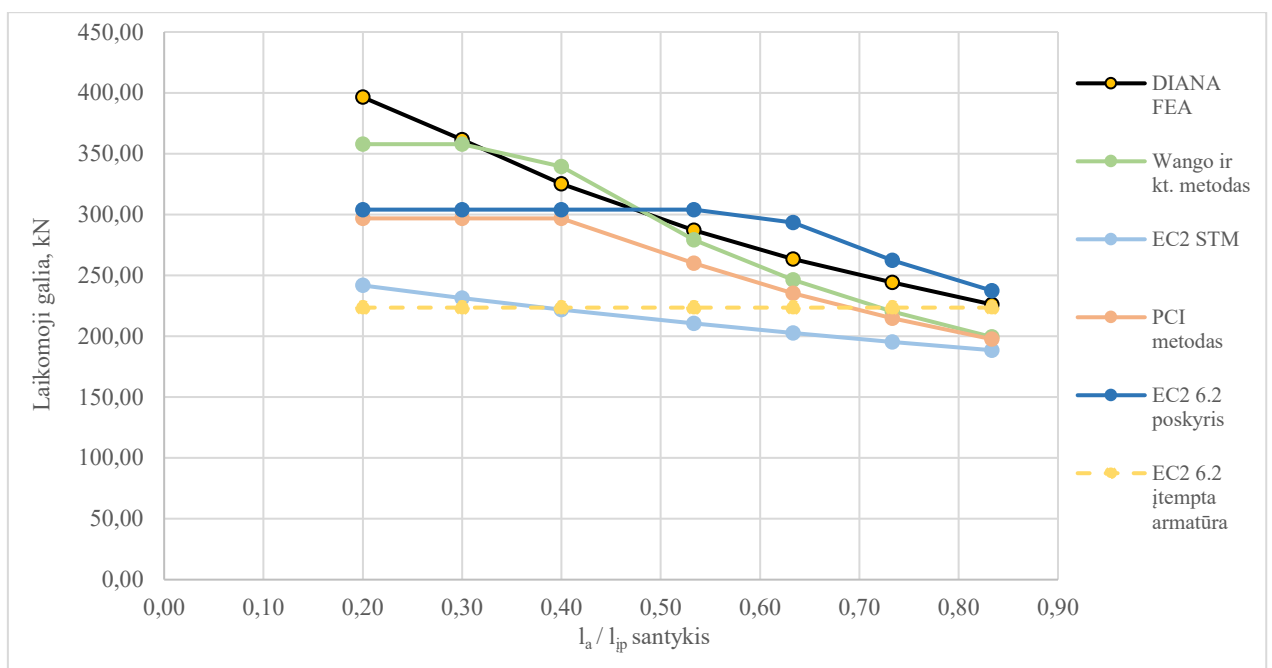
3.16 pav. a/d santykio įtaka laikomajai galiai

Įpjovos aukščio analizė atvaizduojama per a/d santykio priklausomybę, gaunami rezultatai pateikiami 3.16 pav. Rezultatai atspindi įprastą, daug kartų aprašytą, tokio mazgo elgseną – a/d santykiui didėjant, laikomoji galia mažėja. Kiek netikėta elgsena matoma nagrinėjant 3.17 paveikslą. Konstrukcijos laikomoji galia dėl įtempimo sumažėja labiausiai, kai a/d pasiekia didžiausią reikšmę, nors, nagrinėjant literatūroje aprašomą elgseną, kai a/d santykis didėja, suirimas dažniausiai vyksta dėl lenkimo momento. Jeigu lyginti skaitinius rezultatus su EC2 metodu, tai, matoma, kad rezultatai kinta pagal panašią priklausomybę, tačiau, atraminiame mazge esant įpjovai, laikomoji galia dėl įtempimo sumažėja labiau nei skaitiniame modelyje.

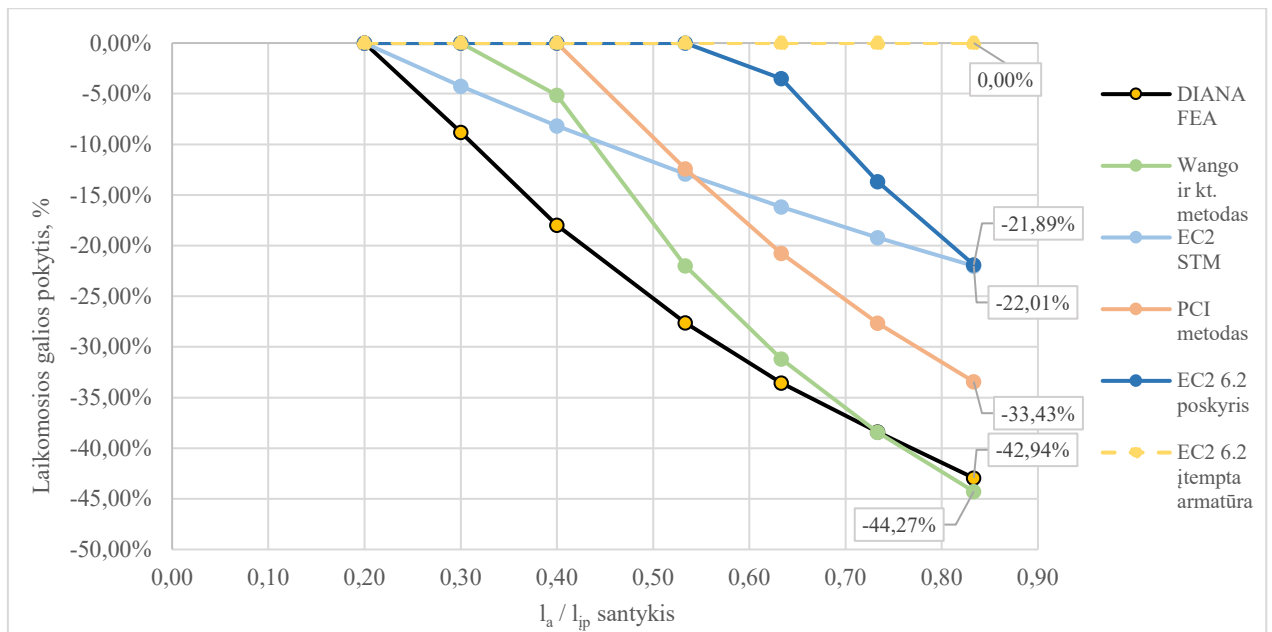


3.17 pav. a/d santykio įtaka laikomajai galiai įtempus armatūrą

Kitas nagrinėtas parametras buvo apkrovos pridėties vieta, kuri išreiškiama per l_a/l_{ip} santykį. Rezultatai vaizduojami 3.18 – 3.20 paveiksluose. Nagrinėjant rezultatus galima vertinti, kad skaitinio modelio elgsena labiausiai atitinka Wango metodo rezultatus. Šiuo atveju beveik visais metodais skaičiuota laikomoji galia yra konservatyvesnė nei skaitinio modelio, išskyrus Wang metodo viename taške, kai atrama yra beveik per vidurį. EC2 6.2 poskyris pervertina laikomąją galią, kai atrama yra toliau įpjovos centro, arčiau sijos galo. Iš 3.18 pav. matoma, kad skaitinio modelio rezultatais, laikomoji galia gali skirtis 42,94 % priklausomai nuo to, kur bus atraminis taškas pridėtas įpjovoje. Tai labiausiai atitinka Wango metodo galios pokytį.

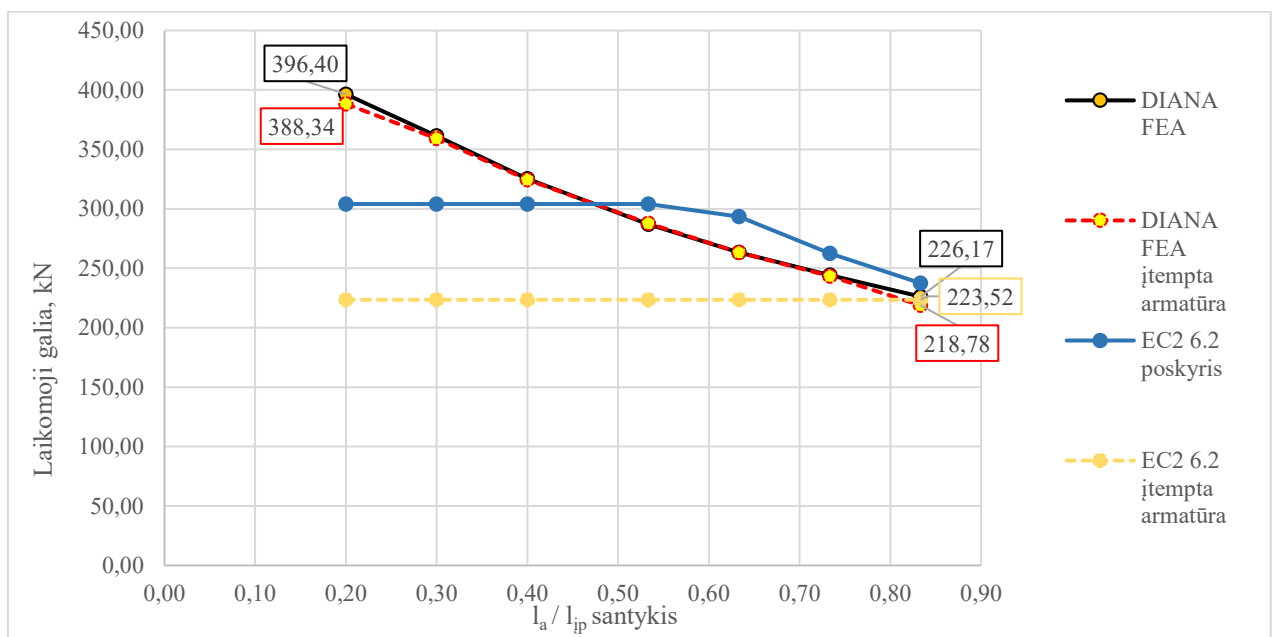


3.18 pav. l_a/l_{ip} santykio įtaka laikomajai galiai



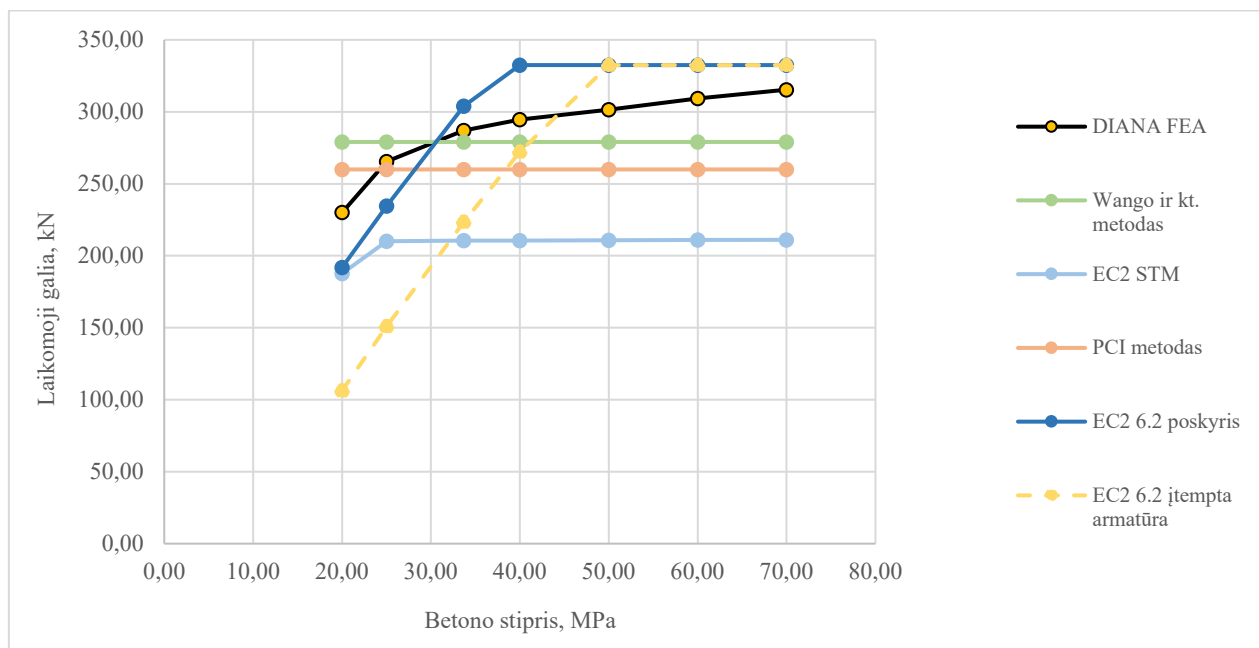
3.19 pav. l_a/l_{ip} santykio įtaka laikomosios galios pokyčiui

3.20 paveiksle pavaizduotas l_a/l_{ip} santykio įtakos laikomajai galiai palyginimas tarp įtemptos armatūros skaitinio modelio ir neįtemptos. Iš rezultatų matoma, kad ties ribinėmis santykio reikšmėmis, įtempta armatūra daro įtaką laikomajai galiai. Kai santykis yra mažiausias t.y. $l_a/l_{ip} = 0,20$, tai laikomoji galia dėl įtempimo sumažėja 2,03 %. Kai santykis lygus 0,8, laikomoji galia sumažėja daugiau – apie 3,27 %. Tuo tarpu analitiniai skaičiavimai vaizduoja tokią elgseną – armatūros įtempimas taip sumažina betono spyrio laikomąją galią, kad armatūros pridėties vieta nedaro jokios įtakos mazgo laikomajai galiai. Vis dėlto, reikia atkreipti dėmesį į tai, kad tokia elgsena lemia, jog visuose atramos pridėties taškuose, išskyrus tolimiausią, EC2 6.2 poskyrio skaičiavimai yra konservatyvesni už skaitinio modelio rezultatus.



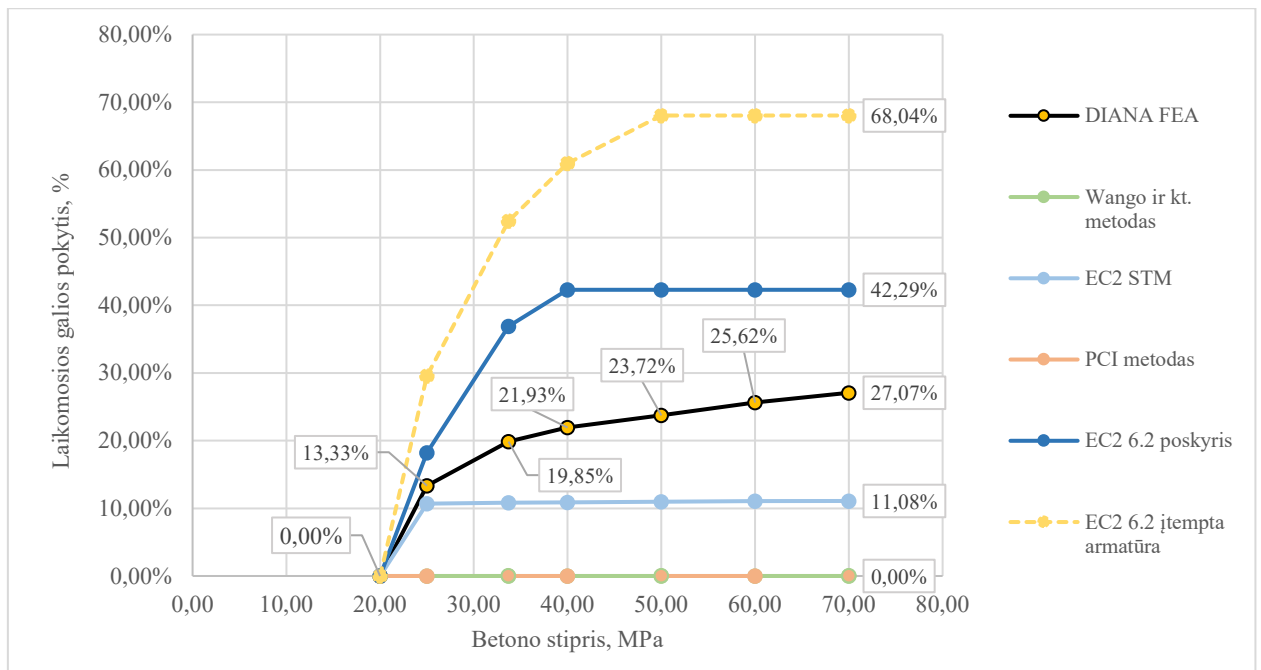
3.20 pav. l_a/l_{ip} santykio įtaka laikomajai galiai įtempus armatūrą

Ketvirtasis nagrinėtas parametras – betono stipris. Pagrindinis skirtumas tarp skaitinio modelio elgsenos ir analitinių skaičiavimų yra tai, kad didėjant stipriui, laikomoji galia nesustoja didėti (žr. 3.21 ir 3.22 pav.)



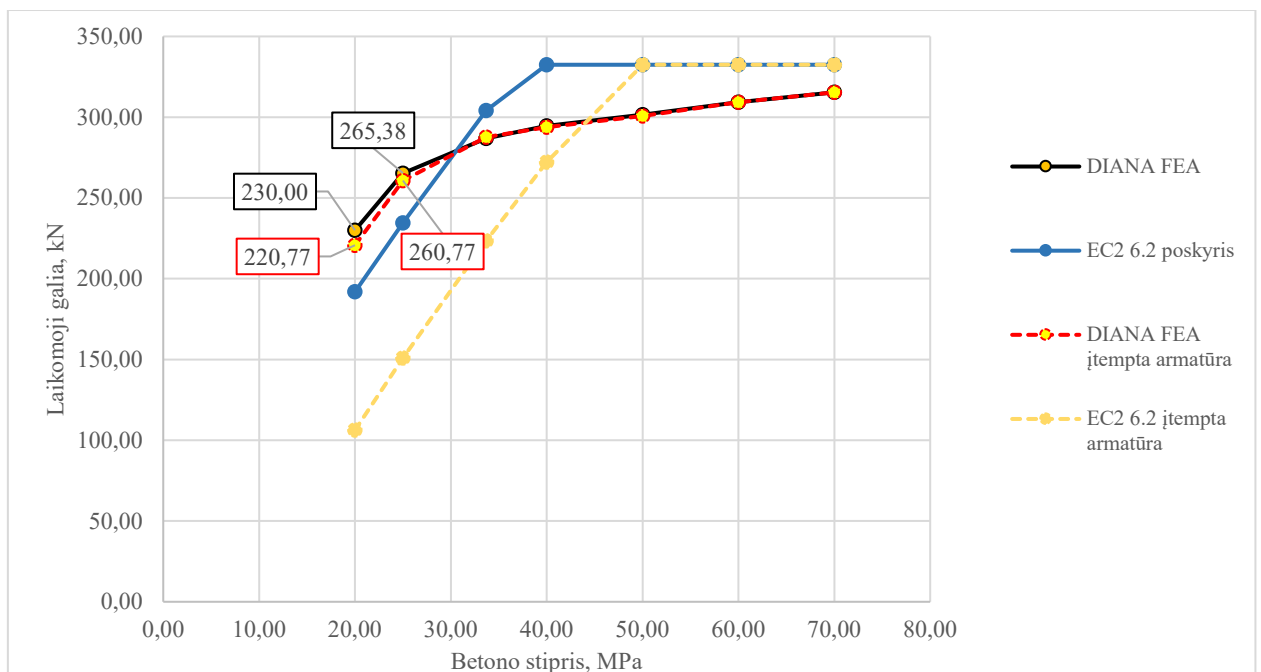
3.21 pav. Betono stiprio įtaka laikomajai galiai

Šis skaitinio modelio galios didėjimas gali būti padalintas į dvi dalis. Esant mažesniai betono stipriui, jo įtaka yra ženkliai didesnė nei pasiekus atitinkamą stiprio reikšmę. Šiuo atveju ta reikšmė yra tarp 25 MPa ir 33,7 MPa. Po šio taško, laikomoji galia didėja praktiškai pagal tiesinę priklausomybę. Iš dalies tokia elgsena yra panaši į analitinių rezultatų, tik skirtumas yra tas, kad skaičiavimo metoduose priimama nevertinti tolesnio galios didėjimo. Jeigu pažvelgti į 3.22 pav. tai, pirmasis 5 MPa betono stiprio pokytis galią padidina 13,33 %, antrasis 8,70 MPa pokytis – 6,52 %. Toliau, nuosekliais 10 MPa žingsniais nuo 40 MPa iki 70 MPa, laikomoji galia didėja po apytiksliai 1,50 %, vadinasi, skirtumas nežymus ir galimai dėl to yra nevertinamas analitiniuose skaičiavimuose. Vis dėlto, jeigu lyginti tokią elgseną su eksperimentine, tai analogiškuose autorių bandymuose (Lu et al., 2003) laikomosios galios ir betono stiprio padidėjimo santykis buvo lygus apytiksliai 0,24, o skaitinio modelio atveju jis yra lygus apytiksliai 0,11, todėl galima teigti, kad skaitinio modelio elgsena galimai ne visai teisingai atspindi betono stiprio poveikį konstrukcijos darbui. Tai gali priklausyti nuo poros faktorių: pirma – daugelis betono parametrų buvo skaičiuojami, o ne pateikiami tyrimo aprašyme, antra – įstrižojo pjūvio galia labai priklauso nuo pačios betono sudėties, pavyzdžiui, užpildų dydžio, o ne tik stiprio parametrų.



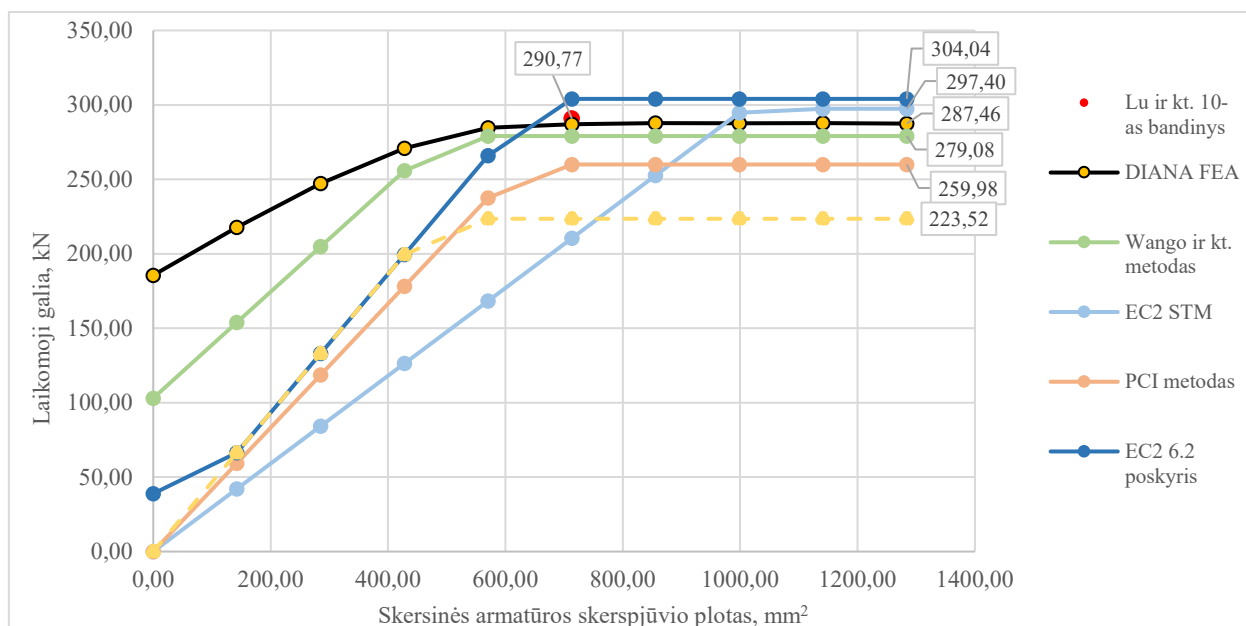
3.22 pav. Betono stiprio įtaka laikomosios galios pokyčiui

Iš anksto įtemptos armatūros poveikis vaizduojamas 3.23 pav. Matoma, kad esant mažesniems betono stipriams armatūros įtempimas turi reikšmingą poveikį laikomajai galiai. Tai iš dalies atspindi EC 6.2 vaizduojamą elgseną – kuomet betono stipris mažesnis, tuo jautresnis yra mazgas su įpjova armatūros apspaudimo jėgos sukeliama tempimo įtampa. Didžiausias laikomosios galios pamažėjimas matomas, kai betono stipris lygus 20 MPa. Tada laikomoji galia sumažėja 4,01 %, o kai betono stipris padidinamas 5 MPa, galia nuo įtempimo mažėja 1,74 %. Prie didesnio stiprio laikomosios galios pokytis nereikšmingas esant tokiai atraminio mazgo konfigūracijai.

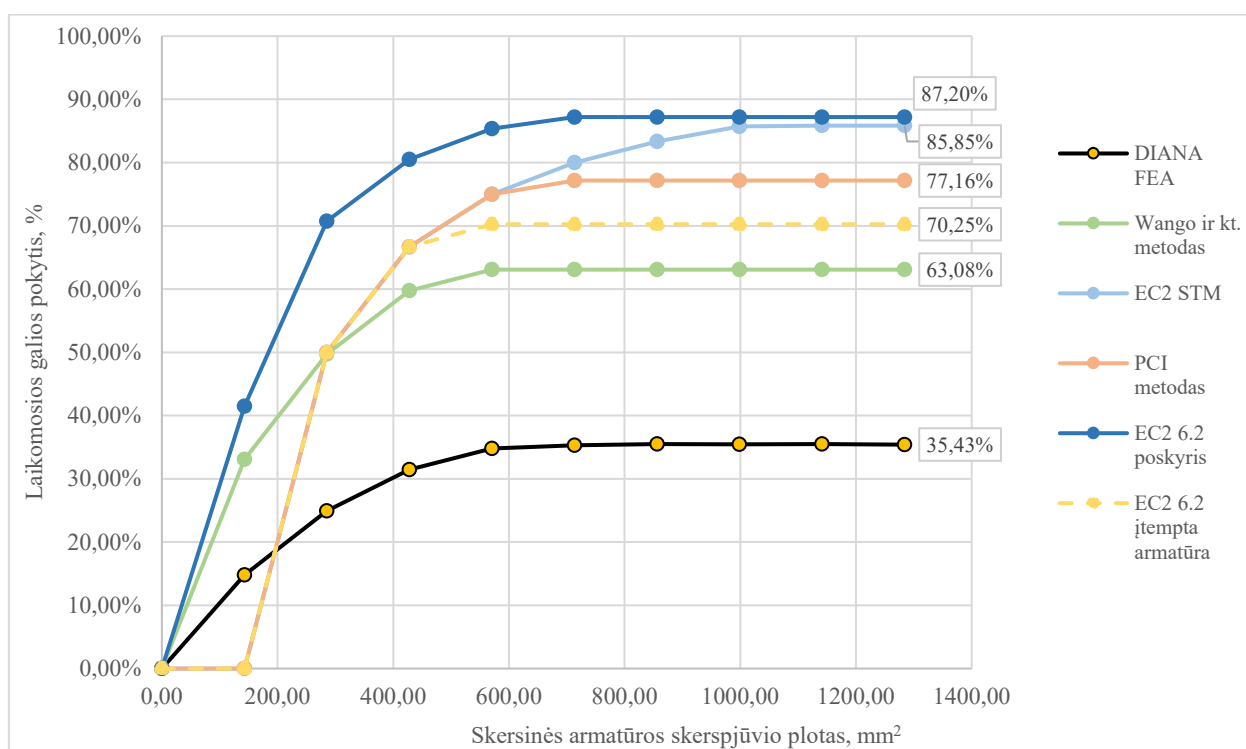


3.23 pav. Betono stiprio įtaka laikomajai galiai įtempus armatūrą

Kaip ir analitinėje analizėje, penktasis nagrinėjamas parametras buvo skersinės armatūros kiekis A_{vh} . Rezultatai pateikiami 3.24 – 3.26 pav.



3.24 pav. Skersinės armatūros kiekio įtaka laikomajai galiai

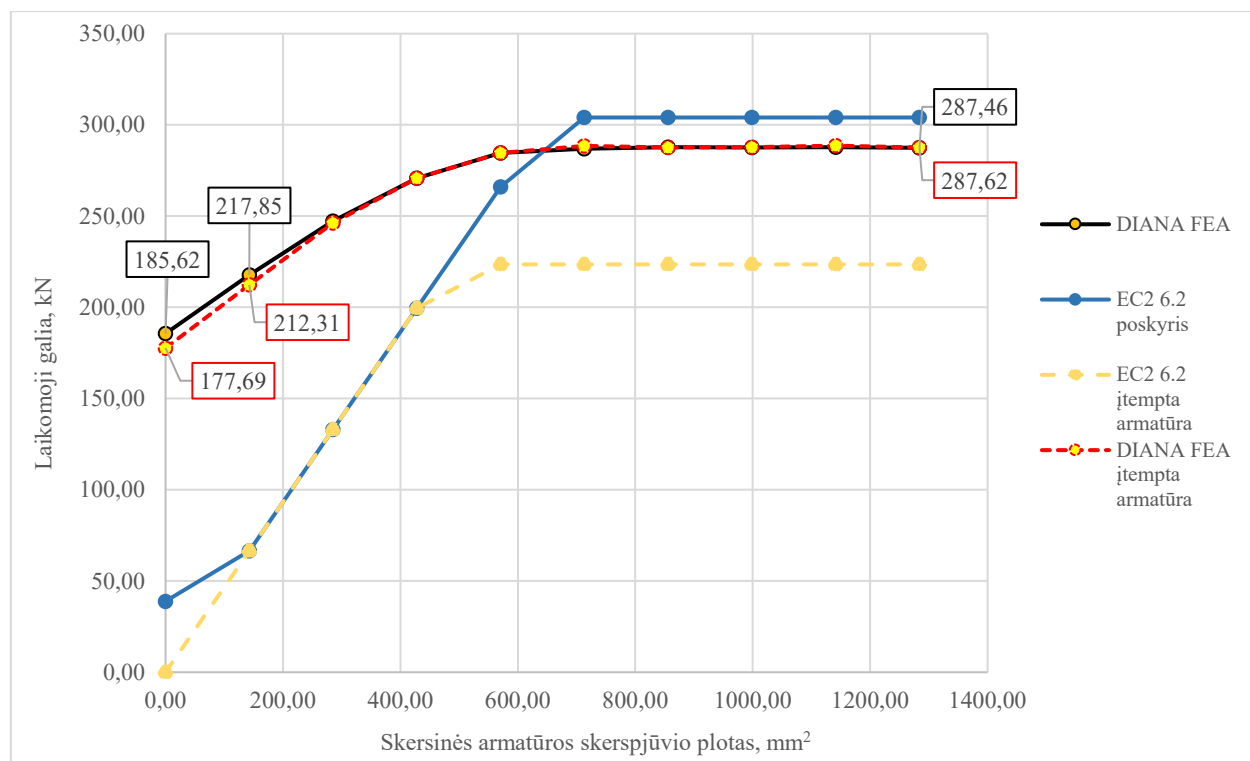


3.25 pav. Skersinės armatūros kiekio įtaka laikomosios galios pokyčiui

Visose 3.24 pav. kreivėse matoma, kad yra skersinės armatūros kiekis, po kurio laikomoji galia nebedidėja. Esminis skirtumas tarp skaitinio modelio ir analitinių skaičiavimų yra tas, kad prie mažo skersinio armavimo, analitiniai metodai tinkamai neįvertina, kad išilginė ir horizontalioji sijos galo armatūra perima tas jėgas, kurias atlaikytų skersinė armatūra. Wango

metodas geriausiai atitinka skaitinio modelio elgseną. Prie mažesnio armavimo reikšmės konservatyvesnės, tačiau skersinės armatūros kiekio žingsnis, po kurio laikomoji galia nebedidėja – sutampa idealiai. EC2 6.2 poskyrio skaičiavimais, kaip ir ankstesniuose parametruose, matoma ruožas, po kurio metodas laikomąją galią pervertina. 3.25 pav. vaizduojama, kad maksimalus laikomosios galios padidėjimas nuo skersinės armatūros yra 35,43 %, o analitiniais metodais mažiausiai 63,08 %. Tai lemia anksčiau aprašyta elgsena, kad pradinė skaitinio modelio be skersinės armatūros galia yra ženkliai didesnė.

3.26 pav. vaizduojamas įtemptos armatūros poveikis, kuriame matoma, kad kuo skersinės armatūros kiekis yra mažesnis, tuo poveikis laikomajai galiai yra didesnis. Kai skersinės armatūros prie įpjovos krašto nėra, tada laikomoji galia sumažėja 4,27 %. Į skaitinį modelį įvedus du 9,53 mm diametro armatūros strypus, galios mažėjimo poveikis nebe toks intensyvus – 2,54 %. Vis dėlto, jeigu lyginti su analitiniais EC2 skaičiavimais, tai skaitinio modelio elgsena jų neatitinka, kadangi maksimali laikomoji galia esant stipriam armavimui nemažėja.



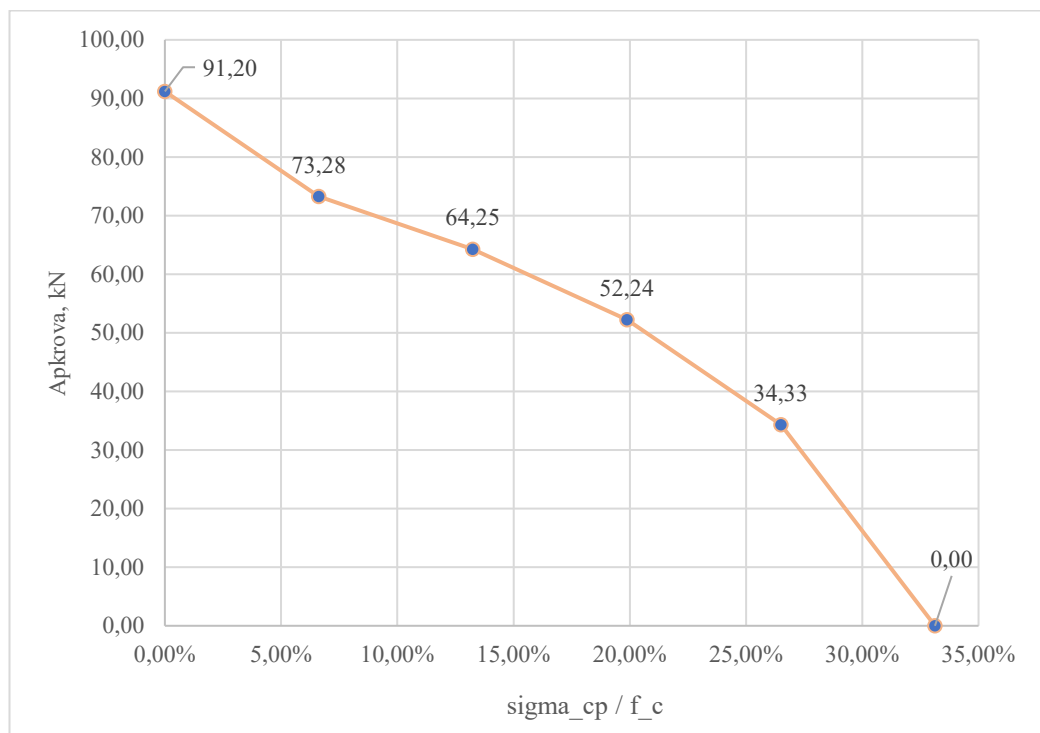
3.26 pav. Skersinės armatūros kiekio įtaka laikomajai galiai įtemptas armatūrą

Taigi, iš rezultatų matoma, kad iš anksto įtemptos armatūros sukiamų tempiamųjų įtempių poveikis nėra toks reikšmingas, kad visomis mazgo konfigūracijomis reikšmingai sumažintų laikomąją galią. Vis dėlto, nors suirimo pobūdis nepasikeičia, pleišėjimas vidiniame įpjovos kampe vyksta visais atvejais, o tai sukelia armatūros korozijos ir kitas ilgalaikes rizikas. Todėl, pasirinkta nagrinėti dar vieną parametą – plyšių susidarymo apkrovą, priklausomai nuo armatūros įtempimo intensyvumo. Priimama, kad sija yra apkraunama iki kol susidarys 25 % rekomenduojamo 0,2 mm ribinio plyšio pločio tokio tipo elementams (LST EN 1992-1-1 7.1N

lentelė). Rezultatai pavaizduoti 3.6 lentelėje. F/F_{max} – santykis tarp pleišėjimo apkrovos ir elemento suirimo apkrovos. 3.27 paveiksle pavaizduota pleišėjimo vidiniame įpjovos kampe apkrovos priklausomybė nuo skerspjūvio apspaudimo santykio σ_{cp} / f_c .

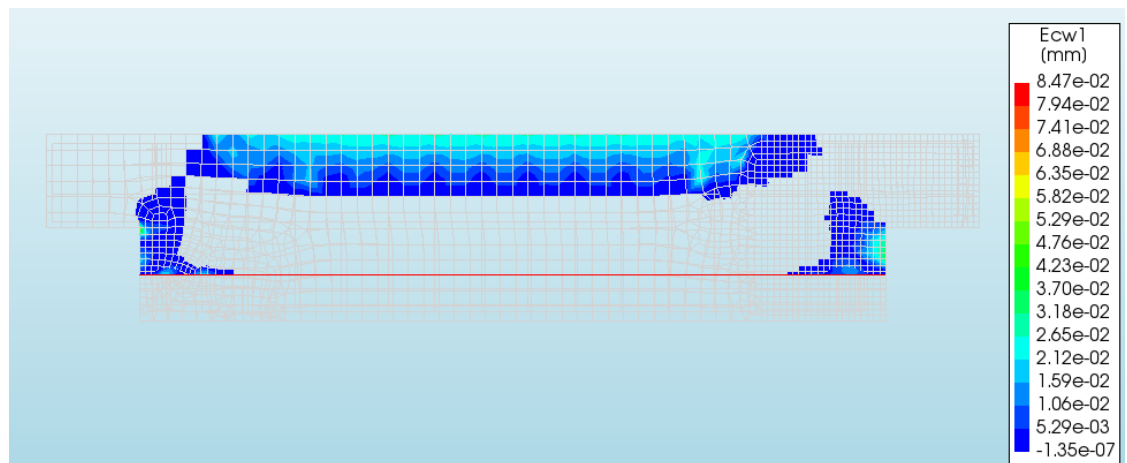
3.4 lentelė. Įtempimo intensyvumo įtaka pleišėjimui

Lynų įtempimas, <i>MPa</i>	σ_{cp} / f_c	Apkrova, <i>kN</i>	F/F_{max}
0	0,00%	91,20	24,45%
250	6,63%	73,28	19,64%
500	13,25%	64,25	17,22%
750	19,88%	52,24	14,00%
1000	26,50%	34,33	9,20%
1250	33,13%	0,00	0,00%



3.27 pav. Pleišėjimo apkrovos priklausomybė nuo skerspjūvio apspaudimo santykio

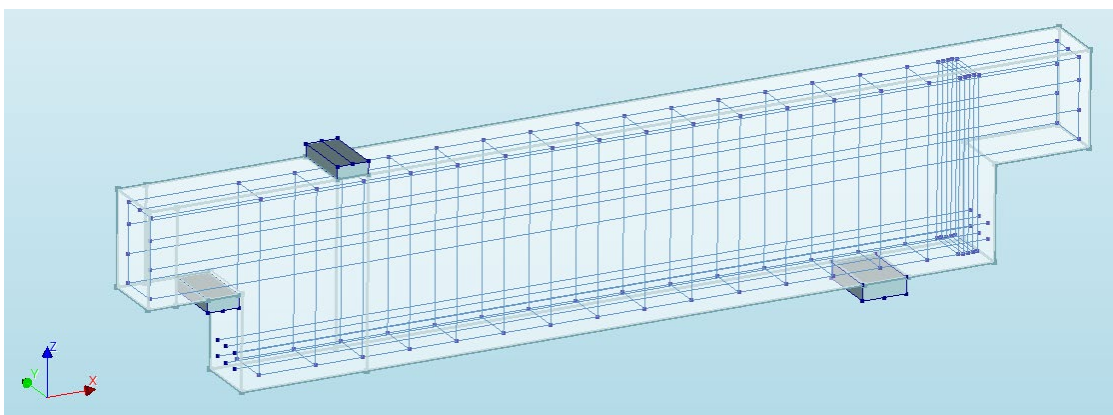
Nustatyta, kad įtemptos armatūros apspaudimo jėgos sukeltami įtempiai ženkliai pablogina vidinio įpjovos kampo atsparumą pleišėjimui. Apkrova sumažėja perpus, kai santykiniai įtempiai nuo apspaudimo yra 20 – 25 % intervale. Įtempius padidinus dar labiau, skaitinio modelio atraminio mazgo vidiniame kampe susidarė apytiksliai 0,08 mm plyšys armatūros įtempimo stadijoje, dar neapkrovus elemento (pavaizduota 3.28 pav., raudona linija žymi pjūvį virš įtemptų lynų zonos, kad pleišėjimas aplink lynus nedarytų įtakos rezultatams).



3.28 pav. Vidutiniai plyšių pločiai po 1250 MPa įtemptos armatūros atleidimo

3.4. Iš anksto įtemptos armatūros įtempių įtakos laikomajai galiai analizė

Parametrinės analizės metu buvo nustatyta, kokias reikšmes įgaunant įvairiems parametrams, iš anksto įtempta armatūra daro didžiausią įtaką laikomosios galios mažėjimui. Pagal gautus rezultatus skaitinis modelis yra koreguojamas taip, kad poveikis nuo apspaudimo sukeltos tempiamosios jėgos įpjovos kampe, būtų didesnis. Kadangi naudojama iš anksto įtempta armatūra, priimama, kad esamo bandinio betono stiprio (33,7 MPa) mažinti nereikia. Padidinus įpjovos aukštį buvo užfiksuotas laikomosios galios pamažėjimas, tačiau tam, kad modelis geriau atitiktų realią konstrukciją, įpjova nedidinama. Taigi, modelyje yra keičiama atramos pridėties vieta, perkeliant ją kuo arčiau įpjovos krašto, ir 80 % sumažinamas skersinės armatūros kiekis. Modifikuotas sijos modelis pavaizduotas 3.29 pav.



3.29 pav. Modifikuotas skaitinis modelis

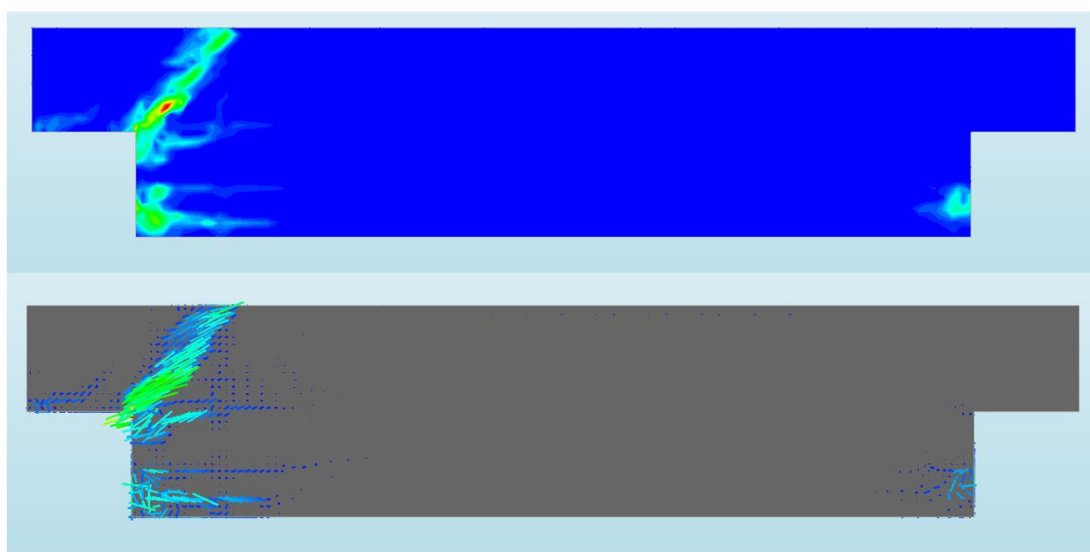
Atlikus netiesinę analizę nustatyta, kad skaitiniame modelyje įvedus įvardytas korekcijas, suirimas vyksta įstrižame pjūvyje, prasidedančiame nuo vidinio įpjovos kampo (žr. 3.30 pav.).



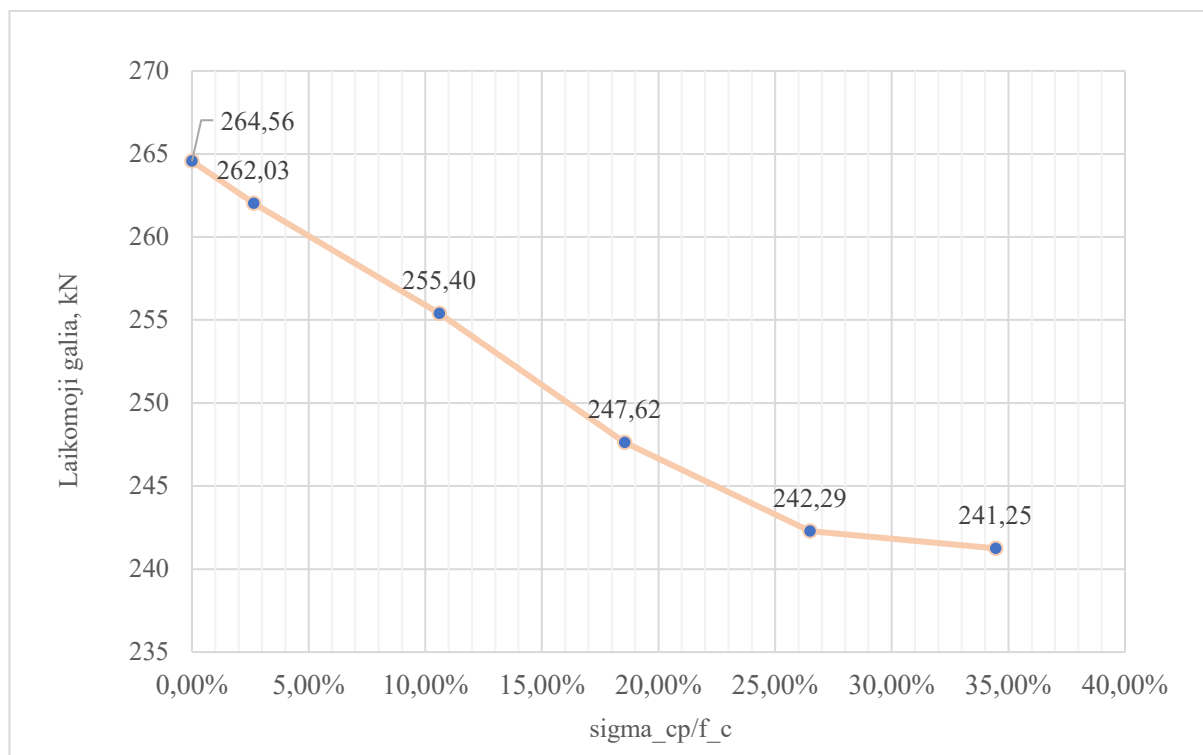
3.30 pav. Modifikuoto modelio deformacijos ir pleišėjimas

Maksimali pasiekta apkrova suirimo metu $F = 328,37 \text{ kN}$. Vadinasi, skersinė laikomoji galia $V = F \cdot \frac{1700}{2110} = 328,37 \cdot \frac{1700}{2110} = 264,56 \text{ kN}$.

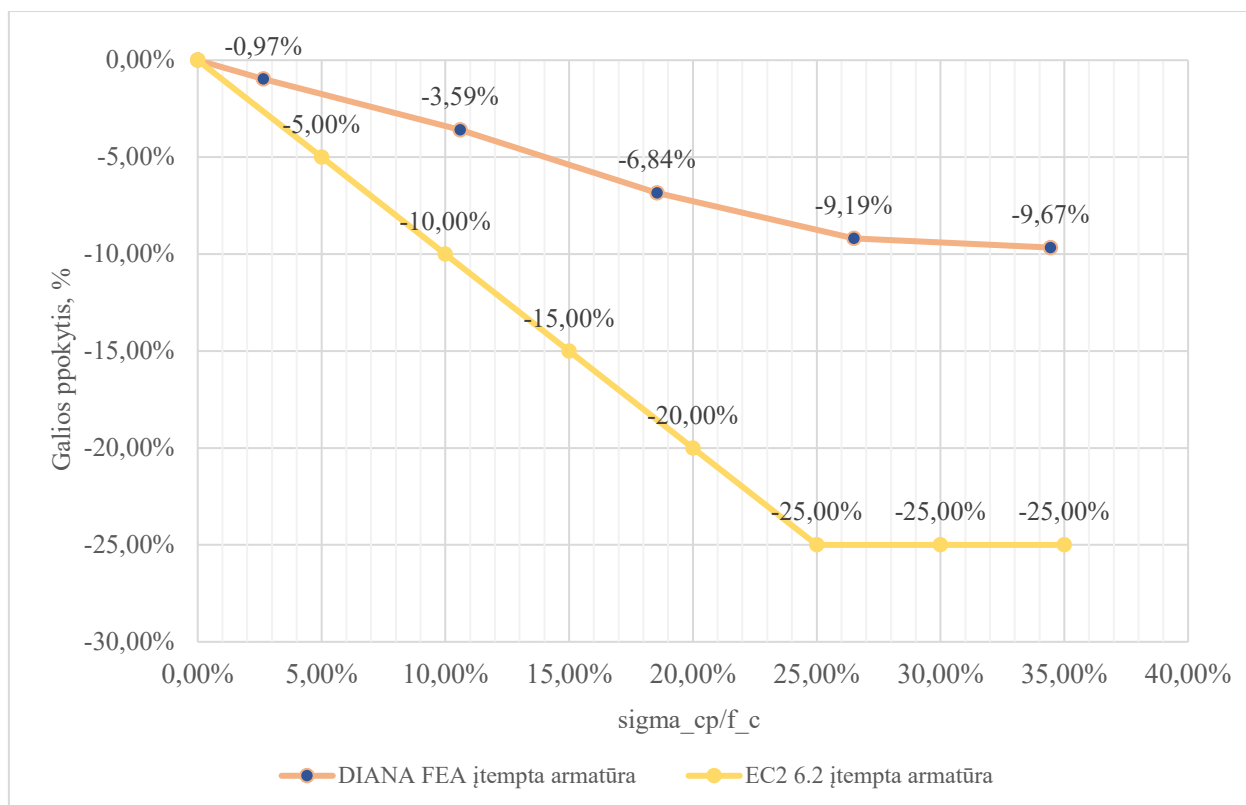
Atlikta analizė lynus įtempiant skirtingu intensyvumu: 100 MPa, 400 MPa, 700 MPa, 1000 MPa ir 1300 MPa. Gauti rezultatai pateikiami per laikomosios galios ir skerspįjūvio apspaudimo santykį σ_{cp} / f_c 3.32 ir 3.33 paveiksluose. Sijos su įtempta armatūra tipinės deformacijos ir pleišėjimas pavaizduoti 3.30 pav.



3.31 pav. Modifikuoto modelio deformacijos ir pleišėjimas armatūrą įtempus 1000 MPa



3.32 pav. Laikomosios galios priklausomybė nuo σ_{cp} / f_c santykio

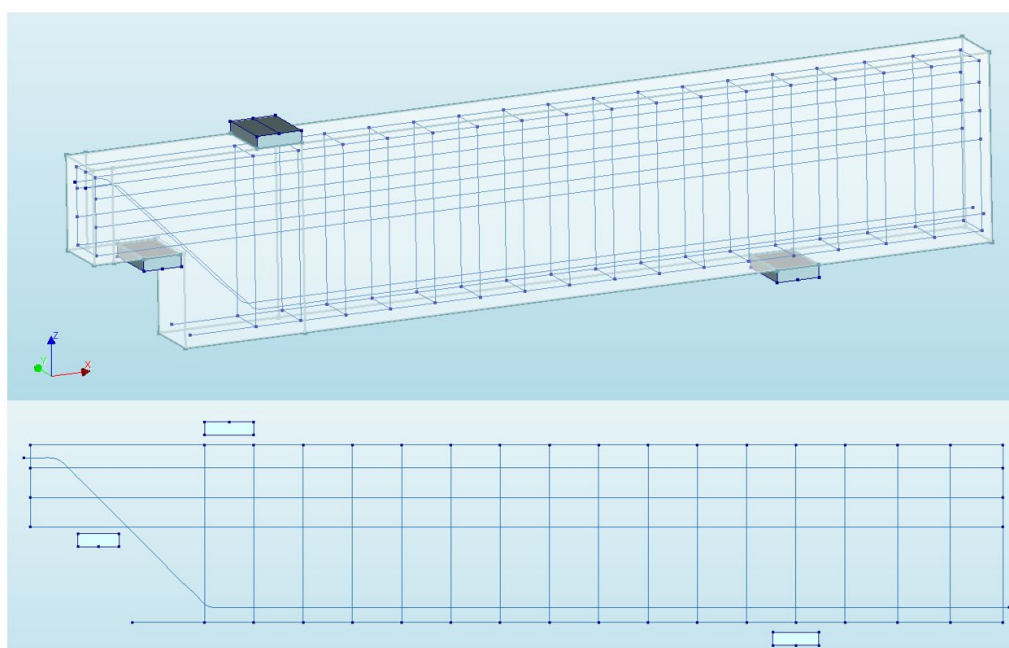


3.33 pav. Laikomosios galios pokyčio priklausomybė nuo σ_{cp} / f_c santykio

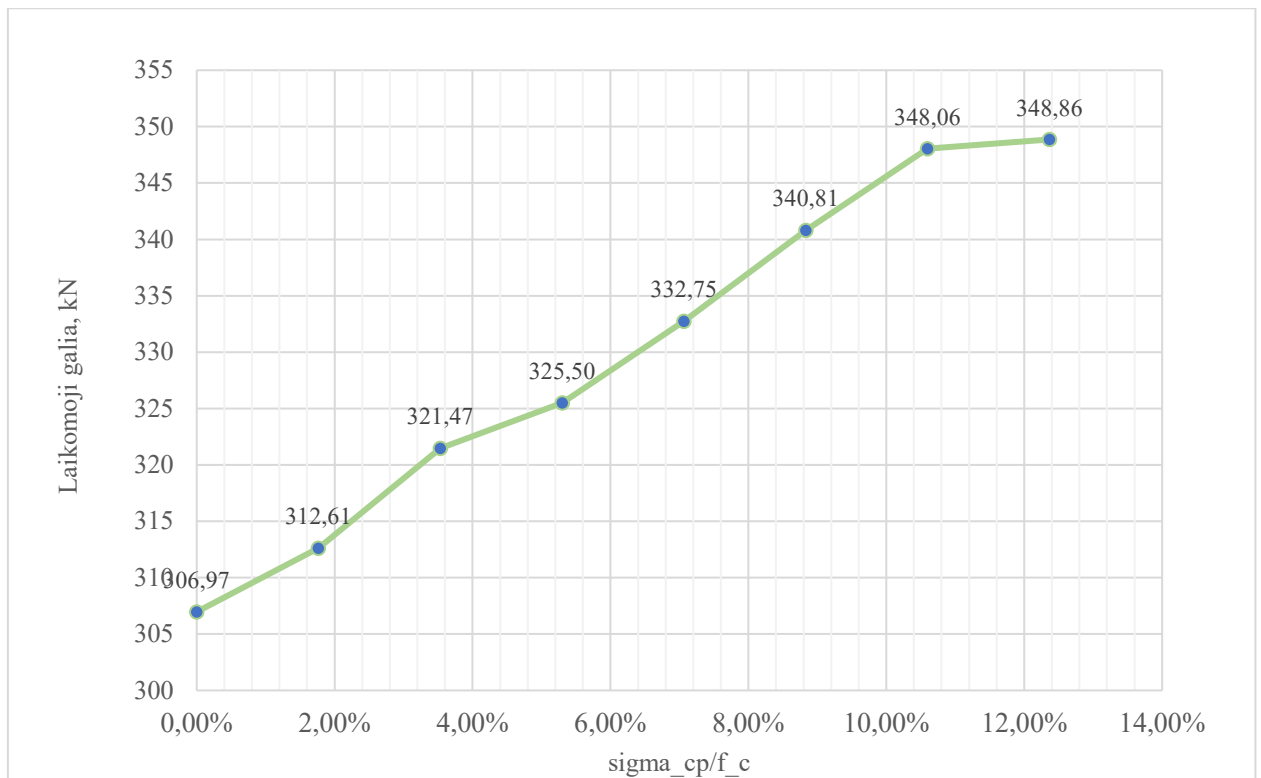
Nustatyta, kad pasikeitus mazgo suirimo pobūdžiui, armatūros įtempimo poveikis laikomajai galiai ženkliai padidėja. Galios mažėjimas iki 26,50 % σ_{cp} / f_c vyksta pagal beveik tiesinę priklausomybę ir, pasiekus atitinkamą σ_{cp} / f_c santykio reikšmę, apspaudimo įtaka sumažėja. Toliau laikomoji galia mažėja nežymiai. Tokia elgsena dalinai atitinka EC2 6.2 poskyrio skaičiavimų priklausomybę, kadangi matomas atvirkščiai proporcingas laikomosios galios mažėjimas σ_{cp} / f_c santykio didėjimui ir, pasiekus 25 % reikšmę, laikomoji galia nebekinta. Taigi, galima teigti, kad iš anksto įtemptos armatūros apspaudimo jėgos įtaka laikomosios galios mažėjimui priklauso nuo suirimo pobūdžio ir įtempimo intensyvumo. Esant tokiam pobūdžiui, kaip šiame poskyryje pavaizduota, galia gali sumažėti iki apytiksliai 10 %.

3.5. Iš anksto įtemptos armatūros išdėstymo įtakos laikomajai galiai analizė

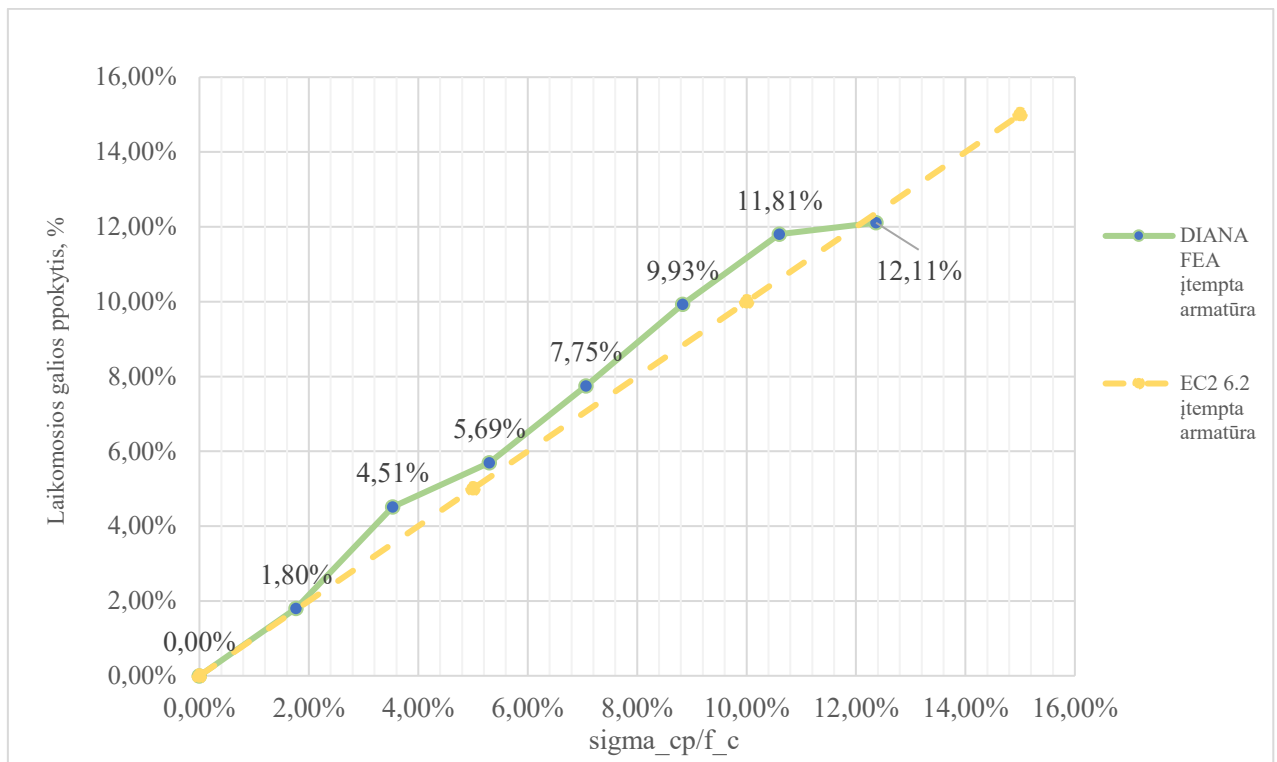
Iš anksto įtemptą armatūrą išdėstant taip, kad apspaudimo jėga apgniuždo įpjovos kraštą, sijos pratęstajame gale sukeliama pavojingi tempiamieji įtempiai. Vis dėlto, jeigu įtempta armatūra pratęsiama iki sijos galo, tada apspaudimas skerspjuvyje sukelia tik gniuždomuosius įtempius ir įstrižojo pjūvio galia didėja. Norint ištirti šio poveikio intensyvumą, 3.4 poskyryje aprašytas modifikuotasis skaitinis modelis buvo koreguojamas panaikinant šešis horizontaliai išdėstytus įtemptos armatūros lynus, skersinę armatūrą prie įpjovos krašto ir dešiniąją įpjovą. Modelyje įvedami du 15,7 mm lynai, 45 laipsnių kampu pratęsti iki sijos galo (įtemptos armatūros savybės nurodytos 3.5 lentelėje). Skaitinis modelis pavaizduotas 3.34 pav., o rezultatai 3.35 ir 3.36 pav.



3.34 pav. Skaitinis modelis su įstriža įtempta armatūra



3.35 pav. Laikomosios galios priklausomybė nuo σ_{cp} / f_c santykio



3.36 pav. Laikomosios galios pokyčio priklausomybė nuo σ_{cp} / f_c santykio

Atlikus analizę nustatyta, kad įstrižojo pjūvio galia tiesiogiai proporcingai didėja nuo σ_{cp} / f_c santykio. Galios didėjimo riba priklauso nuo suirimo pobūdžio pasikeitimo. 3.37 pav. pavaizduotas palyginimas tarp neįtempto elemento suirimo ir įtempto iki 12,37 % σ_{cp} / f_c . Matoma, kad įtempus armatūrą, suirimas pasireiškia dominuojančiomis deformacijomis nuo

lenkimo. Vadinasi, dėl skerspjūvio apgniuždymo nuo išankstinio įtempimo, įstrižo pjūvio galia padidėja iki tokios reikšmės, kad lenkiamoji galia lieka silpniausiuoju komponentu.



3.37 pav. Suirimas neįtempus armatūros (viršuje) ir įtempus (apačioje)

Jeigu palyginti EC2 6.2 kreivę su skaitinio modelio rezultatais, tai, galima pastebėti, kad galios padidėjimas glaudžiai atitinka EC2 priklausomybę iki kol suirimo pobūdis pasikeičia.

Skyriaus išvados:

1. Atliekant skaitinę analizę, galima pakankamai tiksliai nustatyti sijos su įpjova laikomąją galią ir įlinkį.
2. Siją su įpjova saugiausia projektuoti naudojant EC2 STM metodą, o šiek tiek mažiau konservatyvus yra PCI metodas. Šiais metodais apskaičiuota laikomoji galia yra mažesnė už eksperimentinę, o skaitinio modelio laikomąją galią viršija tik esant dideliame skersiniame armavime (EC2 STM atveju) ir esant mažam betono stipriui (PCI atveju). Wango ir kt. metodo rezultatai su eksperimentiniais rezultatais ir skaitiniu modeliu koreliuoja geriausiai. EC2 6.2 poskyrio laikomosios galios skaičiavimai dažniais atvejais pervertina laikomąją galią, todėl nerekomenduojama šio metodo naudoti mazgo su įpjova projektavimui.
3. Kai įtempta armatūra apspaudžia įpjovos kraštą, sukeliama tempiamieji įtempiai ženkliai sumažina įpjovos vidinio kampo atsparumą pleišėjimui. Šio poveikio intensyvumas priklauso nuo armatūros įtempimo intensyvumo. Esant dideliame armatūros įtempimui, plyšiai susidaro įtemptos armatūros atleidimo stadijoje.

4. Kai įtempta armatūra apspaudžia įpjovos kraštą, sukeliama tempiamieji įtempiai sumažina mazgo su įpjova laikomąją galią. Šio poveikio intensyvumas priklauso nuo sijos suirimo pobūdžio ir armatūros įtempimo intensyvumo. Stipriausias efektas užfiksuotas mažėjant skersiniam armavimui, betono stipriui, atramos atstumui nuo įpjovos krašto ir didėjant įpjovos aukščiui.
5. Kai įtempta armatūra apspaudžia sijos galą, sukeliama gniuždomieji įtempiai didina mazgo su įpjova laikomąją galią. Šio poveikio intensyvumas priklauso nuo sijos suirimo pobūdžio ir armatūros įtempimo intensyvumo.

BENDROSIOS DARBO IŠVADOS

1. Elementai, turintys įpjovas atraminiuose mazguose, dažniausiai suyra dėl šlyties jėgų atraminio mazgo zonoje, nes tai yra pavojingiausias elemento ruožas dėl didelės įtempių koncentracijos aplink įpjovą.
2. Pagerinti elemento su įpjova elgseną eksploatacijos metu ir padidinti maksimalią laikomąją galią galima naudojant įtemptąją armatūrą, daugiau nei pusė įtemptos armatūros pratęsiant iki sijos galo.
3. Metodai, skirti skaičiuoti sijų atraminius mazgus su įpjovomis, daugelyje skirtingų mazgo konfigūracijų yra konservatyvesni nei EC2 įstrižoji pjūvio laikomosios galios skaičiavimo metodas.
4. Didžiausią įtaką mazgo su įpjova laikomajai galiai daro skersinės armatūros kiekis ir įpjovos aukštis, o mažiausią – betono stipris.
5. Atliekant skaitinę analizę, galima pakankamai tiksliai nustatyti sijos su įpjova laikomąją galią ir įlinkį.
6. Siją su įpjova saugiausia projektuoti naudojant EC2 STM metodą, o šiek tiek mažiau konservatyvus yra PCI metodas. Šiais metodais apskaičiuota laikomoji galia yra mažesnė už eksperimentinę, o skaitinio modelio laikomąją galią viršija tik esant dideliame skersiniam armavimui (EC2 STM atveju) ir esant mažam betono stipriui (PCI atveju). Wango ir kt. metodo rezultatai su eksperimentiniais rezultatais ir skaitiniu modeliu koreliuoja geriausiai. EC2 6.2 poskyrio laikomosios galios skaičiavimai dažniais atvejais pervertina laikomąją galią, todėl nerekomenduojama šio metodo naudoti mazgo su įpjova projektavimui.
7. Kai įtempta armatūra apspaudžia įpjovos kraštą, sukeliama tempiamieji įtempiai ženkliai sumažina įpjovos vidinio kampo atsparumą pleišėjimui. Šio poveikio intensyvumas priklauso nuo armatūros įtempimo intensyvumo. Esant dideliame armatūros įtempimui, plyšiai susidaro įtemptos armatūros atleidimo stadijoje.
8. Kai įtempta armatūra apspaudžia įpjovos kraštą, sukeliama tempiamieji įtempiai sumažina mazgo su įpjova laikomąją galią. Šio poveikio intensyvumas priklauso nuo sijos suirimo pobūdžio ir armatūros įtempimo intensyvumo. Stipriausias efektas užfiksuotas mažėjant skersiniam armavimui, betono stipriui, atramos atstumui nuo įpjovos krašto ir didėjant įpjovos aukščiui.
9. Kai įtempta armatūra apspaudžia sijos galą, sukeliama gniuždomieji įtempiai didina mazgo su įpjova laikomąją galią. Šio poveikio intensyvumas priklauso nuo sijos suirimo pobūdžio ir armatūros įtempimo intensyvumo.

REKOMENDACIJOS

1. Mazgus su įpjovomis rekomenduojama projektuoti taikant PCI rekomendacijose pateikiamą metodą arba EC2 STM metodą.
2. Laikomosios galios skaičiavimai pagal EC2 6.2 poskyrio rekomendacijas dažniais atvejais pervertina laikomąją galią, todėl nerekomenduojama naudoti šio metodo mazgo su įpjova projektavimui.
3. Jeigu projektuojant sijas su įpjova naudojama iš anksto įtempta armatūra, rekomenduojama didesnę dalį armatūros lynų pratęsti iki sijos galo virš įpjovos.
4. Jeigu galimybės įtemptos armatūros lynus išdėstyti sijos gale virš įpjovos nėra arba jie nepratęsimi dėl kitų priežasčių, tada reikia įvertinti laikomosios galios mažėjimą ir taikyti priemones įpjovos kampo pleišėjimui riboti.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

- ACI Committee 318. (2019). Building code requirements for structural concrete : (ACI 318-19) ; and commentary (ACI 318R-19). Farmington Hills, MI :American Concrete Institute.
- Ahmad, S., Elahi, A., Hafeez, J., Fawad, M., & Ahsan, Z. (2013). Evaluation of the Shear Strength of Dapped Ended Beam. *Life Science Journal*. 10. 1038-1044.
https://www.researchgate.net/publication/289708665_Evaluation_of_the_shear_strength_of_dapped_ended_beam
- Al- Khazraji S.D.M., (2014). Response of Dapped-End Prestressed Concrete Girders to Static and Impact Loads. PhD Thesis, University of Baghdad, Iraq, 219 p.
- Archiexpo.com. (2022). Pujol Precast beam. Prieiga per internetą:
<https://www.archiexpo.com/prod/pujol/product-89366-1447733.html>
- Asso, R. (2020). *Half-joint assessment of concrete bridges: strut and tie model development and Fem validation* (thesis). Politecnico di Torino, Torino.
<https://webthesis.biblio.polito.it/16205/>
- Aswin, M., Mohammed, B. S., Liew, M. S., & Syed, Z. I. (2015). Root cause of reinforced concrete dapped-end beams failure. 10. 42927-42933.
http://www.lifesciencesite.com/ljs/life1003/151_19865life1003_1038_1044.pdf
- Aswin, M., Mohammed, B. S., Liew, M. S., & Syed, Z. I. (2015). Shear failure of RC dapped-end beams. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015, 1–11.
<https://doi.org/10.1155/2015/309135>
- Bastian, D. (2017). Klasifikasi Jembatan. Prieiga per internetą:
<https://www.sarjanasipil.my.id/2017/04/klasifikasi-jembatan.html>
- Botros, A. W., Klein, G. J., Lucier, G. W., Rizkalla, S. H., & Zia, P. (2017). Dapped ends of prestressed concrete thin-stemmed members: Part 1, experimental testing and behavior. *PCI Journal*, 62(2). <https://doi.org/10.15554/pcij62.2-05>
- Brinkley F., M., (2013). Behavior of Prestressed, Precast Concrete Thin-Stemmed Members with Dapped Ends. M.Sc. thesis, North Carolina State University, USA. 224 p.
- Conceptual Design for a Precast Concrete Hotel in Iraq. (2010). WEi International Consultants. Prieiga per internetą: <https://www.we-inter.com/Conceptual-Design-for-a-Precast-Concrete-Hotel-in-Iraq.aspx>
- Desnerck, P., Lees, J. M., & Morley, C. T. (2016). Impact of the reinforcement layout on the load capacity of reinforced concrete half-joints. *Engineering Structures*, 127, 227–239.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.08.061>
- Desnerck, P., Lees, J. M., & Morley, C. T. (2018). Strut-and-tie models for deteriorated reinforced concrete half-joints. *Engineering Structures*, 161, 41–54.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.01.013>
- DIANA FEA BV. (2015). Compressive Behavior. Prieiga per internetą:
<https://manuals.dianafea.com/d100/MatLib/node328.html>

- DIANA FEA BV. (2015). Tensile Behavior. Prieiga per internetą: <https://manuals.dianafea.com/d96/MatLib/node84.html>
- Elliott, K. S. (2016). Precast frame analysis. *Precast Concrete Structures*. Chapter 3. <https://doi.org/10.1201/9781315370705>
- fib International Federation for Structural Concrete. (2013). *fib Model Code for Concrete Structures 2010*. Laussane: fib - federation internationale du beton. <https://doi.org/10.1002/9783433604090>
- Gershman, M. R., Federico, J., Jones, C.W. (2022). Municipal Parking Garage. Prieiga per internetą: <https://www.beta-inc.com/project/municipal-parking-garage/>
- Goodchild, C. H., Morrison, J. and Vollum, R. L. (2014). *Strut-and-tie Models: How to design concrete members using strut-and-tie models in accordance with Eurocode 2*. London: MPA The Concrete Centre.
- Hamoudi, A. A., & Phang, M. K. S. (1974). Shear strength of post-tensioned daps in prestressed concrete beams. *Journal of the Structural Division*, 100(12), 2403–2418. <https://doi.org/10.1061/jsdeag.0003946>
- Holly, I. & Abrahoim, I. (2020). Connections and Joints in Precast Concrete Structures. *Slovak Journal of Civil Engineering*. 28. 49-56. <https://doi.org/10.2478/sjce-2020-0007>
- Huang, P.-C. (2000). *Dapped-end strengthening of precast prestressed concrete double tee beams with Frp Composites* (thesis). https://scholarsmine.mst.edu/masters_theses/1916/
- Hussain, H. N., & M. Shakir, Q. (2019). Experimental study of the behavior of reinforced concrete beams with composite dapped end under effect of static and repeated loads. *International Journal of Applied Science*, 2(1). <https://doi.org/10.30560/ijas.v2n1p43>
- Katorisi. (2011). Gerber beam bridge, Kuma village, Japan. Prieiga per internetą: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gerber_beam_Bridge,Kuma_village,Japan.jpg
- Lau, R. (2016). 10 years later: de la Concorde overpass collapse leads to more frequent inspections.. Global News Canada. Prieiga per internetą: <https://globalnews.ca/news/2974887/10-years-later-de-la-concorde-overpass-collapse-leads-to-more-frequent-inspections>
- Liem, S. K. (1983). *Maximum shear strength of dapped-end or corbel*. M.Sc. Thesis, Concordia University, Montreal, Quebec, Canada. <https://spectrum.library.concordia.ca/id/eprint/3649/>
- LST EN 1992-1-1 (2004). Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings.
- Lu, W. Y., Lin, I. J., Hwang, S. J., & Lin, Y. H. (2003). Shear strength of high-strength concrete dapped-end beams. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 26(5), 671–680. <https://doi.org/10.1080/02533839.2003.9670820>
- Mata-Falcón, J., Pallarés, L., & Miguel, P. F. (2019). Proposal and experimental validation of simplified strut-and-tie models on dapped-end beams. *Engineering Structures*, 183, 594–609. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.01.010>

- Mattock, A. H., & Chan, T. C. (1979). Design and behavior of dapped-end beams. *PCI Journal*, 24(6), 28–45. <https://doi.org/10.15554/pcij.11011979.28.45>
- Mattock, A. H., & Theryo, T. S. (1986). Strength of precast prestressed concrete members with dapped ends. *PCI Journal*, 31(5), 58–75. <https://doi.org/10.15554/pcij.09011986.58.75>
- Mitchell, D., Cook, W.D., and Peng, T. (2010). Example 14: Importance of Reinforcement Detailing. *SP-273: Further Examples for the Design of Structural Concrete with Strut-and-Tie Models*, 237-252.
https://www.concrete.org/store/productdetail.aspx?ItemID=SP273&Language=English&Units=US_Units
- Mohammed, B. S., Aswin, M., Liew, M. S., & Zawawi, N. A. (2019). Structural performance of RC and R-ECC dapped-end beams based on the role of hanger or diagonal reinforcements combined by ECC. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 13(1). <https://doi.org/10.1186/s40069-019-0356-x>
- Moreno-Martínez, J. Y., & Meli, R. (2014). Experimental study on the structural behavior of concrete dapped-end beams. *Engineering Structures*, 75, 152–163. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.05.051>
- Moreno-Martínez, J. Y., & Meli, R. (2014). Experimental study on the structural behavior of concrete dapped-end beams. *Engineering Structures*, 75, 152–163. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.05.051>
- Nanni, A., & Huang, P.-C. (2002). Validation of an alternative reinforcing detail for the dapped ends of prestressed double tees. *PCI Journal*, 47(1), 38–49. <https://doi.org/10.15554/pcij.01012002.38.49>
- Precast Thailand. (2019). Precast Thailand. Prieiga per internetą: <https://www.facebook.com/Precastthailand/posts/357539461610368/>
- Sanders, D. H. (2002). Example 2: Dapped-End T-beam Supported by an Inverted T-beam. *SP-208: Examples for the Design of Structural Concrete with Strut-and-Tie Models*, 91–103. <https://doi.org/10.14359/12414>
- Shah, A., Haq, E., & Khan, S. (2011). Analysis and design of disturbed regions in concrete structures. *Procedia Engineering*, 14, 3317–3324. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.419>
- Shakir, Q. M. (2018). Reinforced concrete dapped end beams – state of the art. *International Journal of Applied Science*, 1(2). <https://doi.org/10.30560/ijas.v1n2p44>
- Shakir, Q. M. (2020). A review on structural behavior, analysis and design of RC Dapped End Beams. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 978(1), 012003. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/978/1/012003>
- Shakir, Q. M., Abd, B. B., & Jasim, A. T. (2018). Experimental and numerical investigation of self compacting reinforced concrete dapped end beams strengthened with CFRP sheets. *Journal of University of Babylon for Engineering Sciences*, 26(7), 16–35. <https://doi.org/10.29196/jubes.v26i7.1482>

- Taher, S. E.-D. (2005). Strengthening of critically designed girders with Dapped Ends. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings*, 158(2), 141–152. <https://doi.org/10.1680/stbu.2005.158.2.141>
- Valivonis, J., Jonaitis, B., Zavalis, R., Skuturna, T., & Šneideris, A. (2014). Flexural capacity and stiffness of monolithic biaxial hollow slabs. *JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING AND MANAGEMENT*, 20(5), 693–701. <https://doi.org/10.3846/13923730.2014.917122>
- Wang, Q., Guo, Z., & Hoogenboom, P. C. J. (2005). Experimental investigation on the shear capacity of RC dapped end beams and design recommendations. *Structural Engineering and Mechanics*, 21(2), 221–235. <https://doi.org/10.12989/sem.2005.21.2.221>
- Werner, M. P., and Dilger, W. H. (1973). Shear design of prestressed concrete stepped beams. *PCI Journal*, 18(4), 37–49. <https://doi.org/10.15554/pcij.07011973.37.49>
- Wilden, H., & Precast/Prestressed Concrete Institute. (2010). *PCI Design Handbook: Precast and prestressed concrete 7th Edition*. Chicago: Precast/Prestressed Concrete Institute.