



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

STATYBOS FAKULTETAS

METALINIŲ IR MEDINIŲ KONSTRUKCIJŲ KATEDRA

Mantas Tankūnas

**GNIUŽDOMO BETONO ĮTEMPIŲ DIAGRAMOS FORMOS ĮTAKOS
KOMPOZICINĖS PLOKŠTĖS LENKIAMAJAI GALIAI TYRIMAS**

**THE RESEARCH OF INFLUENCE OF THE STRESS DIAGRAM FORM OF
COMPRESSIVE CONCRETE TO COMPOSITE PLATE BENDING POWER**

Baigiamasis magistro darbas

Statinių konstrukcijų studijų programa, valstybinis kodas 621H21001

Lengvųjų šiuolaikinių konstrukcijų specializacija

Statybos inžinerijos 02T mokslo kryptis

Mantas Tankūnas
2014 m. gegužės mėn.

Vilnius, 2014

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

STATYBOS FAKULTETAS

METALINIŲ IR MEDINIŲ KONSTRUKCIJŲ KATEDRA

TVIRTINU

Katedros vedėjas

(Parašas)

Antanas Šapalas

(Vardas, pavardė)

(Data)

Mantas Tankūnas

**GNIUŽDOMO BETONO ĮTEMPIŲ DIAGRAMOS FORMOS ĮTAKOS
KOMPOZICINĖS PLOKŠTĖS LENKIAMAJAI GALIAI TYRIMAS**

**THE RESEARCH OF INFLUENCE OF THE STRESS DIAGRAM FORM OF
COMPRESSIVE CONCRETE TO COMPOSITE PLATE BENDING POWER**

Baigiamasis magistro darbas

Statinių konstrukcijų studijų programa, valstybinis kodas 621H21001

Lengvųjų šiuolaikinių konstrukcijų specializacija

Statybos inžinerijos studijų kryptis 02T

Vadovas

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Lietuvių kalbos konsultantas

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Vilnius, 2014

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
STATYBOS FAKULTETAS
METALINIŲ IR MEDINIŲ KONSTRUKCIJŲ KATEDRA

Statybos inžinerija.

studijų kryptis

Statinių konstrukcijų studijų programa.

valstybinis kodas 621H21001

Lengvosios šiuolaikinės konstrukcijos

specializacija

TVIRTINU

Katedros vedėjas

(Parašas)

Antanas Šapalas

(Vardas, pavardė)

2014 01 20

(Data)

BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO
UŽDUOTIS

.....Nr.

Vilnius

Studentui (ei)Mantui TANKŪNUI.....
(Vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema: Gniuždomo betono įtempių diagramos formos įtakos kompozicinės plokštės lenkiamajai galiai tyrimas.....

patvirtinta 2013 m. lapkričio 7 d. dekanų potvarkiu Nr. 575 st

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2014 m.06.10..... d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

1. Atlikti literatūros apžvalgą nagrinėta tema;
2. Atlikti analitinio skaičiavimo analizę bei pateikti ir palyginti gautus skaičiavimo rezultatus;
3. Remiantis galiojančiais standartais palyginti skirtingas skaičiavimo metodikas bei atlikti lyginamąją modelių analizę.
4. Gautų rezultatų palyginimas su baigtinių elementų programos pateiktais rezultatais. Gautų rezultatų analizė.

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai:

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

Vadovas

(Paraša)

.....dr. Konstantin RASIULIS.....

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

Užduotį gavau

(Parašas)

Antanas Šapalas

(Vardas, pavardė)

2014-06-10

(Data)

Vilniaus Gedimino technikos universiteto egzaminų
sesijų ir baigiamųjų darbų rengimo bei gynimo
organizavimo tvarkos aprašo 2011–2012 m. m.
2 priedas

(Baigiamojo darbo sąžiningumo deklaracijos forma)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Mantas Tankūnas, 20120196

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

Statybos fakultetas

(Fakultetas)

Statinių konstrukcijos, LŠKfm-12

(Studijų programa, akademinė grupė)

BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO)
SĄŽININGUMO DEKLARACIJA

2014 m. birželio 4 d.
(Data)

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas (projektas) tema Gedimino technikos universiteto statinių konstrukcijos, LŠKfm-12

patvirtintas 20 13 m. birželio 04 d. dekanų potvarkiu Nr. 5755T, yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe (projekte) pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Prenkant ir įvertinant medžiagą bei rengiant baigiamąjį darbą (projektą), mane konsultavo mokslininkai ir specialistai: _____

Mano darbo (projekto) vadovas dr. Konstantin Karulis

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

(Parašas)

(Vardas ir pavardė)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Statybos fakultetas
Metalinių ir medinių konstrukcijų katedra

ISBN ISSN
Egz. sk.
Data 2014-06-10

Statinių konstrukcijų studijų **Statinių konstrukcijų** programos baigiamasis magistro darbas
Pavadinimas **Gniuždomo betono įtempių diagramos formos įtakos kompozicinės plokštės lenkiamajai galiai tyrimas**
Autorius **Mantas Tankūnas**
Vadovas **dr. Konstantin Rasiulis**

Kalba
☒ lietuvių
☐ užsienio

Anotacija

Baigiamajame magistro darbe apžvelgiamas gniuždomo betono įtempių diagramos formos įtakos kompozicinės plokštės lenkiamajai galiai tyrimas, sluoksniuotųjų konstrukcijų tipai bei projektavimo metodai. Nagrinėjamas kompozitinės perdangos plokštės laikomosios galios skaičiavimas pagal Eurokodą 4 ir siūlomą ZI metodą. Pateikiamos ZI metodo formulės bei panaudojimas. Atliekamas kompozitinės perdangos plokštės skaitinis modeliavimas baigtinių elementų programa "SOFiSTiK". Analitiniai bei skaitinio modeliavimo rezultatai lyginami tarpusavyje, pateikiamos išvados ir siūlymai. Darbą sudaro 7 dalys: įvadas, sluoksniuotųjų konstrukcijų literatūros apžvalga, sijų stiprumo statmename pjūvyje apskaičiavimas pagal kreivinę euronormų gniuždomo betono įtempių diagramą, kompozitinių plokščių lenkiamosios galios nustatymas EC bei ZI metodais, skaitinis modeliavimas, išvados, literatūros sąrašas. Darbo apimtis – 69 p. teksto be priedų, 43 iliustr., 15 lent., 33 bibliografiniai šaltiniai. Atskirai pridedami darbo priedai.

Prasminiai žodžiai: Kompozitinė perdangos plokštė, Eurokodas 4, lenkiamosios galios skaičiavimas, ZI metodas.

Vilnius Gediminas Technical University
Faculty of Civil Engineering
Department of Steel and Timber Structures

ISBN ISSN
Egz. sk.
Data 10-06-2014

Master Degree Studies **Structural Engineering** study programme Master Graduation Thesis
Title **The research of influence of the stress diagram form of compressive concrete to composite plate bending power**

Author **Mantas Tankūnas**

Academic supervisor **Dr Konstantin Rasiulis**

Thesis language

Lithuanian

☒ English

Annotation

The master thesis gives an overview of the influence of the stress diagram form of compressive concrete to composite plate bending power, sandwich construction types and design techniques. Overlooking composite slab bending power design by Eurocode 4 and ZI method. Presented ZI method and formulas. Carrying out composite slab analysis by finite element software "SOFiSTiK". Results are comparing, giving conclusions and advices. Master thesis consists of seven parts: introduction, literature review of composite structures, influence of the stress diagram form of compressive concrete to concrete beam, composite slab bending power calculations by EC and ZI methods, finite element modeling of the composite slab, conclusion and references. Pages - 69 p. text, 43 figures, 15 tables, 33 bibliographic sources. Appendixes.

Keywords: Composite slab, Eurocode 4, bending Power calculation, method ZI.

Turinys

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS	8
LENTELIŲ SĄRAŠAS.....	10
IVADAS	11
1. SLUOKSNIUOTŲJŲ KONSTRUKCIJŲ ESMĖ, JŲ NAUDOJIMO SRITYS, PRIVALUMAI IR TRŪKUMAI.....	14
1.1. Lengvųjų sluoksniuotųjų konstrukcijų tipai ir klasifikacija	16
1.2. Skirtingų sluoksnių paskirtis	18
1.3. Medžiagos ir dirbiniai sluoksniuotųjų konstrukcijų gamybai	20
1.3.1. Medžiagų ir dirbinių paskirtis	20
1.3.2. Medžiagos ir dirbiniai išoriniams sluoksniams	21
1.4. Sluoksniuotųjų konstrukcijų elgsenos ypatumai	22
1.4.1. Sąveika tarp sluoksnių.....	22
1.4.2. Jungčių įtaka bendram sluoksnių darbui	25
1.4.3. Kompozitinės perdangos pleišėjimas	31
2. SIJŲ STIPRUMO STATMENAMŲ PJŪVYJE APSKAIČIAVIMAS PAGAL KREIVINĘ EURONORMŲ GNIUŽDOMO BETONO ĮTEMPIŲ DIAGRAMĄ	32
2.1. Pagrindinės geometrinės ir pusiausvyros lygtys	32
2.1.1. Metodo analizė	33
2.2. Skaičiavimo pavyzdžiai.....	37
2.3. Lyginamoji analizė	43
3. KOMPOZITINIŲ PLOKŠČIŲ LENKIAMOSIOS GALIOS NUSTATYMAS EC BEI ŽI METODAIS.....	46
3.1. Skaičiavimas pagal EC 1994-1-1	46
3.2. Skaičiavimas pagal kreivinę betono diagramą (ŽI metodas)	48
3.3. Skaičiavimo rezultatų palyginimas	49
4. SKAITINIS MODELIAVIMAS	56
4.1. Skaičiuojamojo modelio sudarymas.....	56
4.2. Betono savybės.....	58
4.3. Metalinio pakloto savybės.....	59
4.4. Lenkiamos kompozicinės perdangos plokštės analizė	59
4.5. Analizė veikiant 25 % maksimalaus atlaikomo momento	60
4.6. Analizė veikiant 50 % maksimalaus atlaikomo momento	61
4.7. Analizė veikiant 75 % maksimalaus atlaikomo momento	62
4.8. Analizė veikiant 100 % maksimalaus atlaikomo momento	63
4.9. Skaičiavimo rezultatų analizė.....	65
IŠVADOS.....	66
LITERATŪRA	67
A PRIEDAS	
B PRIEDAS	

Paveikslų sąrašas

1.1 pav. Normalinių (σ) ir šlyties (τ) įtempių pasiskirstymas skerspjūvyje (Marčiukaitis, Valivonis 2007).....	19
1.2 pav. Įtempių pasiskirstymas, kai jungtis tarp sluoksnių labai silpna arba jos nėra (a) ir kai jungtis yra stipri bei standi (b) (Marčiukaitis, Valivonis 2007).....	23
1.3 pav. Trisluoksnio lenkiamojo elemento elgsenos schemos (Marčiukaitis, Valivonis 2007)..	26
1.4 pav. Standžiųjų jungčių įtaka sluoksniuotosios sijos charakteristikoms, kai jungties tarp sluoksnių nėra (a) ir kai yra standžioji jungtis (b) (Marčiukaitis, Valivonis 2007).....	26
1.5 pav. Galimi sluoksniuotosios konstrukcijos suirimo pjūviai (Marčiukaitis, Valivonis 2007).....	27
1.6 pav. Priklausomybė tarp ribinės apkrovos ir horizontalaus pjūvio šlyjamosios laikomosios galios (Marčiukaitis, Valivonis 2007).....	28
1.7 pav. Skirtingos sąveikos tarp sluoksnių įtaka įtempių pasiskirstymui skerspjūvyje: 1 – nėra sąveikos; 2 – dalinė sąveika; 3 – visiška sąveika (Marčiukaitis, Valivonis 2007).....	28
1.8 pav. Pasislinkimo tarp sluoksnių įtaka $m - d$: 1 – pasislinkimo tarp sluoksnių nėra; 2 – jungtis tarp sluoksnių iš dalies standi, $d - \lambda$ linkis (Marčiukaitis, Valivonis 2007).....	29
1.9 pav. Sluoksniuotosios konstrukcijos elgsena, esant standžiai (a) ir iš dalies standžiai (minkštai) (b) jungtims; 1 – jungės deformacija (Marčiukaitis, Valivonis 2007).....	29
2.1 pav. Lenkiamo elemento skerspjūvis ir elementą veikiančios jėgos bei EN-2 reglamentuose pateikiamas betono gniuždomos zonos įtempių stačiakampis pasiskirstymas (Tankūnas <i>et al.</i> 2012).....	32
2.2 pav. Įtempių-deformacijų tarpusavio priklausomybė (Tankūnas <i>et al.</i> 2012).....	33
2.3 pav. Įtempių-deformacijų tarpusavio priklausomybė (Tankūnas <i>et al.</i> 2012).....	34
2.4 pav. Įtempių σ_c santykinų reikšmių $\beta = \sigma_c / f_{cm}$ grafikai (M. Tankūnas <i>et al.</i> 2012).....	35
2.5 pav. Lenkimo momentų rezultatų nesutapimas tarp EN bei ZI metodų, kai armavimo procentas lygus 0,437 %.....	43
2.6 pav. Lenkimo momentų rezultatų nesutapimas tarp EN bei ZI metodų, kai armavimo procentas lygus 1,011 %.....	43
2.7 pav. Lenkimo momentų rezultatų nesutapimas tarp EN bei ZI metodų, kai armavimo procentas lygus 1,596 %.....	44
2.8 pav. Lenkimo momentų rezultatų nesutapimas tarp EN bei ZI metodų, kai armavimo procentas lygus 2,134 %.....	44
3.1 pav. Kompozitinės plokštės skaičiuojamasis skerspjūvis.....	47

3.2 pav. Lenkimo momentai, kai armavimo procentas lygus 755 cm ²	49
3.3 pav. Lenkimo momentai, kai armavimo procentas lygus 955 cm ²	50
3.4 pav. Lenkimo momentai, kai armavimo procentas lygus 1155 cm ²	50
3.5 pav. Lenkimo momentai, kai armavimo procentas lygus 1355 cm ²	51
3.6 pav. Lenkimo momentai, kai armavimo procentas lygus 1555 cm ²	52
3.7 pav. Apskaičiuotas gniuždomo betono zonos aukštis EN ir ZI metodikomis, kai armavimo procentas lygus 755 cm ²	52
3.8 pav. Apskaičiuotas gniuždomo betono zonos aukštis EN ir ZI metodikomis, kai armavimo procentas lygus 955 cm ²	53
3.9 pav. Apskaičiuotas gniuždomo betono zonos aukštis EN ir ZI metodikomis, kai armavimo procentas lygus 1155 cm ²	54
3.10 pav. Apskaičiuotas gniuždomo betono zonos aukštis EN ir ZI metodikomis, kai armavimo procentas lygus 1355 cm ²	55
3.11 pav. Apskaičiuotas gniuždomo betono zonos aukštis EN ir ZI metodikomis, kai armavimo procentas lygus 1555 cm ²	55
4.1 pav. Baigtinių elementų programoje „SOFiSTiK“ sumodeliuotas nagrinėjamas skerspjuvis.....	56
4.2 pav. Modeliuojamo elemento schema: a) kompozitinės perdangos plokštės dalis; b) kompozitinės perdangos plokštės skerspjuvis; c) nagrinėjamos perdangos plokštės dalis priimta skaičiavimams.....	57
4.3 pav. Sumodeliuota visiško standumo perdangos plokštės sąveika tarp betono ir metalinio elemento programoje „SOFiSTiK“	57
4.4 pav. Betono charakteristikų kreivės (SOFiSTiK AG 2013).....	58
4.5 pav. S320 plieno stiprumo charakteristikos kreivė (SOFiSTiK AG 2013).....	59
4.6 pav. Programos „SOFiSTiK“ apskaičiuotas plastinis lenkimo momentas kompozitinei perdangos plokštei.....	60
4.7 pav. Programos „SOFiSTiK“ apskaičiuotas metalinio lakšto išnaudojimo procentas.....	61
4.8 pav. Programos „SOFiSTiK“ pateiktas įtempių pasiskirstymas skerspjuvyje.....	61
4.9 pav. Programos „SOFiSTiK“ apskaičiuotas metalinio lakšto išnaudojimo procentas.....	62
4.10 pav. Programos „SOFiSTiK“ pateiktas įtempių pasiskirstymas skerspjuvyje.....	62
4.11 pav. Programos „SOFiSTiK“ apskaičiuotas metalinio lakšto išnaudojimo procentas.....	63
4.12 pav. Programos „SOFiSTiK“ pateiktas įtempių pasiskirstymas skerspjuvyje.....	63
4.13 pav. Programos „SOFiSTiK“ apskaičiuotas metalinio lakšto išnaudojimo procentas.....	64
4.14 pav. Programos „SOFiSTiK“ pateiktas įtempių pasiskirstymas skerspjuvyje.....	64
4.15 pav. Programos „SOFiSTiK“ gniuždomos zonos aukštis.....	65

Lentelių sąrašas

2.1 lentelė. Betono stiprumo ir deformacinės savybės.....	41
2.2 lentelė. Sijų M_{Rd} stiprumo skaičiavimo ZI ir EN-2 metodais palyginimas.....	42
3.1 lentelė. Lenkimo momentai, kai armavimo procentas lygus 755 cm^2	49
3.2 lentelė. Lenkimo momentai, kai armavimo procentas lygus 955 cm^2	49
3.3 lentelė. Lenkimo momentai, kai armavimo procentas lygus 1155 cm^2	50
3.4 lentelė. Lenkimo momentai, kai armavimo procentas lygus 1355 cm^2	51
3.5 lentelė. Lenkimo momentai, kai armavimo procentas lygus 1555 cm^2	51
3.6 lentelė. Apskaičiuoti skaičiuotiniai betono stipriai bei gniuždomos zonos auktis EN bei ZI metodais, kai armavimo procentas lygus 755 cm^2	52
3.7 lentelė. Apskaičiuoti skaičiuotiniai betono stipriai bei gniuždomos zonos auktis EN bei ZI metodais, kai armavimo procentas lygus 955 cm^2	53
3.8 lentelė. Apskaičiuoti skaičiuotiniai betono stipriai bei gniuždomos zonos auktis EN bei ZI metodais, kai armavimo procentas lygus 1155 cm^2	54
3.9 lentelė. Apskaičiuoti skaičiuotiniai betono stipriai bei gniuždomos zonos auktis EN bei ZI metodais, kai armavimo procentas lygus 1355 cm^2	55
3.10 lentelė. Apskaičiuoti skaičiuotiniai betono stipriai bei gniuždomos zonos auktis EN bei ZI metodais, kai armavimo procentas lygus 1555 cm^2	55
4.1 lentelė. Betono savybės programoje „SOFiSTiK“	58
4.2 lentelė. Betono savybės programoje „SOFiSTiK“	59
4.3 lentelė. Betono gniuždomos zonos aukščio palyginimas.....	65

IVADAS

Vienas iš svarbiausių technikos ir ekonomikos uždavinių yra didinti statybos efektyvumą, todėl daugiausia dėmesio turi būti skiriama naujų statybinių medžiagų ir konstrukcijų kūrimui ir gamybai. Naujos statybinės medžiagos ir konstrukcijos turi pasižymėti geromis fizikinėmis-mechaninėmis savybėmis, turėti kuo mažesnę šiluminę laidį, jos turi būti pagaminamos mažiausiomis žaliavų ir energijos sąnaudomis. Praktika ir tyrimai rodo, kad efektyvias konstrukcijas, atitinkančias šiuolaikinius eksploatacinius reikalavimus, galima sukurti tik optimaliai parinkus ir išdėsčius jas sudarančius komponentus. Efektyviausios yra konstrukcijos, sudarytos iš kelių sluoksnių, kurie vienas nuo kito skiriasi savo savybėmis, t. y. daugiasluoksnės iš įvairių medžiagų sukurtos konstrukcijos. Pavyzdžiui, vienas sluoksnis (stipresnis) perima apkrovas, kitas yra silpnesnis, bet gerai izoliuojantis šilumą, trečiasis apsaugo konstrukciją nuo išorinių poveikių ir pan.

Daugelyje šiuolaikinės technikos sričių (aviacijoje, laivų statyboje ir kt.) efektyviausios konstrukcinės dalys yra kompozitinės – sluoksniuotosios, kurios dirbiniams suteikia norimų eksploatacinių savybių, todėl vis plačiau jos naudojamos ir statyboje. Tai iš įvairių medžiagų pagamintos sluoksniuotosios sienos, denginių plokštės. Ieškoma būdų, kad statybinės konstrukcijos ir dirbiniai būtų ir stiprūs, ir lengvi, ir gerai izoliuotų šilumą. Paprasta betoninė arba gelžbetoninė plokštė šių trijų reikalavimų neatitinka. Ir tik pagaminus ją iš kelių sluoksnių ir tiksliai parinkus konstrukcijos sluoksnių savybes ir storių santykius, galima gauti visas norimas konstrukcijos savybes. Tačiau daugiakomponentės konstrukcijos savybės priklauso ne tik nuo sluoksnių santykio ir jų savybių, bet ir nuo jų tarpusavio sąveikos, išsidėstymo skerspjuvyje, gamybos būdo ir daugelio kitų veiksnių. Kuriant sluoksniuotąją konstrukciją ar dirbinį, būtina iš anksto numatyti, kokios bus jo savybės: masė, stiprumas, deformatyvumas, šiluminis plėtimasis, šiluminis ir garsinis laidis.

Be eksploatacinių reikalavimų, sluoksniuotosios konstrukcijos turi atitikti ir technologiškumo reikalavimus. Reikalavimai, keliami kompozitinėms konstrukcijoms: kiek įmanoma mažesnės darbo ir energijos sąnaudos, galimybė jas pagaminti norimos formos ir savybių, galimybė sujungti jas montuojant. Stiprumo, deformatyvumo, šiluminio laidžio ir kitos savybės yra labai susijusios su sluoksnių sudėtimi ir struktūra. Sudėties ir struktūros pokyčiai turi įtakos savybių pokyčiams. Tik suvokimas dėsningumų, nusakančių vienu ar kitu fizikinių, mechaninių, šiluminių, technologinių ir kitokių savybių buvimą ir jų pokyčius, leidžia racionaliai naudoti statybines medžiagas, kuriant naujas sluoksniuotąsias konstrukcijas ir diegiant jas į gamybą. Juk kompozitų kūrimas – viena iš prioritetinių technikos ir ekonomikos vystymo XXI amžiuje kryptų.

Sluoksniuotoji konstrukcija, arba dirbinys, yra vienas iš trijų kompozitų tipų (dispersiniai, pluoštiniai ir sluoksniuotieji). Žodis *kompozitas* kilęs iš lotynų kalbos žodžio *compositus*, kuris reiškia sujungimą, ryšį, įvairių medžiagų lydinį, dalių visumą. Statybiniais kompozitais laikomi dirbiniai ir konstrukcijos, kurių sudedamosios dalys turi savo apibrėžtą ribą, ir specialistas ją gali kaitalioti pagal poreikius ir gaminio paskirtį.

Į šiuolaikines kompozitines medžiagas ir dirbinius panašiausi gamtos sukurti prototipai yra mediena – celiuliozės pluoštai, suklijuoti ligninu, vilna apaugusi gyvūnų oda ir kiti. Priešistorinis nedegto molio plytų sluoksnių stiprinimas nendrių dembliais davė idėją sukurti vienalytę konstrukciją iš skirtingų medžiagų. Dabartinio stikloplasčio priešistorinis prototipas – egiptiečių nendrių plokštės, įmirkytos bitume. Taigi kompozicinių medžiagų ir konstrukcijų technologijos pradžia siekia antikinius laikus. Sluoksniuotųjų konstrukcijų galima rasti ir Lietuvoje XIV–XVIII a. pastatuose, pvz., rūsijų sienų išorinis sluoksnis iš akmenų, vidinis – iš molio plytų ir kt.

Visa žmonijos civilizacijos raida susijusi su naujų statybinių medžiagų bei konstrukcijų tobulėjimu. Ypač sparčiai kompozicinės medžiagos ir konstrukcijos kuriamos pastaraisiais metais. Atsirado naujų efektyvių medžiagų, kurios tapo svarbiais kompozitų – sluoksniuotųjų konstrukcijų komponentais. Pirmiausia čia reikia paminėti sintetinius polimerus. Į juos pridėjus įvairių organinės ir neorganinės kilmės medžiagų, jau XIX a. pab. ir XX a. pradžioje buvo sukurta naujų kompozicinių medžiagų ir jų kombinacijų. Šiuo metu iš polimerų sukurti įvairūs putplasčiai yra pagrindinė konstrukcijos sluoksnių medžiaga.

Kuriant ir gaminant kompozicines medžiagas, reikėjo ieškoti būdų, kaip efektyviau panaudoti visų kompozitą sudarančių komponentų savybes. Svarbiausia – kaip pagaminti kompozicinę medžiagą ar konstrukciją, pasižyminčią iš anksto numatytomis eksploatacinėmis savybėmis. XIX a. viduryje pradėti daugiakomponenčių medžiagų tyrimai, kuriami skaičiavimo metodai. Kompozitų teorijos pradžia laikomi 1887 m. vokiečių mokslininko J. Foighto paskelbti darbai, kurie yra klasikiniai polikristalų savybių tyrimai. Jis teoriškai ištyrė polikristalų savybes priklausomai nuo atskirų kristalų savybių.

Platesnio ir efektyvesnio lengvųjų sluoksniuotųjų konstrukcijų naudojimo pradžia galima laikyti pirmuosius metus po Antrojo pasaulinio karo ir ypač šeštąjį dešimtmetį, tuo metu kitose technikos srityse pradėta naudoti sumuštinio tipo dirbiniai. Pirmiausia jie pradėti naudoti lėktuvų, kosminių ir vandens laivų statyboje. Kartu tobulėjo ir šių konstrukcijų skaičiavimo teorija, jos praktinio taikymo metodai. Tačiau dar yra daug ką tobulinti skaičiuojant, projektuojant ir gaminant šias efektyviausias statybines konstrukcijas (Marčiukaitis, Valivonis 2007).

Bėgant metams kompozitinė perdangos plokštė su metaliniu profiliu paklotu įrodė, kad vienas paprasčiausių, greičiausių, lengviausių ir ekonomiškiausių statybos būdų, kai pastato karkasą sudaro metalinės laikančios konstrukcijos. Remiantis užsienio šalių patirtimi, galima matyti platų

kompozitinių perdangos plokščių pritaikymą. Ši sistema yra teigiamai vertinama dėl daugelio privalumų parenkant tarpaukštinių denginių (Andrade 2004; Makelainen, Sum 1999). Per paskutinį dešimtmetį statybos pramonė vis labiau stengėsi nežiūrėti jau į atrastas medžiagas bet ieškojo inovatyvių sprendinių, kad būtų patenkinti nauji inžineriniai uždaviniai. Dėl to pradėta naudoti kompozicinę perdangą greta jau esamų sprendimų. Šalto valcavimo plonasieniai metaliniai profiliuoti paklotai su įspaudais ant metalinio pakloto yra plačiai naudojami įrengiant kompozitinės perdangos plokštės .

Darbo problematika

Nagrinėjamas kompozitinis elementas – perdanga sudaryta iš plonasienio metalinio pakloto bei betono sluoksnio. Tai yra palyginti naujas sprendimas Lietuvos mastu, bet labai populiarus užsienio šalyse. Užsienio literatūroje gausu straipsnių bei projektavimo metodikų siekiant populiarinti konstrukciją. Kompozitinė perdanga palyginti naujas sprendimas, todėl užsienio mokslininkai kuria naujas metodikas siekiant perteikti tikrąją kompozito elgseną, kuri priklauso nuo betono savybių, metalinio pakloto savybių bei sankabos tarp elementų.

Kompozitinės konstrukcijos projektuojamos pagal EN 1994-1-1, tačiau veikiančių medžiagų skaičiavimas vykdomas pagal EN 1992-1-1 bei 1993-1-1.

Baigiamajame darbe analizuojama – gniuždomo betono įtempių formos įtaka. Darbe nagrinėjamas siūlomas skaičiavimo metodas – ZI metoas. ZI metodo esmė – skaičiuojama pagal vidutinės gniuždomo betono įėgą. EN 1992-1-1 pateikiama įtempių-deformacijų diagrama, tačiau skaičiavimas pagal ją nėra pateiktas. Tam gali būti naudojamas ZI metodas.

Darbo tikslas

Surinkus literatūrą bei ją išanalizavus pagal darbe pateiktą temą atlikti dviejų skaičiavimo metodų analizę bei gautus skaičiavimo rezultatus palyginti su baigtinių elementų programos skaičiavimais. Pagrindinis šio darbo tikslas – išnagrinėti specifinius skaičiavimo metodų skirtumus bei juos palyginti. Tikslui pasiekti nustatyti tokie uždaviniai:

- Išnagrinėti literatūrą susijusią su nagrinėjama tema;
- Pateikti ZI metodikos skaičiavimo principą;
- Palyginti dviejų skaičiuojamųjų modelių rezultatus;
- Atlikti skaitinius skaičiavimus;
- Palyginti gautus rezultatus;
- Pateikti išvadas, remiantis gautais rezultatais.

1. SLUOKSNIUOTŲJŲ KONSTRUKCIJŲ ESMĖ, JŲ NAUDOJIMO SRITYS, PRIVALUMAI IR TRŪKUMAI

Tobulėjant technikai, vis atsirandant naujoms įvairių savybių medžiagoms, kilo būtinybė kuo geriau išnaudoti visas jų savybes. Remiantis kompozicinių medžiagų kūrimo ir naudojimo patirtimi, buvo pradėtos kurti konstrukcijos iš atskirų sluoksnių. Tokios konstrukcijos įgijo savybių, kurių neturi nė vienas atskirai paimtas sluoksnis, ir jas galima laikyti daugiakomponentėmis sistemomis, sudarytomis iš dviejų ar daugiau komponentų – sluoksnių. Jos įgyja naujų savybių, kurios skiriasi nuo atskirų sluoksnių savybių. Sluoksniai parenkami ir išdėstomi konstrukcijoje, atsižvelgiant į jų paskirtį, gamybos technologiją ir kitus reikalavimus. Parinkus sluoksnius ir juos išdėsčius galima gauti norimo stiprumo, standumo ir šiluminių savybių konstrukciją. Turime betoninę 6 m ilgio siją ir tokio paties ilgio 6 mm storio plieninį lakštą. Sija gali suirti nuo savojo svorio, o lakštas – neleistina išlinkti. Jeigu plieninį lakštą priklijuotume prie betoninės sijos apačios, tai jos aukštis pasikeis nežymiai, o stiprumas ir standumas padidės keleriopai. Apskritai sluoksniuotųjų konstrukcijų privalumų yra įvairiausių ir jas pasirinkti galima, atsižvelgiant į užsakovo ar projektuotojo pageidavimus. Sluoksniuotųjų konstrukcijų privalumai:

- mažesnis svoris ir matmenys, ypač mažesnis storis;
- didesnis stiprumas ir standumas;
- geresnės termoizoliacinės ir akustinės savybės;
- beveik visiškai nelaidumas vandeniui ir drėgmei;
- maksimalus medžiagų savybių panaudojimas atitinkamai išdėstant sluoksnius konstrukcijoje;
- kitų konstrukcijų, ant kurių remiasi arba prie kurių tvirtinamos konstrukcijos su termoizoliaciniais sluoksniais, matmenų ir svorio sumažėjimas;
- konstrukcijų transportavimo ir montavimo išlaidų sumažėjimas.

1893 m. Čikagoje pastatyto aukščiausio pasaulyje pastato pirmųjų aukštų sienų storis buvo 1,8 m dėl sunkių monolitinių perdangų ir kitų aukštų sienų. Anksčiau 1 m² daugiaaukščio pastato sienos svėrė apie 5 000 kN, šiais laikais naudojamos sluoksniuotosios konstrukcijos sveria 10 kartų mažiau. Be to, jų termoizoliacinės savybės yra daug geresnės. Naudojant sluoksniuotąsias konstrukcijas, pastatų denginių svorį galima sumažinti 3–4 kartus. Priklausomai nuo pastato aukštingumo, naudojant lengvasias sluoksniuotąsias konstrukcijas sienoms, denginiams, perdangoms, pamatų apkrovą galima sumažinti 4–10 kartų. Tik naudojant sluoksniuotąsias konstrukcijas galima gauti norimą šiluminę varžą. Visa tai rodo, kad, sluoksniuotųjų konstrukcijų privalumai ir naudojimo sritys yra labai plačios. Jų populiarumas pasaulyje, ir ypač mūsų šalyje,

nuolat didėja. Lengvosios sluoksniuotosios konstrukcijos turi ir kai kurių trūkumų – tai priklauso nuo sluoksnių savybių. Pavyzdžiui, plokščių su plonais išoriniais ir lengvu vidiniu termoizoliaciniu sluoksniu atsparumas ugniai, išsikreivinimas dėl temperatūrų skirtumo tarp sluoksnių yra mažas, didesnės valkšnumo deformacijos ties sutelktosiomis apkrovomis, maža temperatūrinė talpa. Tačiau iki šiol dar nesukurta tokia statybinė konstrukcija, kuri atitiktų visus gamybos, montavimo ir eksploatavimo reikalavimus, keliamus statiniui. Kai kurie sluoksniuotųjų konstrukcijų trūkumai nėra nesumenkina jų privalumų. Tolesnio statybų efektyvumo didinimo galimybės yra susijusios su sluoksniuotųjų konstrukcijų kūrimu ir naudojimu.

Bendrosios lengvųjų sluoksniuotųjų konstrukcijų savybės beveik nesiskiria nuo vienalyčių statybinių konstrukcijų. Jos turi būti projektuojamos ir pagaminamos esant mažiausioms medžiagų ir darbo sąnaudoms, kiek įmanoma mažesnio svorio, atlaikančios visus mechaninius ir aplinkos poveikius (t. y. būti stiprios, standžios), atsparios drėgmei ir šalčio poveikiams, neprarandančios savo formos nuo temperatūros pokyčių ir saulės radiacijos. Greta mechaninio atsparumo, kitos svarbios bendrosios savybės yra: šiluminė varža ir atsparumas gaisrui, nepralaidumas garui ir drėgmei. Tačiau greta bendrųjų savybių, būtinų beveik visoms statybinėms konstrukcijoms, lengvosios sluoksniuotosios konstrukcijos pasižymi ir tam tikrais ypatumais. Šių konstrukcijų savybių ypatumai, skirtingai nuo vienalyčių gaminių, yra konstrukciniai. Esminiai konstrukciniai ypatumai yra tokie:

- naudojamos įvairių tipų ir kilmės medžiagos, kurių fizikinės savybės (temperatūrinės, drėgminės ir traukumo deformacijos) skiriasi. Pavyzdžiui, daugiasluoksnėse plokštėse arba kitose su metaliniais išoriniais sluoksniais ir putų poliuretano vidiniu sluoksniu tamprumo modulių santykis būna didesnis kaip 400. Plokštėse su medinėmis arba metalinėmis standumo briaunomis ir skirtingų medžiagų išoriniais sluoksniais, prijungtais klijuojant ar mechaninėmis jungėmis, atsiranda vidinių įtempių;
- ploni išoriniai sluoksniai (pavyzdžiui, 0,2–0,5 mm storio aliumininiai, plieniniai lakštai ir 8 mm medžio fanera) leidžia sukurti norimo standumo ir stiprumo konstrukciją, atitinkamai išdėstant standumo briaunas per visą vidurinio sluoksnio storį;
- vidiniam izoliaciniam sluoksniui naudojamos medžiagos, pasižyminčios konstrukcinėmis savybėmis (polistirenas, poliuretanas, priklijuojami prie išorinių sluoksnių) ir šilumą izoliuojančiomis savybėmis (stiklas, akmens vata);
- naudojami dirbiniai iš trapių medžiagų: beasbestis šiferis, medžio drožlės, cemento-pjuvenų plokštės, ceretitas ir kt.;
- palyginti maža masė, tenkanti ploto vienetui, neviršijanti 75 kg/m^2 (būna iki 10 kg/m^2).

Šios plokščių sluoksnių savybės ir konstrukciniai ypatumai susiję su veiksniais, turinčiais įtakos lengvųjų konstrukcijų su šilumos sluoksniais laikomajai galiai, standumui ir kitoms

eksploatacinėms savybėms. Projektuojant ir gaminant tokias konstrukcijas reikia įvertinti temperatūrų skirtumą tarp išorinių sluoksnių. Didelis skirtumas sudaro įtempių ir deformacijų būvį konstrukcijoje ir ji išlinksta. Tai sukelia ir skirtingas sluoksnių drėgnis. Drėkstant vienam iš išorinių sluoksnių, konstrukcija taip pat gali išlinkti į drėkstančio (besiplečiančio sluoksnio) pusę. Visa tai sudaro temperatūrinės-drėgmės apkrovas, kurių nereikia įvertinti skaičiuojant vienalytes konstrukcijas. Jei užtikrintas bendras visų sluoksnių darbas, galima gauti norimą laikomąją galia esant nedideliam konstrukcijos svoriui ir įvertinant papildomus poveikius, pradedant nuo temperatūrinių-drėgminių deformacijų. Kadangi lengvųjų sluoksniuotųjų konstrukcijų skerspjūvio aukštis yra nedidelis, o išorinių sluoksnių storis yra mažas ir esant temperatūrinėms-drėgmėms deformacijoms, tai jų deformacijos, veikiant apkrovai, būna didesnės negu vienalyčių tokios pat paskirties konstrukcijų. Daugeliu atvejų lengvasias konstrukcijas reikia parinkti pagal ribinių tinkamumo būvių reikalavimus, kadangi per didelės deformacijos (išlinkiai ir įlinkiai) neigiamai veikia eksploatacines savybes (nesaugumo jausmas, šiluminis ir akustinis diskomfortas). Naudojant išoriniams sluoksniams trapius dirbinius, taip pat esant nedidelei masei arba nedidelių skerspjūvių briaunoms, sumažėja konstrukcijų atsparumas smūginiams poveikiams. Šilumos izoliavimo sluoksniams naudojant organinės kilmės medžiagas (spalio, medžio pjuvenas, durpes ir pan.), nedidelių skerspjūvių dirbinius, jautrius temperatūros, drėgmės pokyčiams, cheminei ar biologinei korozijai, atsiranda sunkumų nustatant tokios konstrukcijos ilgalaikiškumą ir tikrinant eksploatacinių savybių pastovumą. Visa tai būtina įvertinti projektuojant, gaminant ir eksploatuojant lengvasias sluoksniuotąsias konstrukcijas ir dirbinius (Marčiukaitis, Valivonis 2007).

1.1. Lengvųjų sluoksniuotųjų konstrukcijų tipai ir klasifikacija

Lengvųjų sluoksniuotųjų konstrukcijų, kaip ir kitų statybinių konstrukcijų, įvairovė yra labai didelė. Skirtumas toks, kad sluoksniuotosiose konstrukcijose daug geriau panaudojamos medžiagų savybės, šios konstrukcijos yra lengvos ir labiau atitinka naujus šiuolaikinius statybos reikalavimus. Jos yra naudojamos įvairios paskirties pastatų statyboje. Pagal paskirtį statinyje jos skirstomos į:

- atitvarinės save laikančios;
- laikančios;
- mišrios – atitvarinės ir laikančiosias.

Atitvarinės save laikančios lengvosios sluoksniuotosios konstrukcijos dažniausiai yra naudojamos kaip išorinių bei vidinių sienų elementai, tvirtinami prie laikančiųjų konstrukcijų: kolonų, laikančiųjų skersinių sienų ar pan. Pagrindinė jų paskirtis yra užtikrinti reikiamą

temperatūros, drėgmės ir garso izoliacijos režimą patalpose. Lengvosios sluoksniuotosios konstrukcijos kaip laikančiosios naudojamos rečiau, jos skirtos nedidelėmis apkrovomis perimti, todėl daugiausia yra naudojamos pastatų denginiams, vienaaukščių pastatų sienoms su lengvais stogais, pastogių perdangoms ir kt. Šios paskirties konstrukcijų sluoksniai parenkami ir skerspjuvyje išdėstomi taip, kad parinktos medžiagos ir jų mechaninės savybės būtų maksimaliai panaudotos ir galėtų išlaikyti kuo didesnes apkrovas. Mišrios paskirties sluoksniuotosios konstrukcijos naudojamos pirmųjų dviejų tipų paskirčiai. Jos būna kartu ir laikančiosios, ir izoliuojančios atitvarine konstrukcija, jose atitinkamai išdėstant sluoksnius ir juos stiprinančius dirbinius (pvz., standumo briaunos), atsižvelgiant į jų fizikines ir mechanines savybes. Apskritai grynai atitvarinių konstrukcijų nėra. Jos visuomet atlaiko ir tam tikro pobūdžio ir dydžio apkrovas: transportavimo, montavimo, sniego, vėjo, drėgmės ir temperatūros sukeliamus poveikius. Jų stiprumas ir pastovumas tikrinamas skaičiavimais. Konstrukciniu požiūriu lengvosios konstrukcijos skirstomos į konstrukcijas su standžiais ir minkštais vidiniais, plonais ir storais išoriniais sluoksniais. Vidinių sluoksnių standumas parenkamas priklausomai nuo konstrukcijos paskirties ir sluoksnių medžiagų savybių. Beveik visuomet minkštų vidinių sluoksnių paskirtis – šilumos bei garso izoliacija, o konstrukcijos stiprumui ir standumui padidinti naudojamos standumo briaunos arba atitinkamos jungtys tarp sluoksnių. Naudojant standžius vidinius sluoksnius, jų fizikinės ir mechaninės savybės yra įtraukiamos į bendrą elgseną su išorinių sluoksnių savybėmis. Išorinių sluoksnių standumas ir storis taip pat priklauso nuo konstrukcijos paskirties ir jų medžiagų. Konstrukcijas pagal skerspjuvio konstrukcines savybes, vidinių ir išorinių sluoksnių standumą galima suskirstyti į tokius pagrindinius tipus:

I – daugiasluoksnės,

II – su standumo briaunomis,

III – su uždaro (dėžinio) kontūro išoriniais sluoksniais,

IV – su betono tipo išoriniais sluoksniais.

Šiuo metu plačiausiai naudojamos I tipo sluoksniuotosios konstrukcijos – daugiasluoksnės plokštės su plonais lygiais ir profiliuotais išoriniais sluoksniais. Konstrukcijos su profiliuotais išoriniais sluoksniais naudojamos didesnėms apkrovoms perimti ir didesniems tarpatramiams perdengti.

II tipo konstrukcijos plokštės taip pat yra naudojamos didesnėms apkrovoms perimti ir didesniems tarpatramiams perdengti. Be to, jos leidžia vidiniam šilumos izoliavimo sluoksniui naudoti pigesnes ir efektyvesnes medžiagas, taip pat ir birias, o išoriniams sluoksniams – įvairius plonus lakštus. Standumo briaunos taip pat gali būti iš įvairaus profiliuotio ir medžiagų. Ertmė tarp išorinių sluoksnių gali būti visiškai arba nevisiškai užpildyta.

III tipui priklauso konstrukcijos su uždaro kontūro išoriniais sluoksniais. Jie gali būti iš betono, eternito, gaminami ekstruziniu būdu. Vidus užpildomas biriosiomis medžiagomis arba puria mineraline (akmens, stiklo) vata. Jų skerspjūvio forma neleidžia susidaryti šalčio tilteliams. Tarpai tarp dviejų gretimų elementų lengvai užpildomi termoizoliacine medžiaga.

IV tipo konstrukcijos yra gerokai sunkesnės už pirmųjų trijų tipų konstrukcijas, tačiau jos gali atlaikyti didesnes apkrovas. Jos gali būti trijų ir dviejų sluoksnių. Abu sluoksniai arba apatinis sluoksnis daromi kuo plonesni iš betono arba gelžbetonio, o vidinis – iš lengvojo (putų ar pan.) betono. Vidinis sluoksnis gali būti ir iš putplasčių arba mineralinės vatos. Šiuo atveju daromos standumo briaunelės arba kitokie ryšiai (Marčiukaitis, Valivonis 2007).

1.2. Skirtingų sluoksnių paskirtis

Sluoksnių paskirtis priklauso nuo visos konstrukcijos paskirties ir jai keliamų reikalavimų. Pagal lengvųjų sluoksniuotųjų konstrukcijų klasifikaciją sluoksnių paskirtis konstrukcijoje taip pat turi savo ypatumų. Apskritai jie skirstomi į išorinius ir vidinius. Prie vidinių sluoksnių gali būti priskiriamos ir standumo briaunelės. Savė laikančių sluoksniuotųjų konstrukcijų išorinių sluoksnių paskirtis:

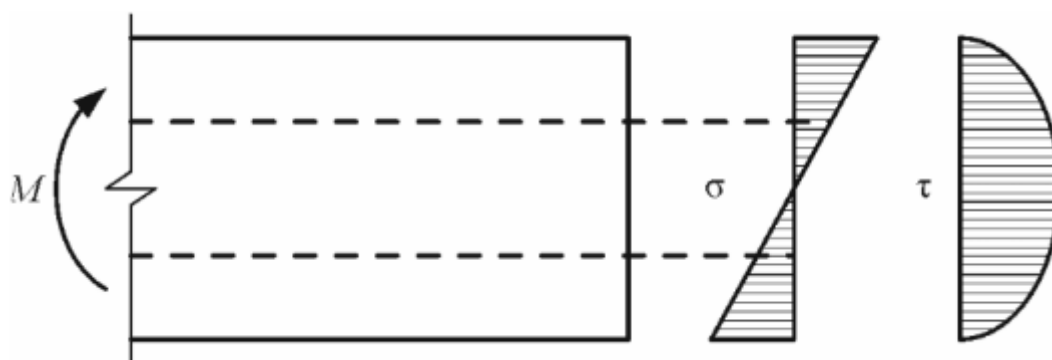
- kartu su vidiniais sluoksniais užtikrinti bendrą konstrukcijos stiprumą, veikiant montažinėms, vėjo, sniego ir kitokioms apkrovoms;
- apsaugoti vidinius šilumos izoliavimo sluoksnius nuo atmosferos poveikių ir drėgmės bei agresyvių medžiagų;
- apsaugoti vidinius mažesnio stiprumo ir standumo sluoksnius nuo išorinių mechaninių poveikių;
- apsaugoti degius vidinius sluoksnius nuo greito ugnies poveikio;
- suteikti statiniui reikiamą architektūrinę ir estetinę išvaizdą.

Išorinių sluoksnių storis ir medžiagos gali būti skirtingi (tai priklauso nuo jų paskirties). Paprastai vienas išorinis sluoksnis būna pastato viduje, kitas – išorėje, todėl ir jų paskirtis skirtinga. Išorinis sluoksnis gali būti ir iš ploniausios plėvelės ar kitokių dangų, kurios galėtų vidinius konstrukcijos sluoksnius ir patalpą apsaugoti nuo tiesioginio lietaus, agresyvių dulkių, dūmų. Šis sluoksnis turi padaryti konstrukciją nelaidžią vandeniui ir įvairiems teršalams, patenkantiems iš lauko pusės. Jis turi būti iš tokių medžiagų, kurioms galima suteikti bet kokią faktūrą, spalvą, išlaikyti jų vienodumą, veikiant atmosferai, ir kurios turėtų reikiamą estetinę išvaizdą, nes nuo to priklauso viso pastato estetiškas vaizdas. Vidinės pastato pusės išorinio konstrukcijos sluoksnio paskirtis yra kitokia – jis turi užtikrinti bendrą darbą su vidiniu sluoksniu, veikiant apkrovoms, tarp jų ir savajam

svoriui ir papildyti kitas anksčiau nurodytas funkcijas. Atitvarinių save laikančių konstrukcijų vidinių sluoksnių paskirtis yra tokia:

- konstrukcijos šiluminės varžos padidinimas;
- drėgmės ir garų izoliacijos pagerinimas;
- bendras konstrukcijos standumo padidinimas.

Daugeliu atvejų vidiniai sluoksniai yra išorinių sluoksnių jungiamoji grandis. Kai tarp išorinių sluoksnių nėra ryšių, vidiniai sluoksniai, taip pat ir standumo briaunos turi juos sujungti ir perimti dalį apkrovos, pirmiausia – šlyties įtempius. Vidinių sluoksnių medžiagos, jų savybės ir gamybos būdas parenkami, atsižvelgiant į sluoksnio paskirtį. Pavyzdžiui, jei vienam iš sluoksnių yra keliami nepralaidumo garams ir drėgmei reikalavimai, tai jis daromas iš vandeniui nepralaidžių medžiagų. Tokie sluoksniai yra dar vadinami garo barjeriais ir jie yra neatskiriama atitvarinės konstrukcijos dalis. Praktiškai šiluminės izoliacijos ir garo barjero sluoksniai nagrinėjami kaip vienas sluoksnis. Šiuo metu daugelyje pasaulio šalių iš anksto gaminami šilumą izoliuojančių vidinių sluoksnių dirbiniai (plokštės) būna kartu su garo barjero sluoksniu. Plokštė į konstrukciją dedama taip, kad garo barjeras būtų nukreiptas į šildomą pastato pusę. Panaši yra ir kitų tipų sluoksniuotųjų konstrukcijų paskirtis. Skirtumas yra tas, kad laikančiųjų ir mišriųjų sluoksniuotųjų konstrukcijų išoriniai sluoksniai yra standesni ir geriau užtikrintas bendras visų sluoksnių darbas veikiant apkrovoms. Sluoksniai turi patikimai sukibti. Laikančiųjų sluoksniuotųjų konstrukcijų vidinių sluoksnių paskirtis yra įvairi, tačiau jų stiprumas ir standumas būna mažesnis negu išorinių sluoksnių. Tai priklauso nuo įrašų pasiskirstymo skerspjūvyje. Pavyzdžiui, lenkiamuosiuose ir necentriškai gniuždomuose elementuose normaliniai įtempiai σ vidiniuose sluoksniuose būna mažesni (1.1 pav.). Šie sluoksniai gali būti iš mažesnio stiprumo medžiagų. Tačiau šlyties įtempiai τ yra didesni, ir juos turi perimti vidinis, bet silpnesnis sluoksnis.



1.1 pav. Normalinių (σ) ir šlyties (τ) įtempių pasiskirstymas skerspjūvyje (Marčiukaitis, Valivonis 2007)

Kaip buvo nurodyta anksčiau, daugelis sluoksniuotųjų konstrukcijų atlieka abi funkcijas: dirba ir kaip atitvarinė konstrukcija, ir kartu kaip laikančioji. Apskritai laikyti atitvarinėmis save

laikančiomis galima tik patalpų viduje esančias konstrukcijas, kurių neveikia jokios išorinės jėgos. Jeigu paanalizuotume atitvarinę konstrukciją – denginio (stogo) konstrukciją, tai ją, be savojo svorio, veikia sniego apkrova, montavimo, taip pat ir dėl išorės ir vidaus temperatūrų bei drėgmės skirtumo atsiradusios įrąžos. Tą patį galima pasakyti ir apie sienų atitvarines sluoksniuotąsias konstrukcijas. Vertikalia kryptimi jas veikia savasis svoris, o kartu ir langų bei kitų elementų svoris, o horizontalia kryptimi – vėjas, temperatūros ir drėgmės skirtumai, kurie lemia net plyšių atsiradimą išoriniuose sluoksniuose ir dėl to nukenčia vidinių sluoksnių termoizoliacinės savybės. Mišrios paskirties sluoksniuotųjų konstrukcijų sluoksnių paskirtis yra kaip ir abiejų kitų tipų konstrukcijų kartu paėmus – sluoksniai, dirbdami kartu, turi perimti ne tik išorines apkrovas, bet ir atitikti visus šilumos, garo ir drėgmės izoliacijos reikalavimus (Marčiukaitis, Valivonis 2007).

1.3. Medžiagos ir dirbiniai sluoksniuotųjų konstrukcijų gamybai

1.3.1. Medžiagų ir dirbinių paskirtis

Medžiagos ir gatavi dirbiniai sluoksniuotųjų konstrukcijų gamybai parenkami, atsižvelgiant į konstrukcijų paskirtį, gamybos būdą ir eksploatacinius reikalavimus. Visas medžiagas ir dirbinius sluoksniuotųjų konstrukcijų gamybai galima suskirstyti į tokias grupes:

- medžiagos ir dirbiniai laikančiosioms konstrukcijos dalims;
- medžiagos ir dirbiniai išoriniams sluoksniams;
- medžiagos ir dirbiniai vidiniams sluoksniams;
- šilumą izoliuojančios medžiagos ir dirbiniai;
- garą, garsą izoliuojančios medžiagos ir dirbiniai;
- medžiagos ir dirbiniai sluoksniams sujungti.

Tačiau ši klasifikacija yra sąlyginė, kadangi viena ir ta pati medžiaga gali atitikti keletą reikalavimų. Pavyzdžiui, konstrukcinius ir šiltinamosios izoliacijos reikalavimus gali atitikti kietas putų poliuretanai, putbetonis, kietos medžio pluošto plokštės ir pan. Todėl daugeliu atvejų medžiagas ir dirbinius patogiau skirstyti pagal sluoksnius ir jų paskirtį. Paprasčiausia įrąžų pasiskirstymo schema lenkiamos konstrukcijos skerspjūvyje rodo, kad vidiniai sluoksniai pagal stiprumo reikalavimus gali būti iš silpnesnių medžiagų. Beveik visada didžiausi normaliniai įtempiai tenka išoriniams sluoksniams, o vidiniai sluoksniai gali būti silpnesni ir atlikti kitas funkcijas. Jeigu vidinių sluoksnių paskirtis yra šiluminė izoliacija, tai jie priklausomai nuo jų standumo ir ryšio su išoriniais sluoksniais gali dirbti kartu su kitais sluoksniais kaip laikančioji konstrukcijos dalis ir perimti šlyties įrąžas. Todėl, siekiant palengvinti skaičiavimo metodo pasirinkimą, sluoksniuotųjų konstrukcijų medžiagas ir dirbinius patogiau skirstyti į medžiagas ir

dirbinius išoriniams (ploniems ir storiems) sluoksniams ir vidiniams sluoksniams. Mūsų šalyje trūkstant kai kurių medžiagų, naudojamos ir konstrukcijos su storais ir standžiais išoriniais sluoksniais ir standžiais betono tipo vidiniais sluoksniais. Storų išorinių sluoksnių sąvoka irgi yra santykinė ir ji taikoma tik tikslesniam skaičiavimo metodui parinkti. Nuo sluoksnių storio priklauso įtempių pasiskirstymo epiūra juose. Storesniuose sluoksniuose jie labai skiriasi priklausomai nuo aukščio (Marčiukaitis, Valivonis 2007).

1.3.2. Medžiagos ir dirbiniai išoriniams sluoksniams

Stori sluoksniai gali būti tokie patys kaip ir iš surenkamų iš anksto pagamintų dirbinių, jie taip pat liejami vietoje. Iš anksto pagaminti stori išoriniai sluoksniai yra įvairaus storio ir pločio gelžbetoninės plokštės, banguotieji plieniniai, aliumininiai, eternito ir pan. lakštai, kai bangų aukštis didesnis kaip 20 mm. Išoriniai sluoksniai iš betono tipo medžiagų daugiausia yra monolitiniai ir gaminami liejimo būdu. Gali būti naudojami įvairių tipų betonai, tarp jų sunkieji ir lengvieji, su įvairiomis rišamosiomis medžiagomis ir priedais. Betonai su įvairiais cheminiais priedais (polimercementiniai, polimerbetoniniai ir pan.) naudojami storų išorinių sluoksnių gamybai konstrukcijoms, eksploatuojamoms agresyviojoje aplinkoje. Jie yra gerokai atsparesni agresyviajai aplinkai, mažai laidūs vandeniui, garams. Jie naudojami, atsižvelgiant į konstrukcijos paskirtį ir išorinius sluoksnius veikiančius poveikius, eksploatavimo aplinką. Apskritai sluoksniuotųjų konstrukcijų medžiagos yra labai įvairios. Be to, nuolat atsiranda naujų tipų ir rūšių medžiagų. Yra didelė įvairovė medžiagų ir dirbinių ploniems išoriniams konstrukcijų sluoksniams. Pastaraisiais metais vis plačiau naudojami lygūs ir banguotieji plieniniai ir aliumininiai lakštai bei aliuminio folija. Su jais gaminamos ir naudojamos daugiasluoksnės lengvosios sluoksniuotosios plokštės. Dažniausiai naudojami lygūs arba profiliuoti plieniniai lakštai, kurių storis būna nuo 0,5 mm iki 1,5 mm. Rekomenduojamas mažiausias plieninio lakšto storis iš pastato vidaus pusės 0,3 mm ir išorės pusės – 0,5 mm. Plieninių lakštų tempiamasis stipris yra nuo 300 iki 560 N/mm², takumo riba 220–550 N/mm². Lakštų paviršiai būna galvanizuojami padengiant juos cinku, aliuminiu arba 20–200 μm storio polimerinėmis plėvelėmis. Tai labai padidina jų atsparumą korozijai. Korozijai atsparesni galvanizuoti lakštai. Aliumininiai lakštai naudojami rečiau ir tik ten, kur keliami specialūs reikalavimai (atsparumo, korozijos ar higienos), pavyzdžiui, maisto pramonėje ir pan. Naudojami 0,7–1,2 mm storio lakštai. Tempiamasis stipris 200–250 N/mm² ir sąlyginė takumo riba (0,2 %) yra ne didesnė kaip 200 N/mm². Esant specialiems reikalavimams dar gali būti naudojami nerūdijančiojo plieno lakštai, kuriuose yra iki 18 % chromo ir apie 12 % nikelio (tai labai padidina atsparumą korozijai). Gali būti naudojami ir kitokie metaliniai lakštai, pavyzdžiui, vario (tempiamasis stipris apie 220 N/mm²) (G.Marčiukaitis, J.Valivonis 2007).

Kompozitinėms perdangos plieninio laštyo skerspjūvio aukštis gali kisti nuo 40 iki 80 mm ir daugiau priklausomai nuo naudojamos pakloto sistemos. Paklotos statybos metu atlieka kelias funkcijas. Pirma jis naudojamas kaip klojinis. Statybos laikotarpio apkrovos yra lemiančios. Pagal LST EN 1993-1-3 nustatoma I_{eff} ir W_{eff} , bei apskaičiuojamas M_{Rd} . Kompozitinė perdanga įprastai daroma daugiau nei 80 mm aukščio, o jei plokštę sudaro kompozitinės sijos skerspjūvio dalį - tai 90 mm arba daugiau. Įprastai betono minimalus storis turi būti daugiau kaip 40 mm, o jeigu plokštę sudaro kompozitinės sijos skerspjūvio dalį - tai 50 mm ir daugiau. Užpildo dydis turi neviršyti $\min \{0,4 h_c; b_0/3; 31.5\text{mm}\}$. Minimalus plokštės atramos plotis: ant plieno ar betono 75 mm, ant kitų medžiagų 100 mm.

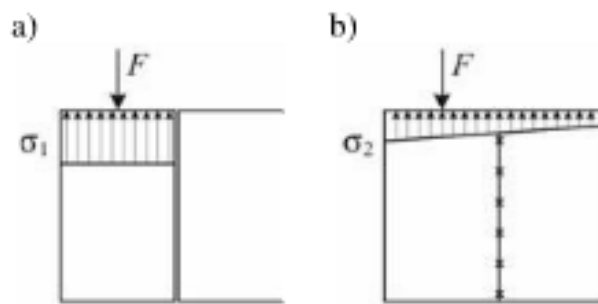
1.4. Sluoksniuotųjų konstrukcijų elgsenos ypatumai

1.4.1. Sąveika tarp sluoksnių

Kompozicine plokštė, sustiprina profilinio plieno paklotu - tai sistemos dalis. Sąsaja tarp betono ir plieno denginio užtikrina atitinkama lakšto skerspjūvio forma, mechaniniu inkaravimu lokaliai deformuojant lakštą (įspaudai arba iškilimai), kiaurymės arba dalinė perforacija, privirinant inkaravimo junges, galinis inkaravimas privirinant junges arba panaudojant kita jungties tarp lakšto ir betono būdą, galinis inkaravimas, deformuojant lakšto briaunas galuose. Profiliuotas plieno lakštas privalo užtikrinti vertikalią šlytį bei horizontalią šlytį tarp dviejų kontaktuojančių paviršių, t.y. betono ir metalinio denginio (Poh, Attard 1993). Išilginės šlyties galios patikrinimas atliekamas palyginant vidutinį šlyjamąjį stiprį veikiantį šlyjamojoje pavojingoje atkarpoje. Šlyjamojo stiprio dydį lemia plieno pakloto skerspjūvio ir jo paviršiaus geometrinės ypatybės.

Tačiau yra sudėtinga nuspėti tikslią išilginę šlyties jėgą (τ_u, R_d) apkrovus elementą, dėl to skersinė šlytis kompozitinėje plokštėje nuo apkrovimo yra netiesiogiai vertinama pagal empirines formules (Vainiūnas, Valivonis 2006). Pagal EN 1994-1-1 standartą skaičiuotinė šlyjamoji galia tikrinama taikant $m - k$ pusiau empirinį metodą. Šis metodas nenaudoja šlyjamojo stiprio $\tau_{u,Rd}$, bet pagal veikiančią skersinę jėgą tikrina šlytį pavojingiausioje atkarpoje.

Svarbi sluoksniuotųjų konstrukcijų efektyvumo sąlyga jas eksploatuojant yra visų sluoksnių bendras darbas. Jam užtikrinti tarp sluoksnių turi būti gera jungtis. Dėl jungčių poveikiai nuo vieno sluoksnio perduodami kitam, poveikiai tarp sluoksnių persiskirsto taip, kaip parodyta 1.2 pav.



1.2 pav. Įtempių pasiskirstymas, kai jungtis tarp sluoksnių labai silpna arba jos nėra (a) ir kai jungtis yra stipri bei standi (b) (Marčiukaitis, Valivonis 2007)

Kai jungties tarp sluoksnių nėra arba ji yra labai silpna (1.2 pav., a), tai išorinį poveikį F atlaiko tik sluoksnis, kurį tiesiogiai veikia ši jėga. Jame atsiranda įtempiai σ_1 , kurie yra gerokai didesni už įtempius σ_2 šiame sluoksnyje, kai jis yra standžiai sujungtas su tiesiogiai apkrautu sluoksniu. Įtempiai dėl jungties pasiskirsto tarp abiejų sluoksnių (1.2 pav., b). Jungtis (ir sukibimas) tarp sluoksnių yra dviejų tipų: fizikinė-cheminė ir mechaninė. Fizikinių-cheminių jungčių grupei priklauso adsorbcija ir dėl jos – adhezija ir kohezija. Adhezija rodo sukibimo lietimosi paviršiaus stiprumą, o kohezija – kontakto plėvelės ir prie jos esančio ruožo stiprumą. Adhezijos pagrindas yra molekulinė sąveika sluoksnių susilietimo paviršiuje, kuri įvyksta dėl molekulių rišimosi susiliečiančių paviršių zonose (šiuo efektu galima paaiškinti savaiminį dviejų plokščių lygiais paviršiais dirbinių sukibimą).

Vykstant cheminiams rišimosi procesams, sluoksniai susijungia į monolitą. Tokiai jungčiai gauti vienas iš susiliečiančių sluoksnių turi būti gaminamas liejimo būdu. Priklausomai nuo sluoksnių medžiagų savybių, jos sluoksnių savybės susilietimo paviršiaus zonoje skiriasi nuo atskirai paimto sluoksnio savybių. Esant sukibimui tarp sluoksnių (adhezijai), jų zonos prie lietimosi paviršiaus yra stipresnės negu nesant adhezijai. Nuo susiliečiančių sluoksnių medžiagų savybių priklauso ir pats adhezinis stiprumas, kadangi jam įtakos turi ne tik tarpmolekulinės sąveikos stiprumas, bet ir atskirų sluoksnių medžiagų fizikinės-mechaninės savybės. Adhezinio sukibimo stiprumui įtakos turi ir sluoksnių stiprumas, nes nuo to priklauso vidinių įtempių dydis. Jie atsiranda dėl skirtingų sluoksnių deformacijų, veikiant apkrovoms, drėgmei, temperatūrai. Todėl, projektuojant ir gaminant sluoksniuotąsias konstrukcijas, reikia atsižvelgti į jų tarpusavio sąveiką ir savybių suderinamumą, kad nesusidarytų didelių vidinių įtempių. Vienas iš pagrindinių sluoksnių zonos prie lietimosi paviršiaus sustiprėjimo veiksnių yra medžiagos dalelių dislokacijų blokavimas, esant poveikiams. Vieno sluoksnio defektai yra blokuojami kito sluoksnio bedefekčiais paviršiais. Tai sumažina įtempių koncentraciją, juos tolygiai paskirsto tarp sluoksnių ir jų ruožų. Sumažėja pavojus, kad sluoksniuotosios konstrukcijos elementas gali suirti ten, kur yra vieno kurio sluoksnio defektai, nepaisant kito sluoksnio stiprumo. Sluoksniuoti elementai gali daugiau deformuotis

nesuirdami. Deformacijos metu į didesnių deformacijų ruožus įtraukiamos labai mažos medžiagos dalelės, kurios lokalizuoja mikrotempius ir padidina bendrą medžiagos stiprumą. Adhezija ir kiti ryšiai neturi įtakos sluoksnuiotosios konstrukcijos darbui, veikiant apkrovai, jeigu trinties jėga tarp sluoksnių yra didesnė už veikiančią šlyties įrašą. Mechaninė jungtis tarp sluoksnių, jei vienas iš jų yra gaminamas liejimo būdu, atsiranda dėl įvairių porų, kapiliarų, paviršiaus nelygumų ir pan. Kai sluoksnių paviršiai lygūs ir dideli, taikomas klijavimo metodas, daromos specialios mechaninės jungtys, užtikrinančios įrašų perdavimą nuo vieno sluoksnio kitam ir bendrą jų darbą eksploatacijos metu (Marčiukaitis, Valivonis 2007).

Kompozitinės perdangos plokštės lakštas statybos metu pirmiausia veikia kaip klojinis. Statybos metu plieno paklotas turi atlaikyti betono mišinio ir statybinių apkrovų poveikį, todėl jis yra tikrinamas pagal saugos ir tinkamumo ribinius būvius pagal LST EN 1993-1-3. Taip pat paklotas gali būti laikinai išramstytas atsižvelgiant į profiliuotą iškilimus ir įdubas. Eksploatavimo metu, kai pasireiškia kompozitinė elgsena, metalinis paklotas pradeda dirbti kaip tempiamas elementas. Betonas ir plienas sudaro bendrą skerspjuvį. Galime išskirti tris betono ir plieno ryšio tipus:

- Fizinis-cheminis ryšys, egzistuojantis iki pasireiškiant pirmiems plyšiams;
- Trinties ryšys – pasireiškia prasidėjus pleišėjimui;
- Mechaninis ryšys – pasireiškia po pradinės slinkties, o efektyvumas priklauso nuo kontaktinio paviršiaus šiurkštumo (iškilimų ir įspaudų).

Turint bendrą skerspjuvį iš betono ir metalo pakloto juntamas pasislinkimas tarp dviejų medžiagų. Jungties elgsena gali būti įvertinta matuojant pasislinkimą betono – plieno sąlyčio plokštumoje. Skiriami du pasislinkimo plieno – betono kontakto plokštumoje tipai:

- Sunkiai išmatuojami mikroposlinkiai, sudarantys prielaidas pradėti veikti jungčiai tarp betono ir plieno;
- Makroposlinkiai – išmatuojami pasislinkimai, priklausantys nuo jungties tarp betono ir metalo tipo.

Remiantis sąveikos tyrimo rezultatais buvo išskirti trys sąveikos tipai:

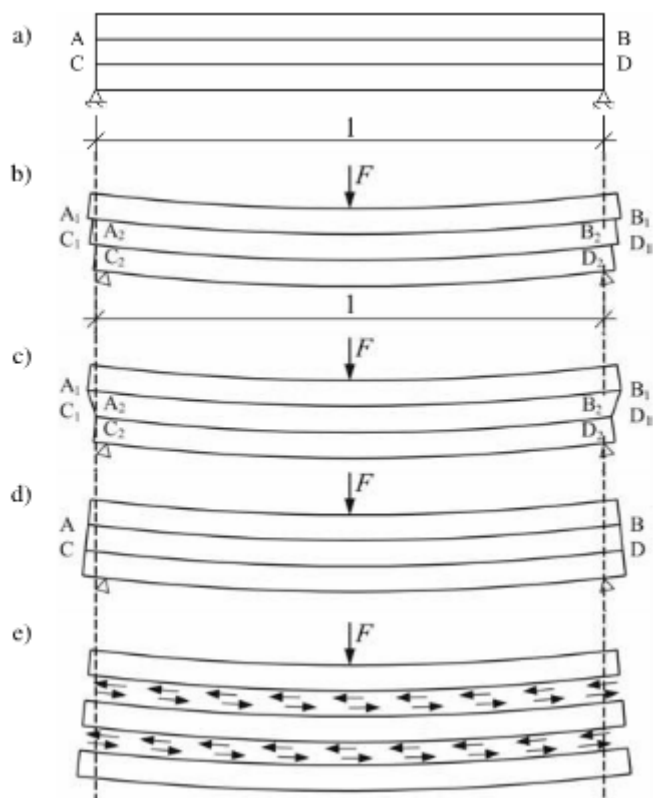
- Visiška sąveika: nepasireiškia jokia globali slinktis tarp plieno-betono sąlyčio plokštumoje. Horizontali šlyties jėga visiškai perduodama iki pat maksimalios jėgos P_u , atitinkančios plokštės iirtį. Kompozitinė sąveika yra aktyvi iki pat iirties.
- Nulinė sąveika: plieno-betono sąlyčio plokštumoje slinktis nėra suvaržyta. Kompozitinė sąveika praktiškai nepasireiškia.

Dalinė sąveika: globali slinktis plieno-betono sąlyčio plokštumoje nėra nulinė, bet ribota. Šlyties jungtis yra veiksminga iki iirties, bet laikomoji galia yra mažesnė nei visiškos sąveikos atveju.

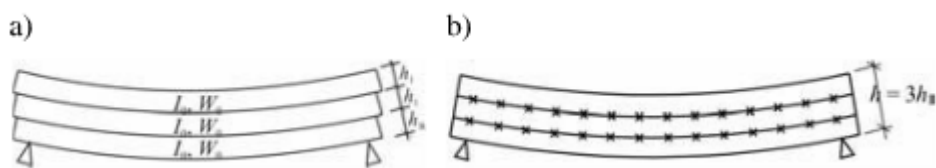
Kuriant ir projektuojant sluoksniuotąsias konstrukcijas, būtina numatyti, kokios jungtys bus tarp sluoksnių ir kokią įtaką jos turės bendram konstrukcijos darbui. Tai svarbu ir parenkant gamybos technologiją, ir optimizuojant jos procesus.

1.4.2. Jungčių įtaka bendram sluoksnių darbui

Sluoksniuotosios konstrukcijos sudaromos iš įvairaus stiprumo ir standumo sluoksnių, kurių bendra elgsena priklauso nuo ryšių tarp jų ir jų pasislinkimo vienas kito atžvilgiu. Todėl bendro sluoksnių darbo esmė ta, kad kai du ar daugiau sluoksnių yra sujungti savo paviršiais, ši jungtis perima šlyties įrąžas. Šlyties įrąžų atsiradimą ties susiliečiančiais paviršiais galima paaiškinti 1.3 pav. schema. Trys vienas ant kito laisvai sudėti elementai (sluoksniai (1.3 pav., a)), apkrauti jėga F , išlinksta (1.3 pav., b). Kiekvieno elemento apatiniai sluoksniai lietimosi paviršiuje A_1B_1 ir C_1D_1 yra tempiami, o viršutiniai A_2B_2 ir C_2D_2 yra gniuždomi. Visi šie sluoksniai yra iš vienodos medžiagos ir sudaro vienalytį monolitą, tokia konstrukcija deformuosis, kaip parodyta (1.3 pav., c). Šiuo atveju pasislinkimą tarp sluoksnių sulaiko šlyties įtempiai (1.3 pav., d). Trislauksnių konstrukcijų vidinį sluoksnį, jeigu jis yra gerai sujungtas su išoriniais sluoksniais, galima laikyti jungtimi ir ji perima šlyties įrąžas. Jeigu vidinis sluoksnis yra iš minkštų plastiškų medžiagų, tai tarp lietimosi plokštumų A_1B_1 ir C_1D_1 įvyksta pasislinkimas pagal vidinio sluoksnio aukštį, jam išsikreivinus (1.3 pav., b). Dėl bendro sluoksnių darbo konstrukcija tampa daug stipresnė ir standesnė negu atskirai paimtų sluoksnių susumuotas darbas. Pagal 1.4 pav. pateiktas schemas trislauksnės sijos atsparumo momentas, kai nėra jungties tarp sluoksnių, bus lygus $3W_0$ ir inercijos momentas – $3I_0$ (1.4 pav., a). Esant standumo ryšiams tarp sluoksnių, sija dirba kaip monolitinė, kurios aukštis $h = 3h_1$, ir tuomet jos $W = 9W_0$ ir $I = 27I_0$ (1.4 pav., b). Vadinasi, dėl jungties stiprumas padidėja tris kartus, o standumas – devynis kartus, jeigu, tartume, kad sija dirba tampriai. Tai rodo, kad jungtis tarp sluoksnių konstrukcijos darbui yra svarbiausia. Ji perima šlyties įrąžas ir konstrukcijos laikomąją galią užtikrina šlyjamoji laikomoji galia (Marčiukaitis, Valivonis 2007).

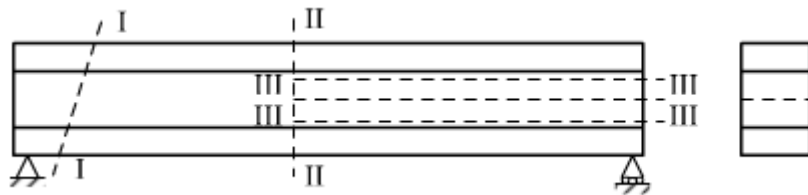


1.3 pav. Trisluoksnio lenkiamojo elemento elgsenos schemas (Marčiukaitis, Valivonis 2007)



1.4 pav. Standžiųjų jungčių įtaka sluoksnuotosios sijos charakteristikoms, kai jungties tarp sluoksnių nėra (a) ir kai yra standžioji jungtis (b) (Marčiukaitis, Valivonis 2007)

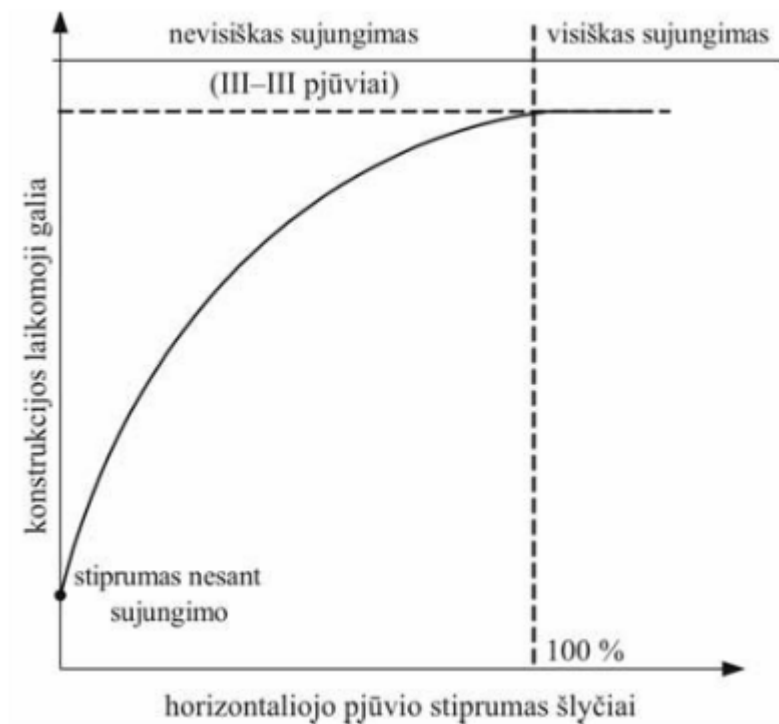
Konstrukcijos darbas priklauso ir nuo sluoksnių jungčių standumo, nuo galimybių pasislinkti sluoksniams. Konstrukcijos standumą, jeigu patys sluoksniai yra standūs, apibrėžia sluoksnių tarpusavio sąveika ir jungties standumas (ar ji standi, ar paslanki). Lenkiamos ar necentriškai gniuždomos konstrukcijos darbas priklauso nuo jungties paslankumo ir tamprumo. Turi būti garantuotas daugelio tipų laikančiųjų sluoksnuotųjų plokščių sluoksnių šlyties stiprumas ir standumas. Jeigu jungtį tarp išorinių sluoksnių atstoja vidiniai mažesnio standumo sluoksniai, sukibę su išoriniais, tai bus dalinio jungties standumo atvejis. Sluoksnių jungtis yra standžioji tuomet, kai ribinis būvis (ribinė apkrova) apibrėžiamas didžiausia lenkiamąja galia. Kaip žinoma, vienalytės konstrukcijos dažniausiai suyra dviejuose pjūviuose: nuo skersinės jėgos ir lenkimo momento. Sluoksnuotosiose konstrukcijose atsiranda ir trečiojo pjūvio suirimo atvejis – nuo šlyties tarp sluoksnių arba per silpnesnį vidinį sluoksnį (žr. 1.5 pav.).



1.5 pav. Galimi sluoksniuotosios konstrukcijos suirimo pjūviai (Marčiukaitis, Valivonis 2007)

Didžiausia apkrova būna, kai kritiniame pjūvyje susidaro optimalus įtempių pasiskirstymas, pavyzdžiui, pjūvyje II–II. Kad ir kokia būtų sluoksnių jungtis (pvz. III–III pjūvis), laikomoji galia nepadidės, nes ji priklauso nuo II–II pjūvio stiprumo, veikiant normaliniams įtempiams. Mažinant vidinio sluoksnio standumą ir stiprumą šlyčiai arba jungties stiprumą tarp sluoksnių, konstrukcija gali suirti III–III pjūviuose, esant mažesnei apkrovai. Tokia jungtis vadinama iš dalies standžia. Mažinant jungties stiprumą, apkrovą tenka perimti atskirai kiekvienam sluoksniui arba stipresniajam iš jų, ir ji mažesnė, negu sluoksniams esant visiškai susijungusiems. Vadinasi, jungčių tarp sluoksnių stiprumas ir standumas nusako ne tik III–III pjūvio stiprumą, bet ir visos konstrukcijos stiprumą. Galima išskirti du III–III pjūvio darbo atvejus: kai tarp sluoksnių jungtis yra iš dalies standi ir stipri arba vidinis sluoksnis yra minkštas ir kai jungtis yra standi ir stipri. Kai sluoksniai nepasislenka vienas kito atžvilgiu, tai tarp jų yra visiška sąveika, kuri gali būti užtikrinta įvairiais būdais. Kartais jungtys arba vidinis sluoksnis ne iš karto įsitraukia į darbą, ir konstrukcija deformuojasi, kol jie pradeda dirbti visa galia. Tai priklauso nuo jungiamųjų sluoksnių ir jungčių tipo (dažniausiai taip būna, kai jungtys yra mechaninės).

Kaip pavaizduota 1.6 pav., konstrukcijos laikomoji galia didėja netiesiniu būdu: didėjant jungties stiprumui, vis labiau į bendrą darbą įsitraukia atskiri sluoksniai, keičiasi jų įtempių būvis (1.7 pav.).



1.6 pav. Priklausomybė tarp ribinės apkrovos ir horizontalaus pjūvio šlyjamosios laikomosios galios (Marčiukaitis, Valivonis 2007)



1.7 pav. Skirtingos sąveikos tarp sluoksnių įtaka įtempių pasiskirstymui skerspjuvyje: 1 – nėra sąveikos; 2 – dalinė sąveika; 3 – visiška sąveika (Marčiukaitis, Valivonis 2007)

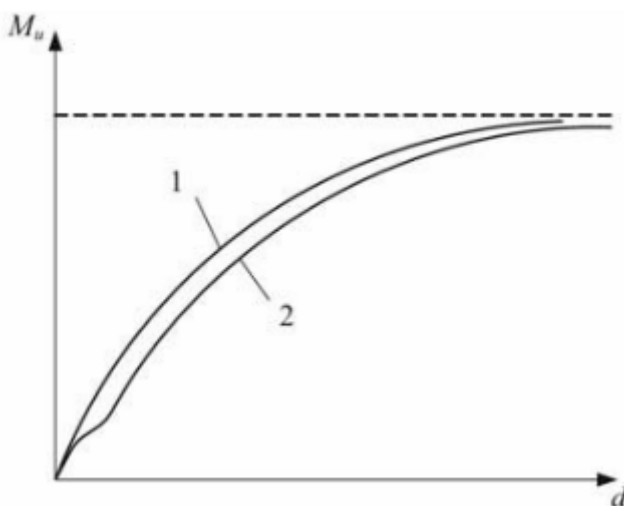
Sąveika tarp sluoksnių didelės įtakos turi ne tik stiprumui tarp sluoksnių, t. y. suirimui pagal III–III pjūvį (1.5 pav.), bet ir visos konstrukcijos standumui ir įlinkiams veikiant apkrovai (1.8 pav.). Tai būdinga ir konstrukcijoms (plokštėms) su standumo briaunomis. Iš pradžių sluoksniai ir briaunos pasislenka vienas kito atžvilgiu dėl sluoksnių ir briaunų susiglemžimo ties jungėmis ir įlinkis didėja (1.8 pav., 2 kreivė), vėliau deformavimasis vyksta kaip ir nesant pasislinkimui tarp sluoksnių ir briaunos. Iš dalies standi jungtis tarp standžių sluoksnių gali būti naudojama tokiais atvejais:

- kai ribojamas konstrukcijos įlinkis ir standumas gali būti užtikrintas su silpnesnėmis jungtimis;
- kai gali pasikeisti sluoksnių sąveika konstrukcijos gamybos arba darbo metu;

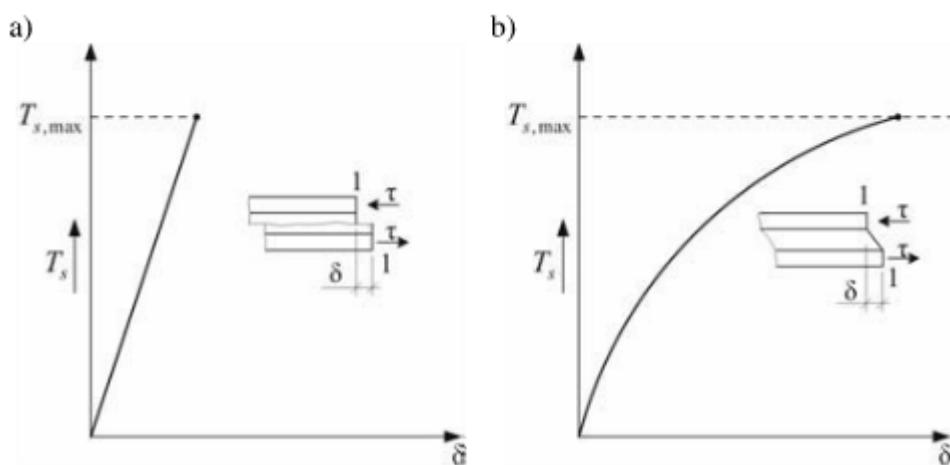
- ekonominiais sumetimais (žiūrima, kas pigiau – ar standinti kurį nors sluoksnį, ar daryti standesnės jungtis) (Marčiukaitis, Valivonis 2007).

Nevisiškos jungties tarp sluoksnių ypatumas yra tas, kad konstrukcija gali suirti per horizontalųjį pjūvį. Momentas, kurį perims kritinis pjūvis, turi būti nustatomas įvertinus leistinąją ribinę apkrovą. Ribinė apkrova priklauso:

- nuo jungties stiprumo ir standumo;
- nuo jungties tipo, kuris charakterizuoja sluoksnių pasislinkimą ir deformatyvumą.



1.8 pav. Pasislinkimo tarp sluoksnių įtaka $m-d$: 1 – pasislinkimo tarp sluoksnių nėra; 2 – jungtis tarp sluoksnių iš dalies standi, d – įlinkis (Marčiukaitis, Valivonis 2007)



1.9 pav. Sluoksniuotosios konstrukcijos elgsena, esant standžiai (a) ir iš dalies standžiai (minkštai) (b) jungtims; 1 – jungtės deformacija (Marčiukaitis, Valivonis 2007)

Pasislinkimo tarp sluoksnių pobūdis priklauso nuo jungčių ir jungių deformatyvumo. Esant standžiajai jungčiai, suirimas įvyksta staigiai. Didesnės šlyties deformacijos tarp sluoksnių yra tada, kai jungtis yra iš dalies standi. Šlyjamosios deformacijos tarp sluoksnių deformacijos yra daug didesnės, staigus suirimas neįvyksta. Esant ir iš dalies standžiai sluoksnių jungčiai,

konstrukcijos darbas priklauso nuo jungčių, užtikrinančių šią sąveiką, standumo. Visa tai rodo, kad sluoksniuotųjų konstrukcijų elgsena ir jos įvertinimas priklauso nuo jungčių tarp sluoksnių standumo ir pasislinkimo tarp jų įvertinimo (Marčiukaitis, Valivonis 2007).

Išilginės ir skersinės šlyties priklausomybė tamprioje stadijoje yra žinoma, tampriai plastinėje stadijoje ši priklausomybė yra sudėtinga ir nustatoma taikant pusiau empirinį metodą.

Koeficientų k ir m nustatymui naudojamos diagramos. Jos gauta išbandžius dvi grupes (A ir B) bandinių po tris bandinius. Horizontalioje ašyje atidėtas plieno lakšto skerspjuvio ploto santykis su horizontaliu šlyjamuoju plotu. Vertikalioje ašyje atidėta skersinės jėgos santykis su vertikaliai šlyjamu plotu. Į betono stiprį neatsižvelgiama, nes jo kitimas tarp 25 ir 35 MPa praktinės įtakos šlyjamajai galiai neturi. Tokios diagramos sudaromos atliekant standartizuotus bandymus. Paprastai m ir k reikšmės pateikiamos lakštu gamintojų.

Wrightas ir kt. (Wright *et al.* 1987) atliko su kompozitinėmis plokštėmis daugiau kaip 200 bandymų, susijusių su įspaudų, šlyties, sąveikos tarp betono ir metaliniu lakštu ir palygino skaičiavimo rezultatus su BS 5950: 4 dalies projektavimo metodu, atsižvelgdami į keletą aspektų: kompozitinės plokštės elgseną bei kompozitinės sijos elgseną. Bandiniai su skirtingais betono mėginiais po 10 tūkst. ciklinių apkrovimų turi nedidelę įtaką galutiniam stipriui, palyginti su statinės apkrovos gautais rezultatais. Pastebėta, kad sumažinus 30 % įspaudus metaliniame paklote laikomoji galia sumažėjo 50 %.

Calixto, Lavallis (Calixto, Lavall 1998) atliko eksperimentus su tikro dydžio konstrukcija ir sekė jos elgseną. Kompozitinė plokštė su briaunuotu metaliniu paklotu buvo apkrauta tik viename tarpatramyje. Buvo tiriama elemento elgsena atsižvelgiant į skirtingą plieninio lakšto storį, bendrą plokštės aukštį ir ilgį. Bandymais pastebėta, kad surenkamas paklotas su kraštinėmis jungėmis bei apkrautu tik vienu tarpatramiu padidina laikomąją galią lyginant su konstrukcija, kai šlytį užtikrina tik metalinis paklotas. Bandant bandinius visuose atvejuose plokštės irtis įvyko dėl šlyties jėgos, net ir tuomet, kai buvo naudojamos kraštinės jungės bei briaunuotas paklotas. Gauti bandymų rezultatai buvo palyginti su skaičiavimo metodu pagal LST EN 1994-1-1. Palyginus gauti geri sutapimo rezultatai.

Crisinelis ir Marimonas (Crisinel, Marimon 2004) pasiūlė supaprastintą projektavimo metodą kompozitinei plokštei skaičiuoti. Metodas susideda iš gautų rezultatų bandant standartines kompozitines plokštes bei supaprastinto skaičiavimo algoritmo paruošimo, kad gauti rezultatai būtų panašūs į gautus bandymo metu. Gauti rezultatai naudojant Crisinelio ir Marimono pasiūlyta metodą buvo patvirtinti didelės apimties bandymais. Tai parodė gerą sutapimą tarp teoriškai gautų rezultatų bei rezultatų, gautų bandymo metu.

Marimuthu ir Seenyharamanas (Marimuthu ir Seetharaman 2007) atliko 18 eksperimentinių bandymų, skirtų išsiaiškinti šlyties jėgos elgseną atsižvelgiant į įspaudus ant briaunuoto metalinio

pakloto. Bandinys buvo veikiamas nustatyta apkrova norint įvertinti m-k reikšmes. Kompozitinės plokštės horizontali šlytis apskaičiuota naudojant m-k metodą yra patvirtinta gautais rezultatais, skaičiuojant ir pagal LST EN 1994-1-1, įvertinant dalinę sąveiką. Skirtumas tarp gautų reikšmių vidutiniškai yra 26 %.

1.4.3. Kompozitinės perdangos pleišėjimas

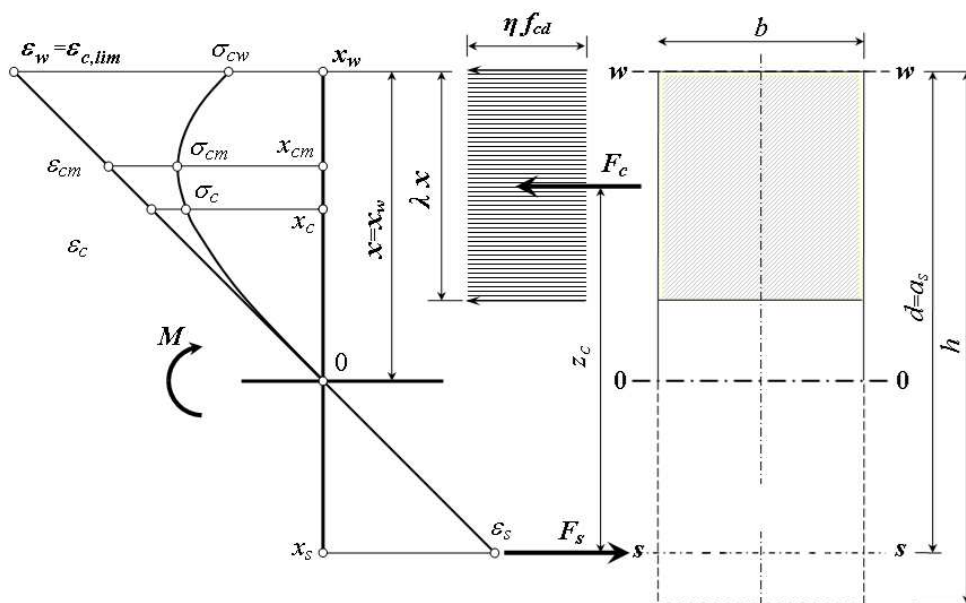
Betono pleišėjimas neigiamų momentų zonose yra svarbus dalykas, kurį sunku suvaldyti. Konstrukcijų plyšių atsivėrimas yra nepageidautinas estetinė prasme, kai plyšių plotis akivaizdžiai matomas. Todėl plyšių plotis turėtų būti ribojamas. Taip pat atsivėrę plyšiai gali sukelti armatūros koroziją. Šių nepageidaujamų efektų galima išvengti projektuojant taip, kad plyšių plotis neviršytų leistino esant eksploatacinei apkrovai. Esant normalioms neagresyvioms sąlygoms 0,3 mm plyšio plotis dar leistinas. Esant didesniai plyšio pločiui būtina papildomai armuoti šias zonas. Tik gana mažo skersmens armatūros tinklas dedamas viršutiniame perdangos sluoksnyje (> 0,2 % armatūros tinklas, jei paklotas neišramstomas ir 0,4 % jei paklotas išramstomas) dėl atsparumo ugniai padidrinimo, zonų su neigiamu momentu armavimo bei susitraukimo sukkelto pleišėjimosi apribojimo (Chen 2003; Veljkovic 1998).

2. SIJŲ STIPRUMO STATMENAME PJŪVYJE APSKAIČIAVIMAS PAGAL KREIVINĘ EURONORMŲ GNIUŽDOMO BETONO ĮTEMPIŲ DIAGRAMĄ

Pagrindinis statybinių konstrukcijų elementų skaičiavimo metodas yra ribinių būvių metodas. Dažnai tenka apskaičiuoti gelžbetoninių elementų stiprumą, plyšių atsiradimą, įlinkius. Tam šiuo metu norminiuose reglamentuose panaudojamos vis kitos kiekvienam paminėtam skaičiavimui pritaikytos formulės. Skaičiavimo supaprastinimui kreivinės įtempių diagramos keičiamos paprastesnėmis diagramomis. Todėl taip apskaičiuotų parametrų reikšmės būna sąlyginės.

ZI metodas gana universalus inžinerinis metodas, kurio pagrindą sudaro netiesinis modelis, leidžiantis pagal vieningą metodiką apskaičiuoti realias, ne sąlygines įtempių-deformacijų būvio parametrų reikšmes statmenuose elementų ašiai pjūviuose bet kurioje apkrovimo stadijoje nuo apkrovimo pradžios iki elemento suirimo. Kai kuriuos šios metodikos formulių parametrus, reikalingus apskaičiuojant sijų stiprumą M_{Rd} statmename išilginei ašiai pjūvyje, galima apskaičiuoti iš anksto. Tai leidžia išvengti pasikartojančių skaičiavimų ir supaprastintų praktišką formulių panaudojimą.

2.1. Pagrindinės geometrinės ir pusiausvyros lygtys



2.1 pav. Lenkiamo elemento skerspjūvis ir elementą veikiančios jėgos bei EN-2 reglamentuose pateikiamas betono gniuždomos zonos įtempių stačiakampis pasiskirstymas (Tankūnas *et al.* 2012)

Skerspjūvio (2.1 pav.) stiprumas $M = M_{Rd}$, t.y. skaičiuotinis irimo momentas apskaičiuojamas elemento betono gniuždomos zonos įtempius įvertinant dviem metodais – ZI metodu ir 1992-1-1

metodu (toliau vadinsime jį EN-2). Reglamentuose įteisintas EN-2 metodas čia panaudojamas universalesnio mažiau suscheminto, todėl mažiau nutolusio nuo realios elemento elgsenos ZI metodo tinkamumui patikrinti.

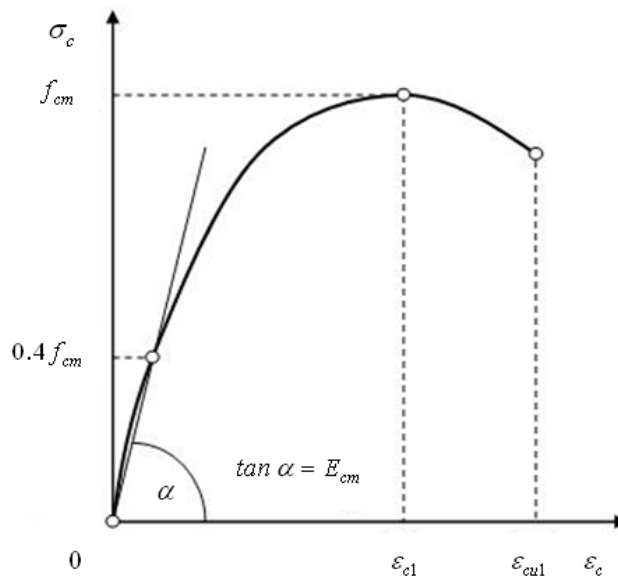
2.1.1. Metodo analizė

Įtempių diagrama yra kreivinė (2.2. pav.), aprašyta ES-2 reglamentų lygtimi:

$$\frac{\sigma_c}{f_{cm}} = \frac{k\eta - \eta^2}{1 + (k-2)\eta}$$

kur: $\eta = \varepsilon_c / \varepsilon_{c1}$;

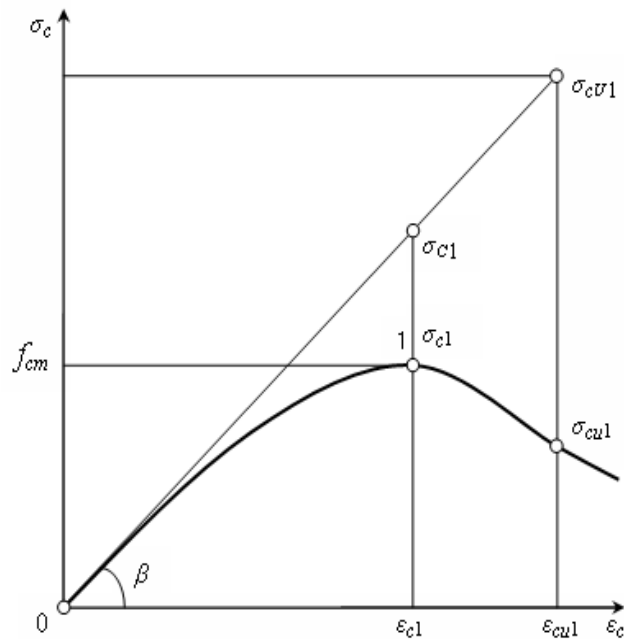
$$k = \frac{1,05E_{cm} \cdot \varepsilon_{c1}}{f_{cm}}.$$



2.2 pav. Įtempių-deformacijų tarpusavio priklausomybė (Tankūnas *et al.* 2012)

Jeigu $E_c = 1,05E_{cm}$ ir $\nu_{c1} = f_{cm} / E_c \varepsilon_{c1}$, tai $k = 1/\nu_{c1}$ ir $\sigma_c = \frac{\eta/\nu_{c1} - \eta^2}{1 + (1/\nu_{c1} - 2)\eta} f_{cm}$.

2.2 pav. grafikas keičiamas 2.3 pav. grafiku, aprašytu lygtimi.



2.3 pav. Įtempių-deformacijų tarpusavio priklausomybė (Tankūnas *et al.* 2012)

$$\sigma_c = E_c \varepsilon_c (1 + c_1 \eta + c_2 \eta^2) = \nu_c E_c \varepsilon_c = \nu_c \sigma_{ce}$$

$$\text{čia } \nu_c = 1 + c_1 \eta + c_2 \eta^2 = 1 + (3\nu_{c1} - 2)\eta + (1 - 2\nu_{c1})\eta^2;$$

$$c_1 = 3\nu_{c1} - 2;$$

$$c_2 = 1 - 2\nu_{c1};$$

$$E_c = \tan \beta;$$

$$\sigma_{C1} = E_c \varepsilon_{c1};$$

$$\sigma_{c1} = \sigma_{cm} = f_{cm};$$

$$\nu_{c1} = \sigma_{c1} / \sigma_{C1}.$$

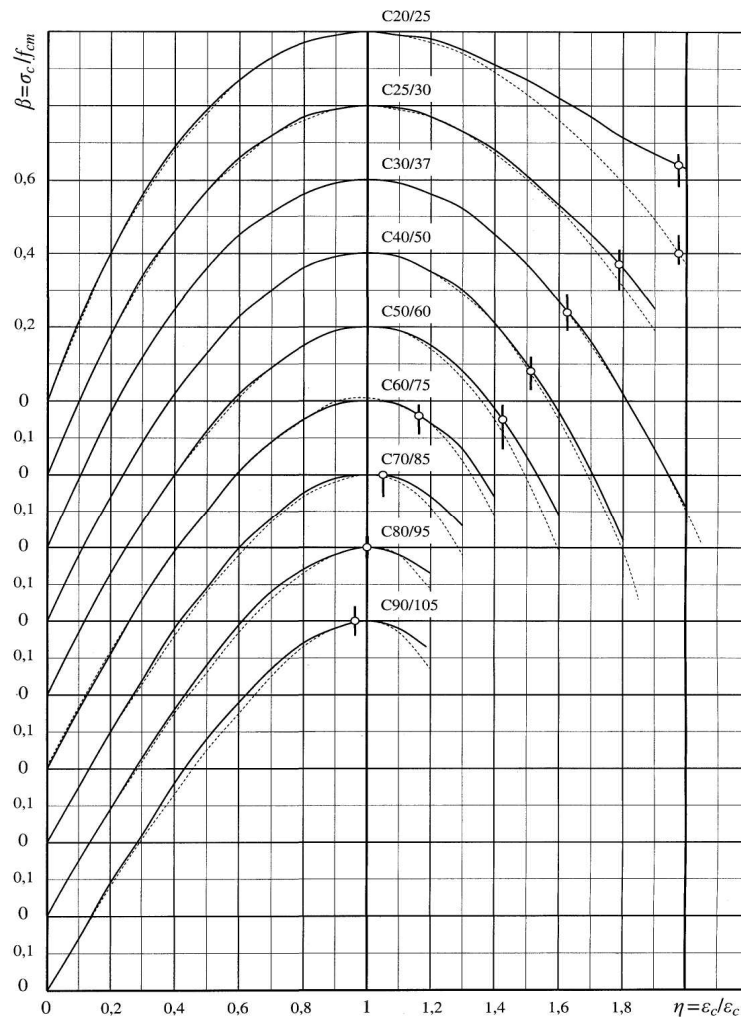
2.2 paveikslo grafiko pakeitimo 2.3 paveikslo grafiku rezultatas parodytas 2.4 pav.

Prof. I. Židonio (2012) atlikti tyrimai parodė, kad visų įprasto stiprumo klasių betono 2.4. pav. grafiko „kylanti“ dalis (iki ε_{c1}) 3-čio laipsnio lygtimi aprašoma gana tiksliai, kai $\nu_{c1} \geq 0,3$ ($f_{ck} \geq 12$ MPa), patenkinamai, – kai $\nu_{c1} \geq 0,25$ ($f_{ck} \geq 08$ MPa).

Tam tikrą 3-čio laipsnio lygties „krentančios“ dalies intervalą galima nagrinėti, kai $\nu_{c1} \geq 0,39$, – $f_{ck} \geq 25$ MPa. Visą krentančios dalies intervalą galima nagrinėti, kai $\nu_{c1} \geq 0,44$, – $f_{ck} \geq 35$ MPa.

Pagal EC-2 reglamento E.1N lentelę ir STR 2.05.05:2005 reglamento 1 lentelę žemiausia konstrukcijų betono stiprumo f_{ck} klasė yra 12MPa (C12/15), kai panaudojimo sąlygos ypatingai geros ir 20 MPa (C20/25) – kitais atvejais. Tačiau pagal kompozitinių plokščių projektavimo reikalavimus naudotina žemiausia betono klasė C25/30.

Kai $\varepsilon_c \leq \varepsilon_{c1}$ ir $\varepsilon_{c1} = 0,7 f_{cm}^{0,31} \leq 2,8 \text{ ‰}$, tai žemiau pasirinkta metodika pakankamai gerai tinka visam betono f_{ck} stiprumo klasių diapazonui nuo 12 iki 90 MPa, tinka ir $f_{ck} = 8 \text{ MPa}$ atvejui.



2.4 pav. Įtempių σ_c santykinių reikšmių $\beta = \sigma_c / f_{cm}$ grafikai (M. Tankūnas *et al.* 2012)

$$----- \beta_{EN-2} = \sigma_c / f_{cm} ;$$

$$—— \beta_{ZI} = \sigma_c / f_{cm} .$$

Skaičiuojant M_{Rd} stiprumą elemento skerspjūvyje, EN-2 reglamente reikiamas medžiagų stiprumo patikimumas gaunamas armatūros ir gniuždomo betono stiprį dalinant iš dalinių koeficientų, t.y. $f_{sd} = f_{sk} / \gamma_s$ ir $f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot f_{ck} / \gamma_c$.

ZI metodikos pagrindą sudaro netiesinis betono deformacijų modelis. Elemento gniuždomos zonos betono įtempiai aproksinuojami kreivine lygtimi. Šioje lygtyje, o taip pat ir eurokodų 3.1 lentelės formulėse deformacinėms betono savybėms apskaičiuoti imamos ne charakteristinės, bet vidutinės parametrų reikšmės. Pagal šitas formules apskaičiuojame vidutinę elemento betono gniuždomos zonos jėgą. Reikiamam patikimumui gauti panaudojame šios betono gniuždomos

zonos jėgos dalinį $\gamma_{Nc} = F_{cm} / F_{cd}$ koeficientą. Prof. I. Židonio tyrimai parodė, kad galima imti $\gamma_{Nc} = 1,95$. Armatūros stiprumo patikimumas užtikrinamas, kaip ir EN-2 metode, panaudojant armatūros stiprumo dalinį koeficientą: $f_{sd} = f_{sk} / \gamma_s$.

ZI metodo esmė - funkcija lengvai integruojama. Šių gniuždomos zonos betono įtempių atstojamoji jėga ir šios jėgos momentas apie neutraliąją ašį yra:

$$F_c = \int_{x_w}^0 \sigma_c b(dx_c) = \omega_{nc} \varepsilon_w E_c b x_w = \omega_{nc} \varepsilon_w E_c b d \xi_w ;$$

$$M_c = \int_{x_w}^0 \sigma_c b x_c (dx_c) = \omega_{mc} \varepsilon_w E_c b x_w^2 = \omega_{mc} \varepsilon_w E_c b d^2 \xi_w^2.$$

Čia:

$$\eta_c = \eta_w = \varepsilon_w / \varepsilon_{c1} ;$$

$$\omega_{cn} = \frac{1}{2} + \frac{c_1}{3} \eta_c + \frac{c_2}{4} \eta_c^2 ;$$

$$\omega_{cm} = \frac{1}{3} + \frac{c_1}{4} \eta_c + \frac{c_2}{5} \eta_c^2 ;$$

$$\xi_w = \frac{x_w}{d} ;$$

$$e_c = \frac{M_c}{F_c} = \frac{\omega_{mc}}{\omega_{nc}} x_w = \frac{\omega_{mc}}{\omega_{nc}} \xi_w d ;$$

$$a_c = x_w - e_c = \left(1 - \frac{\omega_{mc}}{\omega_{nc}}\right) \cdot \xi_w d ;$$

$$z_c = d - a_c = d - \left(1 - \frac{\omega_{mc}}{\omega_{nc}}\right) \cdot d \xi_w = \left[1 - \left(1 - \frac{\omega_{mc}}{\omega_{nc}}\right) \xi_w\right] \cdot d ;$$

$$F_{cm} = \omega_{nc} \varepsilon_w E_c b d \xi_w .$$

Stiprumo ribinio būvio patikimumas, numatytas EN-2 reglamente, ZI metode užtikrinamas, imant tokias elemento tempiamos ir gniuždomos zonų skaičiuotines reikšmes:

$$F_{sd} = f_{sd} A_s = \frac{f_{sk}}{\gamma_s} A_s = \frac{F_{sk}}{\gamma_s} ;$$

$$F_{cd} = \frac{F_{cm}}{\gamma_{Fc}} = \frac{\omega_{nc} \varepsilon_w E_c b d \xi_w}{\gamma_{Fc}} .$$

ZI metode skaičiavimui panaudojamos tokios jėgų projekcijų ir lenkimo momentų pusiausvyros lygtys:

$$\frac{\omega_{nc} \varepsilon_w E_c b d \xi_w}{\gamma_{Fc}} - f_{sd} A_s = 0 ;$$

$$M_{Rd} = M_{Rd,ZI} = F_{cd} z_c = F_{sd} z_c = \frac{\omega_{nc} \varepsilon_w E_c b d \xi_w}{\gamma_{Fc}} \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{\omega_{mc}}{\omega_{nc}} \right) \xi_w \right] \cdot d ;$$

$$\xi_w^2 + \frac{\omega_{nc}}{(\omega_{nc} - \omega_{mc})} \xi_w - \frac{\gamma_{Fc} M_{Rd}}{(\omega_{nc} - \omega_{mc}) \varepsilon_w E_c b d^2} = 0 .$$

Remiantis prof. I. Židonio tyrimais nustatyta koeficiento $\gamma_{Fc} = 1,95$ reikšmė. Ji yra 1,3 karto didesnė už $\gamma_c = 1,5$ todėl, kad atsarga didinama ne nuo charakteristinių f_{ck} reikšmių 95 % patikimumo lygio, bet nuo vidutinių f_{cm} reikšmių 50 % patikimumo lygio.

Betono gniuždomos zonos dydžio maksimaliai reikšmei nustatyti panaudota formulė:

$$\xi_{lim} = \frac{x_{lim}}{d} = \frac{\varepsilon_{c,lim}}{\varepsilon_{c,lim} + \varepsilon_{sd}} .$$

2.2. Skaičiavimo pavyzdžiai

M_{Rd} stiprumo sijos skerspjūvyje apskaičiavimas ZI metodu ir pagal EN-2 formules

Sijos betonas $f_{ck} = 25$ MPa.

Armavimas:

$$f_{sd} = 364 \text{ MPa}, \quad \varepsilon_{sd} = \varepsilon_{yd} = 1,815 \text{ ‰}.$$

Sijos (1 pav.) skerspjūvio matmenys: $b=0,20\text{m}$, $h=0,50\text{m}$, $d = 0,46\text{m}$.

$$\xi_{lim1} = \frac{\varepsilon_{c1}}{\varepsilon_{c1} + \varepsilon_{sd}} = \frac{2,1}{2,1 + 1,815} = 0,5364 .$$

$$\xi_{lim,u3} = \frac{\varepsilon_{cu3}}{\varepsilon_{cu3} + \varepsilon_{sd}} = \frac{3,5}{3,5 + 1,815} = 0,6581 .$$

M_{Rd} skaičiavimas ZI metodu

$$F_{sd} = 146,2 \text{ kN}.$$

$$\text{Iš 1 lentelės } \frac{F_{cd}}{\xi_{c1} b d} = 11393 \text{ kPa}.$$

$$\frac{F_{cd}}{\xi_{c1}} = 11393 b d = 11390 \cdot 0,2 \cdot 0,46 = 1048 \text{ kN}.$$

$$\xi_{c1} = \frac{F_{cd}}{1048} = \frac{F_{sd}}{1048} = \frac{146,2}{1048} = 0,1395 < \xi_{lim1} = 0,5364 .$$

$$F_{cd} = F_{sd} = 146,2 \text{ kN}.$$

$$\text{Iš 1 lentelės } \left(1 - \frac{\omega_{mc}}{\omega_{nc}} \right) = 0,378 .$$

$$z_c = \left[1 - \left(1 - \frac{\omega_{mc}}{\omega_{nc}} \right) \xi_{c1} \right] \cdot d = [1 - 0,378 \cdot 0,1395] \cdot 0,46 = 0,4357 \text{ m} .$$

$$M_{Rd} = M_{Rd,ZI} = N_{cd} z_c = 146,2 \cdot 0,4357 = 63,70 \text{ kN}\cdot\text{m}.$$

$$\text{Jeigu } F_{sd} = 357,1 \text{ kN, tai } \xi_{c1} = \frac{357,1}{1048} = 0,3407, z_c = 0,4007 \text{ m}, M_{Rd,ZI} = 143,1 \text{ kN}\cdot\text{m}.$$

$$\text{Jeigu } F_{sd} = 533,8 \text{ kN, tai } \xi_{c1} = \frac{533,8}{1048} = 0,5093, z_c = 0,3713 \text{ m}, M_{Rd,ZI} = 198,1 \text{ kN}\cdot\text{m}.$$

$$\text{Jeigu } F_{sd} = 713,7 \text{ kN, tai } \xi_{c1} = \frac{713,7}{1048} = 0,6810 :$$

$$\text{kai imama } \xi_{\lim} = \xi_{\lim 1} = 0,5364, \text{ tai } F_{cd} = 487,2, z_c = 0,3666 \text{ m}, M_{Rd,ZI} = 178,6 \text{ kN}\cdot\text{m};$$

$$\text{kai imama } \xi_{\lim} = \xi_{\lim,u3} = 0,6581, \text{ tai } F_{cd} = 689,7 \text{ kN}, z_c = 0,3454 \text{ m}, M_{Rd,ZI3} = 238,3 \text{ kN}\cdot\text{m}.$$

M_{Rd} skaičiavimas pagal EN-2 formules

$$\text{Kai } f_{ck} = 25 < 50 \text{ MPa, tai } \eta = 1, \lambda = 0,8.$$

$$f_{cd} = \alpha_{cc} f_{ck} / \gamma_c = 0,9 \cdot 25 / 1,5 = 15 \text{ MPa}.$$

$$\eta \cdot f_{cd} b d = 1 \cdot 15 \cdot 10^3 \cdot 0,2 \cdot 0,46 = 1380 .$$

$$\xi_{eff} = \frac{F_{sd}}{\eta \cdot f_{cd} b d} = \frac{146,2}{1380} = 0,1059 .$$

$$\xi = \frac{\xi_{eff}}{\lambda} = \frac{0,1059}{0,8} = 0,1324 < \xi_{\lim,u3} = 0,6581 .$$

$$F_{cd} = F_{sd} = 146,2 \text{ kN}.$$

$$z_c = \left(1 - \frac{\xi_{eff}}{2} \right) d = \left(1 - \frac{0,1059}{2} \right) \cdot 0,46 = 0,4356 \text{ m}.$$

$$M_{Rd,EN-2} = F_{cd} z_c = 146,2 \cdot 0,4356 = 63,69 \text{ kN}\cdot\text{m}.$$

$$\text{Jeigu } F_{sd} = 357,1 \text{ kN, tai } \xi_{eff} = \frac{357,1}{1380} = 0,2588, \xi = \frac{\xi_{eff}}{\lambda} = \frac{0,2588}{0,8} = 0,3235 < \xi_{\lim,u3} = 0,6581,$$

$$z_c = 0,4005 \text{ m}, M_{Rd,EN-2} = 143,0 \text{ kN}\cdot\text{m}.$$

$$\text{Jeigu } F_{sd} = 533,8 \text{ kN, tai } \xi_{eff} = \frac{533,8}{1048} = 0,3868, \xi = \frac{\xi_{eff}}{\lambda} = \frac{0,3868}{0,8} = 0,4835 < \xi_{\lim,u3} = 0,6581,$$

$$z_c = 0,3710 \text{ m}, M_{Rd,EN-2} = 198,1 \text{ kN}.$$

$$\text{Jeigu } F_{sd} = 713,7 \text{ kN, tai } \xi_{eff} = \frac{713,7}{1380} = 0,5172, \xi = \frac{\xi_{eff}}{\lambda} = \frac{0,5172}{0,8} = 0,6465 < \xi_{\lim,u3} = 0,6581,$$

$$z_c = 0,3410 \text{ m}, M_{Rd,EN-2} = 243,4 \text{ kN}\cdot\text{m}.$$

Abiem metodais apskaičiuotų M_{Rd} palyginimas:

$$\text{kai } F_{sd} = 146,2 \text{ kN, armavimo koeficientas } \rho_l = 0,437 \text{ \%, tai } \frac{M_{Ed,ZI}}{M_{Rd,EN-2}} = \frac{63,70}{63,69} = 1,0002;$$

$$\text{kai } F_{sd} = 357,1 \text{ kN, } \rho_l = 1,011 \text{ \%, tai } \frac{M_{Ed,ZI}}{M_{Rd,EN-2}} = \frac{143,1}{143,0} = 1,0007;$$

$$\text{kai } F_{sd} = 533,8 \text{ kN, } \rho_l = 1,596 \text{ \%, tai } \frac{M_{Ed,ZI}}{M_{Rd,EN-2}} = \frac{198,1}{198,1} = 1,0000;$$

$$\text{kai } F_{sd} = 713,7 \text{ kN, } \rho_l = 2,134 \text{ \%, tai } \frac{M_{Ed,ZI}}{M_{Rd,EN-2}} = \frac{178,6}{243,4} = 0,7338, \frac{M_{Ed,ZI3}}{M_{Rd,EN-2}} = \frac{238,3}{243,4} = 0,9790.$$

Armatūros A_{sd} ploto sijos skerspjūvyje apskaičiavimas ZI metodu ir pagal EN-2 formules

A_{sd} skaičiavimas ZI metodu

Sija ta pati, kaip ir skaičiuojant M_{Rd} .

$$M_{Ed} = 198,1 \text{ kN} \cdot \text{m} \cdot f_{sd} = 364 \text{ MPa}.$$

$$N_{cd} = \gamma_{Ncd} N_{cm}, \gamma_{Fcd} = 1,95.$$

$$\xi_w^2 - \frac{\omega_{nc1}}{\omega_{nc1} - \omega_{mc1}} \xi_w + \frac{1,95M}{(\omega_{nc1} - \omega_{mc1})\varepsilon_w E_c b d^2} = 0.$$

$$\text{Iš 1 lentelės } (\omega_{nc1} - \omega_{mc1})\varepsilon_w E_c = 8,408 \text{ MPa ir } \frac{\omega_{nc1}}{\omega_{nc1} - \omega_{mc1}} = 2,65,$$

$$\frac{\gamma_{Fcd} M}{(\omega_{nc1} - \omega_{mc1})\varepsilon_w E_c b d^2} = \frac{1,95 \cdot 198,1}{8,408 \cdot 0,2 \cdot 0,46^2} = 1,0856.$$

$$\xi_w^2 - 2,65 \xi_w + 1,95 \cdot 0,5568 = 0.$$

$$\xi_w = \frac{2,65}{2} - \left(\left(\frac{2,65}{2} \right)^2 - 1,0856 \right)^{\frac{1}{2}} = 0,5064 < 0,5364.$$

Iš 1 lent. $\omega_{nc1}\varepsilon_{c1}E_c = 22,215 \text{ MPa}$, o iš (17) –

$$A_s = \frac{\omega_{nc1}\varepsilon_w E_c b d \xi_w}{\gamma_{Fc} f_{sd}} = \frac{22,215 \cdot 0,2 \cdot 0,46 \cdot 0,5064}{1,95 \cdot 364} = 0,001458 \text{ m}^2 = 14,58 \text{ cm}^2$$

A_{sd} skaičiavimas EN-2 metodu

Sija ta pati, kaip skaičiuojant M_{Rd} .

$$M_{Ed} = 533,8 \text{ kN} \cdot \text{m} \cdot f_{sd} = 364 \text{ MPa}$$

Kai $f_{ck} = 25 < 50 \text{ MPa}$, tai $\eta = 1$, $\lambda = 0,8$.

$$f_{cd} = \alpha_{cc} f_{ck} / \gamma_c = 0,9 \cdot 25 / 1,5 = 15 \text{ MPa.}$$

$$\mu_{Eds} = \frac{M_{Eds}}{\eta \cdot f_{cd} b d^2} = \frac{198,1 \cdot 10^3}{1 \cdot 15 \cdot 0,2 \cdot 0,46^2} = 0,312.$$

$$\xi_{eff} = 1 - \sqrt{1 - 2 \cdot 0,312} = 0,3868.$$

$$\xi = \frac{\xi_{eff}}{\lambda} = \frac{0,3868}{0,8} = 0,4835 < \xi_{lim, u3} = 0,6581.$$

$$A_{sd} = \frac{\eta \cdot f_{cd} b d \xi_{eff}}{f_{sd}} = \frac{1 \cdot 15 \cdot 0,2 \cdot 0,46 \cdot 0,3868}{364} = 14,6644 \cdot 10^{-4} m^2.$$

Daugiau skaičiavimo rezultatų ir jų tarpusavio palyginimas pateiktas 2.2 lentelėje. Šioje lentelėje yra ir skaičiavimo duomenų ne tik kai $\gamma_{Fc} = 1,95$, bet ir kai $\gamma_{Fc} = 1,5$ bei kai $\gamma_{Fc} = 2,25$. Tinkamiausia yra $\gamma_{Fc} = 1,95$ reikšmė.

2.1 lentelė. Betono stiprumo ir deformacinės savybės

f_{ck} (MPa)	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90
$f_{cm} = f_{ck} + 8$ (MPa)	20	24	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98
$E_{cm} = 22(f_{cm}/10)^{0,3}$ (GPa); (f_{cm} , MPa)	27	29	30	31	33	34	35	36	37	38	39	41	42	44
$E_c = 1,05 E_{cm}$ (GPa)	28,35	30,45	31,5	32,55	34,65	35,7	36,75	37,8	38,85	39,9	40,95	43,05	44,1	46,2
$\varepsilon_{c1} = 0,7 f_{cm}^{0,31} \leq 2,8$ (‰); (f_{cm} , MPa)	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,25	2,3	2,4	2,45	2,5	2,6	2,7	2,8	2,8
$\varepsilon_{cu1} = 3,5$ (‰), kai $f_{ck} \leq 50$ MPa $\varepsilon_{cu1} = 2,8 + 2,7[(98 - f_{cm})/10]^4$ (‰), kai $f_{ck} \geq 50$ MPa	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,2	3,0	2,8	2,8	2,8
$\nu_{c1} = f_{cm}/(1,05 E_{cm} \varepsilon_{c1})$ (f_{cm} , MPa; E_{cm} , GPa; ε_{c1} , ‰)	0,392	0,415	0,444	0,483	0,498	0,535	0,568	0,584	0,609	0,632	0,639	0,671	0,713	0,758
$c_1 = 3\nu_{c1} - 2$	-0,824	-0,755	-0,668	-0,551	-0,506	-0,395	-0,296	-0,248	-0,173	-0,104	-0,083	0,0130	0,139	0,274
$c_2 = 1 - 2\nu_{c1}$	0,216	0,1700	0,1120	0,0340	0,0040	-0,070	-0,136	-0,168	-0,218	-0,264	-0,278	-0,342	-0,426	-0,516
$\omega_{nc1} = \frac{1}{2} + \frac{c_1}{3} \eta_w \frac{c_2}{4} \eta_w^2$	0,279	0,291	0,305	0,325	0,332	0,351	0,367	0,375	0,390	0,397	0,403	0,419	0,440	0,462
$\omega_{mc1} = \frac{1}{3} + \frac{c_1}{4} \eta_w \frac{c_2}{5} \eta_w^2$														
$\eta_w = \varepsilon_w / \varepsilon_{c1} = 1$ $\varepsilon_w = \varepsilon_{c1}$	0,1705	0,1786	0,1887	0,202	0,208	0,221	0,232	0,238	0,248	0,253	0,257	0,268	0,283	0,299
$e_{0,c1} / x_w = M_{c1} / F_{c1} = \omega_{mc1} / \omega_{nc1}$ (m)	0,611	0,614	0,619	0,622	0,627	0,60	0,632	0,635	0,636	0,637	0,638	0,640	0,643	0,647
$\Delta \omega_{c1} = \omega_{nc1} - \omega_{mc1}$	0,1085	0,1124	0,1163	0,123	0,124	0,130	0,135	0,137	0,142	0,144	0,146	0,151	0,157	0,163
$1 - e_{0,c1} = 1 - \omega_{mc} / \omega_{nc} = \Delta \omega_{c1} / \omega_{nc}$	0,389	0,386	0,381	0,378	0,373	0,370	0,368	0,365	0,364	0,363	0,362	0,360	0,357	0,353
$\omega_{nc1} / \Delta \omega_{c1}$	2,57	2,59	2,62	2,65	2,68	2,70	2,72	2,74	2,75	2,76	2,77	2,78	2,80	2,83
$\Delta \omega \varepsilon_{c1} E_c$ MPa	5,537	6,503	7,327	8,408	9,453	10,442	11,411	12,429	13,516	14,364	15,545	17,551	19,386	21,086
$\varepsilon_{c1} E_c$ MPa	51,030	57,855	63,000	68,355	76,230	80,325	84,525	90,720	95,183	99,750	106,47	116,24	123,48	129,36
$10^3 \omega_{nc1} \varepsilon_{c1} E_c = F_{cm} / \xi_{c1} b d$ (kPa)	14237	16836	19215	22215	25308	28194	31021	34020	36931	39800	42907	48702	54331	59764
$\frac{10^3}{1,95} \omega_{nc1} \varepsilon_{c1} E_c = \frac{F_{cm}}{\gamma_{c1} \xi_{c1} b d} = \frac{F_{cd}}{\xi_{c1} b d}$ (kPa)	7301	8634	9854	11393	12979	14459	15908	17446	18939	20410	22004	24976	27862	30648

2.2 lentelė. Sijų M_{Rd} stiprumo skaičiavimo ZI ir EN-2 metodais palyginimas

		f_{ck} (MPa)	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90
Sijos armavimo koeficientas	$\rho_l = 0,437$ %	$M_{Rd,ZI}$	61,547	62,458	63,103	63,688	64,163	64,500	64,767	65,000	65,176	65,348	65,478	65,695	65,869	66,007
		$M_{Rd,EN-2}$	59,819	61,675	62,786	63,678	64,270	64,694	65,008	65,256	65,454	65,578	65,673	65,826	65,929	66,002
		$M_{Rd,ZI} / M_{Rd,EN-2}$	1,0289	1,0127	1,0050	1,0002	0,9983	0,9970	0,9963	0,9961	0,9958	0,9965	0,9970	0,9980	0,9991	1,0001
		$M_{Rd,ZI}^* / M_{Rd,EN-2}$	1,0508	1,0508	1,0203	1,0130	1,0094	1,0068	1,0051	1,0039	1,0030	1,0031	1,0032	1,0034	1,0039	1,0044
		$M_{Rd,ZI}^{**} / M_{Rd,EN-2}$	1,0142	1,0008	0,9949	0,9916	0,9909	0,9905	0,9904	0,9908	0,9908	0,9921	0,9929	0,9944	0,9959	0,9972
	$\rho_l = 1,011$ %	$M_{Rd,ZI}$	107,506	135,728	139,578	143,069	145,901	147,916	149,505	150,897	151,927	152,974	153,748	154,377	156,082	156,907
		$M_{Rd,EN-2}$	118,197	131,039	137,680	143,001	146,535	149,070	150,963	152,445	153,623	154,337	154,926	155,819	156,426	156,872
		$M_{Rd,ZI} / M_{Rd,EN-2}$	0,9095	1,0358	1,0138	1,0005	0,9957	0,9923	0,9903	0,9898	0,9890	0,9912	0,9929	0,9951	0,9978	1,0002
		$M_{Rd,ZI}^* / M_{Rd,EN-2}$	1,1686	1,0860	1,0551	1,0346	1,0246	1,0175	1,0129	1,0101	1,0075	1,0080	1,0080	1,0087	1,0099	1,0110
		$M_{Rd,ZI}^{**} / M_{Rd,EN-2}$	0,9095	0,9917	0,9862	0,9777	0,9764	0,9754	0,9803	0,9764	0,9766	0,9799	0,9820	0,9860	0,9898	0,9930
	$\rho_l = 1,596$ %	$M_{Rd,ZI}$	107,506	129,953	151,588	198,21	204,544	209,052	212,604	215,714	218,017	220,356	222,091	224,990	227,302	229,147
		$M_{Rd,EN-2}$	118,197	157,597	196,996	198,07	205,97	211,63	215,87	219,15	221,79	223,40	224,73	226,70	228,09	229,05
		$M_{Rd,ZI} / M_{Rd,EN-2}$	0,9095	0,8245	0,8142	1,0007	0,9931	0,9878	0,9849	0,9843	0,9830	0,9864	0,9883	0,9925	0,9965	1,0004
		$M_{Rd,ZI}^* / M_{Rd,EN-2}$	1,1686	1,3644	1,2369	1,0911	1,0559	1,0390	1,0276	1,0201	1,0157	1,0116	1,0124	1,0124	1,0134	1,0150
		$M_{Rd,ZI}^{**} / M_{Rd,EN-2}$	0,9095	0,8245	0,8142	0,9018	0,9628	0,9616	0,9617	0,9636	0,9641	0,9692	0,9724	0,9786	0,9844	0,9895
	$\rho_l = 2,134$ %	$M_{Rd,ZI}$	107,506	129,953	151,588	178,620	207,434	263,074	269,424	274,985	279,101	283,284	286,386	291,570	295,703	299,001
		$M_{Rd,EN-2}$	118,197	157,597	196,996	243,423	257,556	267,691	275,257	281,145	285,856	288,746	291,102	294,635	297,097	298,846
		$M_{Rd,ZI} / M_{Rd,EN-2}$	0,9095	0,8246	0,7695	0,7338	0,8054	0,9828	0,9788	0,9781	0,9764	0,9811	0,9838	0,9896	0,9953	1,0005
		$M_{Rd,ZI}^* / M_{Rd,EN-2}$	1,3644	1,2369	1,1542	1,0813	1,0558	1,0390	1,0282	1,0218	1,0161	1,0171	1,0170	1,0184	1,0196	1,0232
		$M_{Rd,ZI}^{**} / M_{Rd,EN-2}$	0,9095	0,8246	0,7695	0,7338	0,8054	0,8717	0,9411	0,9492	0,9501	0,9573	0,9618	0,9706	0,9785	0,9855

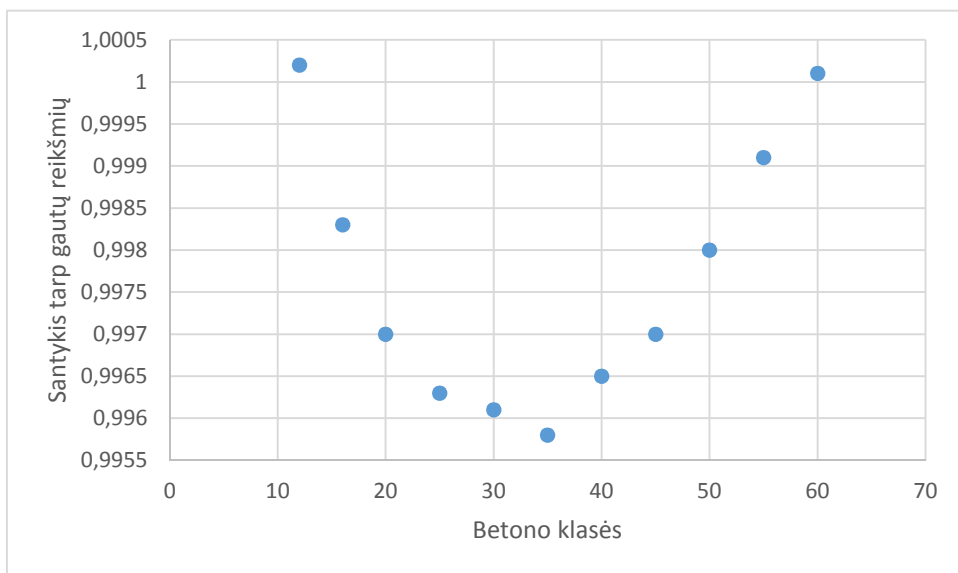
$M_{Rd,ZI} / M_{Rd,EN-2}$ – čia, apskaičiuojant $M_{Rd,ZI}$ reikšmę, (18) formulėje imta $\gamma_{Fc} = 1,95$.

$M_{Rd,ZI}^* / M_{Rd,EN-2}$ – čia, apskaičiuojant $M_{Rd,ZI} = M_{Rd,ZI}^*$ reikšmę, (18) formulėje imta $\gamma_{Fc} = 1,5$.

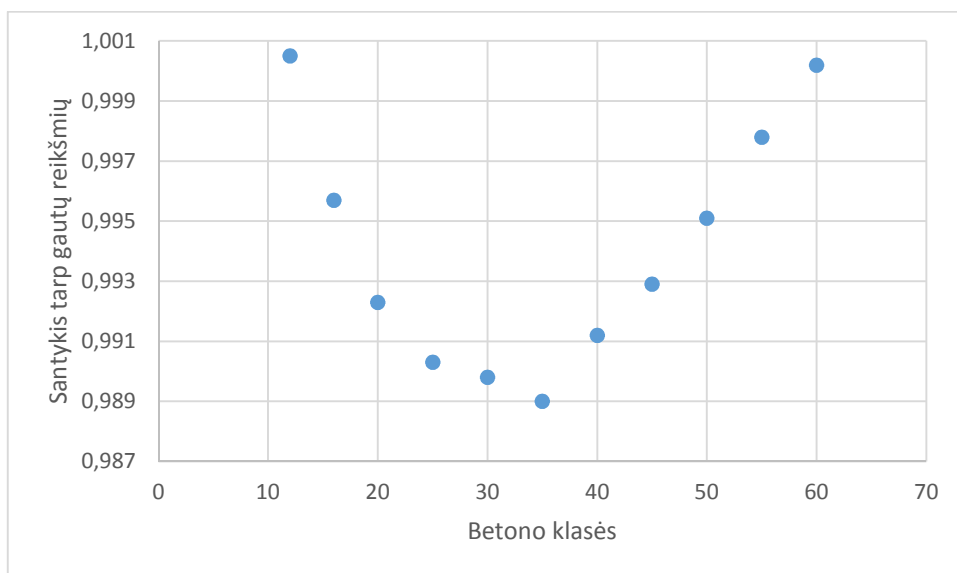
$M_{Rd,ZI}^{**} / M_{Rd,EN-2}$ – čia, apskaičiuojant $M_{Rd,ZI} = M_{Rd,ZI}^{**}$ reikšmę, (18) formulėje imta $\gamma_{Fc} = 2,25$.

2.3. Lyginamoji analizė

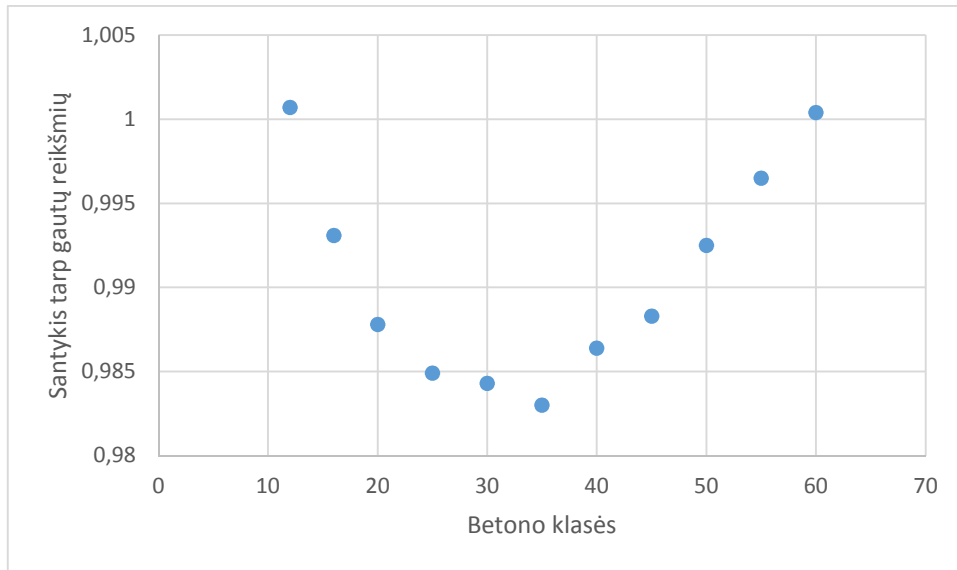
2.2 lentelėje matome, kad rezultatų nesąryšis realaus armavimo atveju maksimaliai siekia 2 %. Procentalus rezultatų tarp EN-2 bei ZI išsidėstymas pateiktas 2.5 – 2.8 pav.



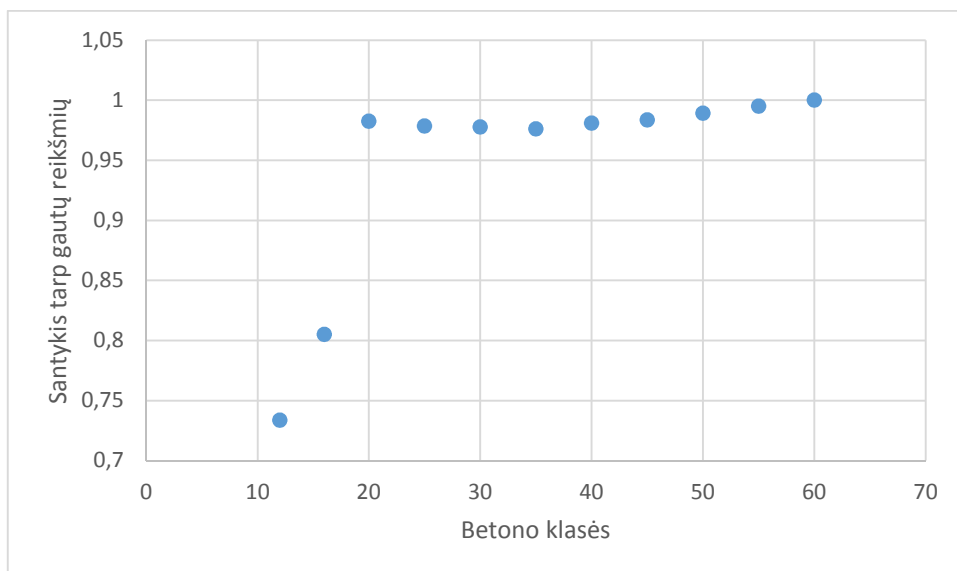
2.5 pav. Lenkimo momentų rezultatų nesutapimas tarp EN bei ZI metodų, kai armavimo procentas lygus 0,437 %



2.6 pav. Lenkimo momentų rezultatų nesutapimas tarp EN bei ZI metodų, kai armavimo procentas lygus 1,011 %



2.7 pav. Lenkimo momentų rezultatų nesutapimas tarp EN bei ZI metodų, kai armavimo procentas lygus 1,596 %



2.8 pav. Lenkimo momentų rezultatų nesutapimas tarp EN bei ZI metodų, kai armavimo procentas lygus 2,134 %

Iš skaičiavimo skirtingais metodais rezultatų palyginimo matome, kad abiem metodais gaunami geri rezultatai, kai sijų armavimas yra įprastas.

EN-2 norminiuose reglamentuose riba tarp normaliai ir gausiai armuotų elementų apskaičiuojama laikant, kad $\varepsilon_{c,lim} = \xi_{lim, u3}$. Gausiai armuotiems elementams imama $\xi_c = \xi_{lim, u3}$.

Skaičiuojant ZI metodu, imta $\varepsilon_{c,lim} = \xi_{c1}$, – gautos $M_{Rd, ZI}$ reikšmės yra mažesnės už $M_{Rd, EN-2}$ reikšmes (žr. 2.2 lent.). Jeigu $\varepsilon_{c,lim} = \xi_{lim, u3}$, kai betono stipris yra mažas, gaunamos jau per didelės $M_{Rd, ZI}$ reikšmės.

Gausiai armuotų sijų M_{Rd} apskaičiavimo naudotu būdu nelogiškumas yra jau tai, kad ribinis gniuždomos zonos dydis nepriklauso nuo armavimo procento.

3. KOMPOZITINIŲ PLOKŠČIŲ LENKIAMOSIOS GALIOS NUSTATYMAS EC BEI ŽI METODAIS

Didėjant statybos apimtims sparčiai auga poreikis naujų konstrukcinių sprendimų. To pasekoje gali būti pradėti naudoti kompoziciniai konstrukcijų sprendiniai. Kompozitinės perdangos plokštės yra naudojamos tiek vienaukštėje, tiek daugiaaukštėje statyboje. Jos gali būti naudojamos gyvenamųjų namų, pramonės ir visuomeninių pastatų statybai. Kompozitinės perdangos plokštės gali būti įvairaus skerspjūvio. Norint sumažinti medžiagų (betono) sąnaudas stengiamasi kuo labiau išnaudoti metalinį profiliuotą paklotą. Todėl kiekvienu atveju būtina atlikti plokščių stiprio skaičiavimus atsižvelgiant į technologijoje numatytus plokščių skerspjūvio matmenis.

Šiuo metu kompozitinių elementų skaičiavimas Lietuvoje nėra įteisintas tam tikru įstatiminių dokumentu. Tuo tarpu Europos sąjungoje įsigaliojo Euronormos EN 1994-1-1 „Design of composite structures“ skirtos kompozitinių konstrukcijų projektavimui, tai ateityje Lietuvoje visos kompozitinės konstrukcijos bus projektuojamos pagal šias normas.

Nors Europos normose yra taikomi tie patys skaičiavimo principai, kaip ir EN 1992-1-1 „Design of concrete structures“ bei EN 1993-1-1 „Design of steel structures“ pagrįsti ribinių būvių metodu, tačiau yra įvertinama skirtingai skaičiuojant kompozitinę konstrukcijos elgseną.

Skaičiavimo metode daugelis faktorių įvertinama empirinėmis formulėmis. Todėl skyriuje atliekama siūlomo ŽI metodo ir EN skaičiavimo metodų analizė ir palyginimas.

Norint nustatyti skaičiavimuose naudojamų formulių tinkamumą bei tikslumą konstrukcijų stipriui būtina atlikti palyginamuosius skaičiavimus. Pagal skaičiavimus skyriuje numatyta įvertinti atskirų faktorių įtaką konstrukcijų skaičiuotinėms charakteristikoms.

Skyriuje nagrinėjamos kompozitinės perdangos plokštės, kurių skerspjūvio aukščiai yra vienodi tačiau skiriasi perdangos lakšto storis (armavimo koeficientas). Standartinis plokščių plotis – 1,0 m.

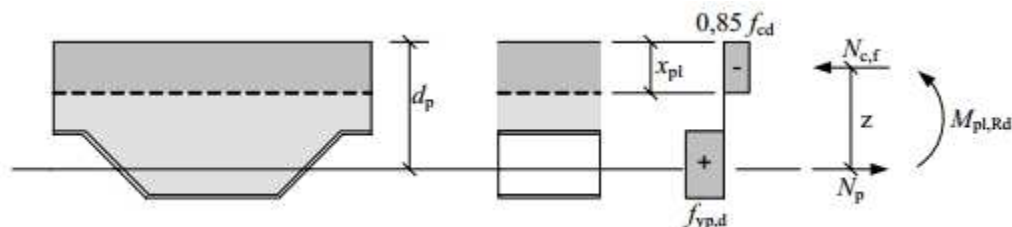
Konstrukcijų analizei būtina atlikti pakankamai didelį kiekį skaičiavimų. Skaičiavimams atlikti naudota programa Microsoft Office - Excel . Paruoštas algoritmas galės būti naudojamas tolesniam kompozitinių plokščių projektavimui.

3.1. Skaičiavimas pagal EC 1994-1-1

Kompozitinės perdangos plokštės skaičiavimai atliekami pagal EN 1994-1-1, EN 1993-1-1 bei EN 1992-1-1 metodiką.

Lenkiamasis atsparumo momentas turėtų būti skaičiuojamas nuo įtempių pasiskirstymo, kaip pavaizduota 3.1. paveikslėlyje, kai neutralioji ašis yra virš metalinio lakšto. Skaičiavimams priimama supaprastinta

gniuždomo betono deformacijų pasiskirstymo plotas. Medžiagų savybių skaičiuotinės reikšmės gauti betonui turi būti vartojamos dalinis koeficientas γ_C (EC 1994-1-1). Skaičiuotinis gniuždomasis stipris turi būti apskaičiuojamas taip:



3.1 pav. Kompozitinės plokštės skaičiuojamasis skerspjūvis

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_C}; N / mm^2;$$

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

γ_C – betono dalinis koeficientas skerspjūviu laikomajai galiai nustatyti.

Skaičiuotinis lakštinio profiliuotio plieno stipris pagal takumo ribą gaunamas:

$$f_{yp,d} = \frac{f_{yp,k}}{\gamma_{M0}}; N / mm^2;$$

čia: $f_{yp,k}$ – charakteristinis lakštinio profiliuotio plieno stipris pagal takumo ribą;

γ_{M0} – plieno dalinis koeficientas skerspjūviu laikomajai galiai nustatyti.

Atstumas tarp plastinės neutraliosios ašies ir betono plokštės labiausiai gniuždomo sluoksnio krašto (gniuždomosios srities aukštis) apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\chi_{pl} = \frac{A_p \cdot f_{y,d}}{0.85 \cdot b \cdot f_{cd}}; N / mm^2;$$

čia: A_p – plieninio lakštinio profiliuotio skerspjūvio plotas;

b – plieninio profiliuotio juostos plotis.

Apskaičiavę atstumą χ_{pl} galime apskaičiuoti sudėtinio plieno ir betono skerspjūvio plastinę lenkiamąją galią (priimama sąlyga, kad plokštėje yra visiška sąveika.):

$$M_{pl,Rd} = A_p \cdot f_{yd} \cdot (d_p - \chi_{pl} / 2); kNm / m;$$

čia: d_p – atstumas nuo plieninio lakštinio profiliuotio sunkio centro iki kompozitinės plokštės labiausiai gniuždomo sluoksnio krašto.

3.2. Skaičiavimas pagal kreivinę betono diagramą (ZI metodas)

Laikomosios galios skaičiavimai atliekami naudojant EN 1994-1-1 formules bei pagal ZI skaičiavimo modelį.

Lenkiamasis atsparumo momentas turėtų būti skaičiuojamas nuo įtempių pasiskirstymo, kaip pavaizduota antrame skyriuje esančiame 2.1 pav., kai neutralioji ašis yra virš metalinio lakšto. Skaičiavimams priimama kreivalinijinė gniuždomo betono įtempių-deformacijų pasiskirstymo plotas.

Medžiagų patikimumą užtikriname pagal 2 skyriuje pateiktą skaičiavimo metodiką.

Skaičiuotinis gniuždomasis stipris turi būti apskaičiuojamas taip:

$$f_{cd} = \frac{f_{cm}}{\gamma_{Fc}}; N / mm^2;$$

čia: f_{cm} - vidutinis gniuždomasis betono stipris.

γ_{Fc} - veikiančios jėgos dalinis koeficientas skerspjūviu laikomajai galiai nustatyti.

Skaičiuotinis lakštinio profiliuoto plieno stipris pagal takumo ribą gaunamas:

$$f_{yp,d} = \frac{f_{yp,k}}{\gamma_{M0}}; N / mm^2;$$

čia: $f_{yp,k}$ – charakteristinis lakštinio profiliuoto plieno stipris pagal takumo ribą;

γ_{M0} – plieno dalinis koeficientas skerspjūviu laikomajai galiai nustatyti.

Atstumas tarp plastinės neutraliosios ašies ir betono plokštės labiausiai gniuždomo sluoksnio krašto (gniuždomosios srities aukštis) apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\chi_{pl} = \frac{A_p \cdot f_{y,d}}{0.85 \cdot b \cdot f_{cd}}; N / mm^2;$$

čia: A_p – plieninio lakštinio profiliuoto skerspjūvio plotas

b – plieninio profiliuoto juostos plotis.

Apskaičiavę atstumą χ_{pl} galime apskaičiuoti sudėtinio plieno ir betono skerspjūvio plastinę lenkiamąją galią (priimama sąlyga, kad plokštėje yra visiška sąveika):

$$M_{pl,Rd} = A_p \cdot f_{yd} \cdot (d_p - \chi_{pl} / 2); kNm / m;$$

čia: d_p – atstumas nuo plieninio lakštinio profiliuoto sunkio centro iki kompozitinės plokštės labiausiai gniuždomo sluoksnio krašto.

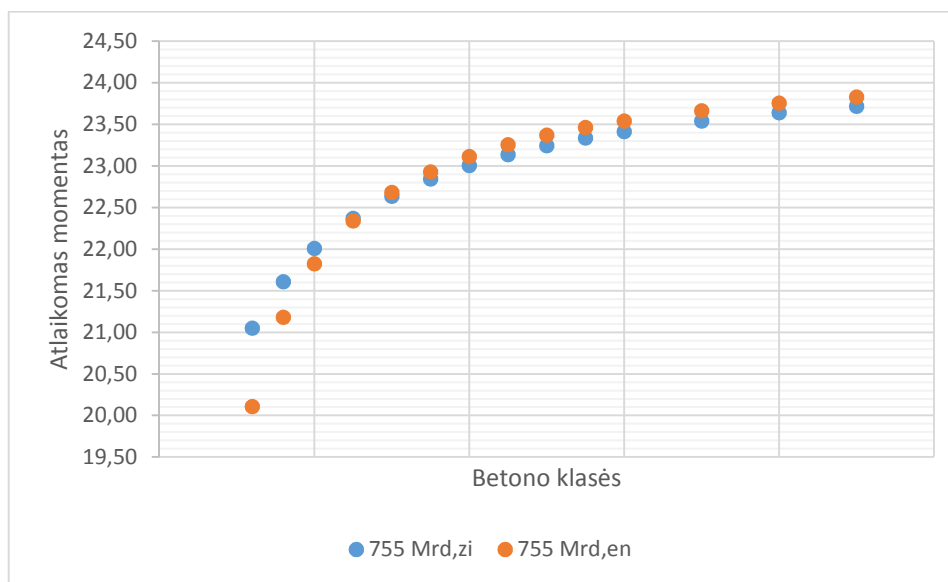
3.3. Skaičiavimo rezultatų palyginimas

Kompozitinės perdangos plokštės yra apskaičiuotos remiantis EN 1994–1–1 „Design of composite structures“ bei pagal ZI siūlomą metodiką. Skaičiavimai atlikti įvertinant tuos pačius kompozitinių perdangos plokščių skerspjūvio matmenis, betono, armatūros charakteristikas ir vienodą armavimą. Skaičiavimų tikslas palyginti dvi skaičiavimo metodikas.

Apskaičiavus plokščių statmenojų pjūvio stiprį nustatyta, kad skerspjūvyje esant mažam bei vidutiniam armavimo kiekiui, bei kai naudojamos konstrukcinio betono klasės skaičiavimo rezultatai gerai sutampa (3.1 - 3.5 lent.). Tačiau didėjant armavimo procentui plokščių statmenojų pjūvio skaičiuotiniai stipriai skiriasi. Plokštės skaičiuotinis stipris apskaičiuotas panaudojant ZI metodiką yra didesnis už skaičiuotinį stiprį apskaičiuotą pagal EN 1994-1-1 metodiką. Plokštei šis skirtumas siekia iki 12.5 %, tačiau naudotina konstrukcinio betono minimali klasė leidžia taikyti ZI metodą skaičiuojant statmenojų pjūvio lenkiamąjį stiprį.

3.1 lentelė. Lenkimo momentai, kai armavimo procentas lygus 755 cm²

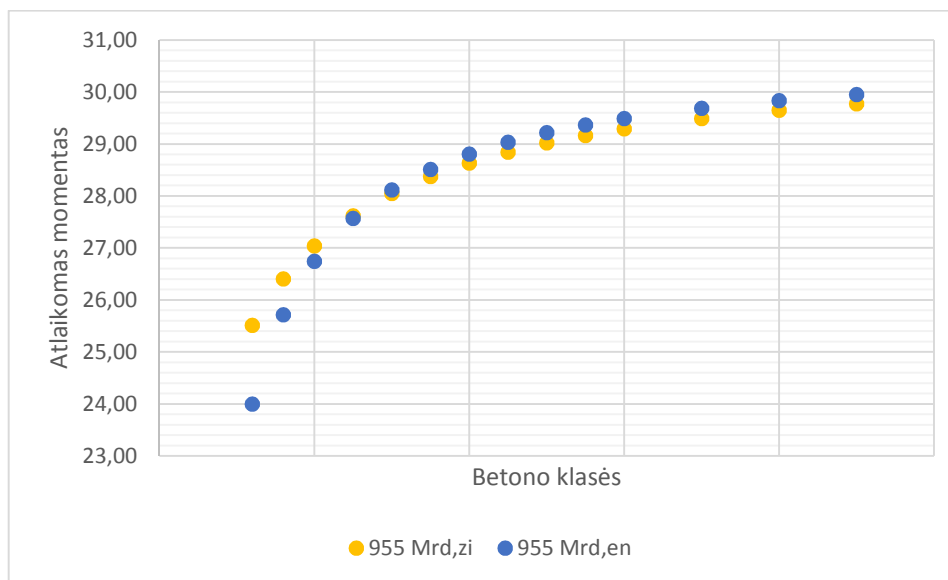
F _{ck} (MPa)		12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90
755	M _{rd,zi}	21.05	21.61	22.01	22.37	22.64	22.84	23.01	23.14	23.25	23.34	23.42	23.54	23.64	23.72
	M _{rd,en}	20.11	21.18	21.83	22.34	22.68	22.93	23.11	23.26	23.37	23.47	23.54	23.67	23.76	23.83
	M _{rd,zi} /M _{rd,en}	1.047	1.020	1.008	1.001	0.998	0.996	0.995	0.994	0.994	0.994	0.994	0.994	0.995	0.995



3.2 pav. Lenkimo momentai, kai armavimo procentas lygus 755 cm²

3.2 lentelė. Lenkimo momentai, kai armavimo procentas lygus 955 cm²

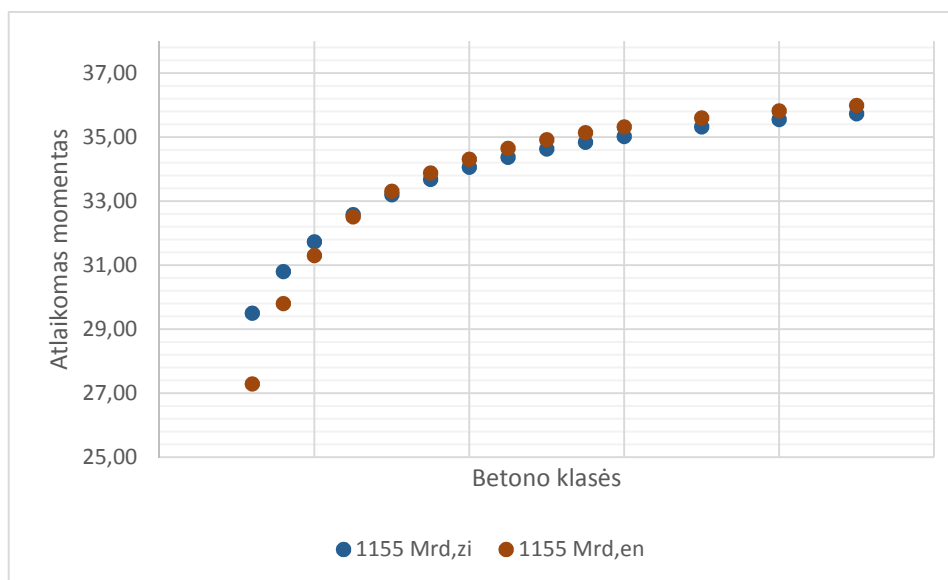
F_{ck} (MPa)		12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90
955	M_{rd,zi}	25.51	26.40	27.04	27.62	28.05	28.37	28.63	28.84	29.02	29.17	29.29	29.49	29.65	29.77
	M_{rd,en}	24.00	25.72	26.75	27.57	28.12	28.51	28.81	29.03	29.22	29.37	29.49	29.69	29.84	29.95
	M_{rd,zi}/M_{rd,en}	1.063	1.026	1.011	1.001	0.997	0.995	0.994	0.993	0.993	0.993	0.993	0.993	0.993	0.994



3.3 pav. Lenkimo momentai, kai armavimo procentas lygus 955 cm²

3.3 lentelė. Lenkimo momentai, kai armavimo procentas lygus 1155 cm²

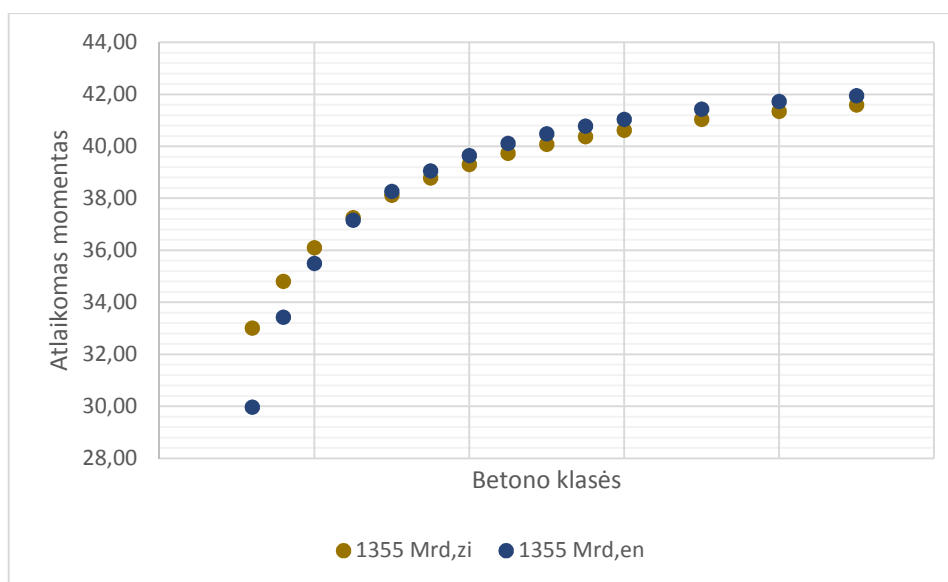
F_{ck} (MPa)		12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90
1155	M_{rd,zi}	29.49	30.80	31.73	32.58	33.21	33.69	34.07	34.37	34.63	34.84	35.03	35.32	35.55	35.73
	M_{rd,en}	27.29	29.80	31.30	32.51	33.31	33.89	34.32	34.65	34.92	35.14	35.32	35.61	35.82	35.99
	M_{rd,zi}/M_{rd,en}	1.081	1.033	1.013	1.002	0.996	0.994	0.992	0.992	0.991	0.991	0.991	0.991	0.992	0.992



3.4 pav. Lenkimo momentai, kai armavimo procentas lygus 1155 cm²

3.4 lentelė. Lenkimo momentai, kai armavimo procentas lygus 1355 cm²

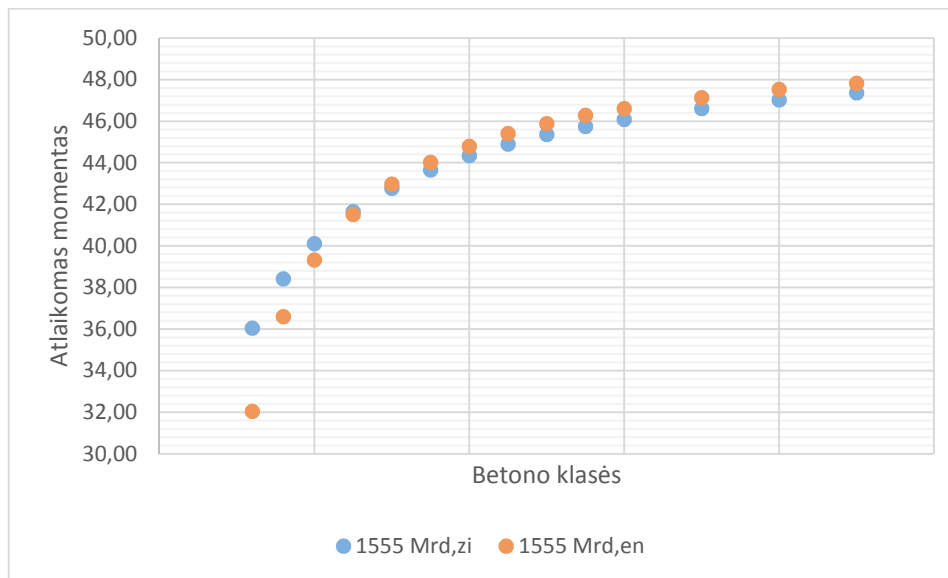
F _{ck} (MPa)		12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90
1355	M _{rd,zi}	33.01	34.81	36.09	37.26	38.12	38.78	39.30	39.72	40.08	40.37	40.62	41.03	41.34	41.59
	M _{rd,en}	29.97	33.43	35.50	37.16	38.26	39.05	39.65	40.11	40.48	40.78	41.03	41.42	41.72	41.95
	M _{rd,zi} /M _{rd,en}	1.101	1.041	1.016	1.002	0.996	0.992	0.991	0.990	0.9901	0.990	0.990	0.990	0.991	0.991



3.5 pav. Lenkimo momentai, kai armavimo procentas lygus 1355 cm²

3.5 lentelė. Lenkimo momentai, kai armavimo procentas lygus 1555 cm²

F_{ck} (MPa)		12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90
1555	M_{rd,zi}	36.06	38.42	40.11	41.65	42.78	43.65	44.34	44.90	45.36	45.75	46.08	46.62	47.03	47.36
	M_{rd,en}	32.05	36.60	39.33	41.52	42.98	44.02	44.80	45.40	45.89	46.29	46.62	47.14	47.53	47.83
	M_{rd,zi}/M_{rd,en}	1.125	1.049	1.019	1.003	0.995	0.991	0.989	0.988	0.988	0.988	0.988	0.989	0.989	0.990



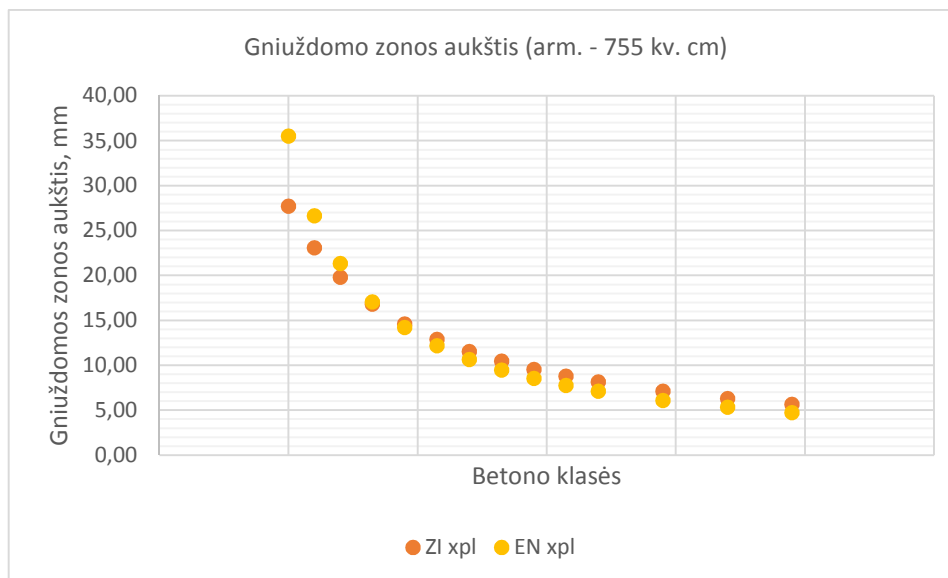
3.6 pav. Lenkimo momentai, kai armavimo procentas lygus 1555 cm²

Skirtumą sąlygoja visiškai skirtingi metodikose taikomi skaičiavimo principai.

Tyrimai parodė, kad skirtingi faktoriai skirtingai sąlygoja skaičiuotines plokščių charakteristikas apskaičiuotas pagal ZI ir EN-1994 metodikas, todėl buvo atliktas projektuojamų kompozitinių perdangos plokščių skirtingų charakteristikų palyginimas.

3.6 lentelė. Apskaičiuoti skaičiuotiniai betono stipriai bei gniuždomos zonos aukštis EN bei ZI metodais, kai armavimo procentas lygus 755 cm²

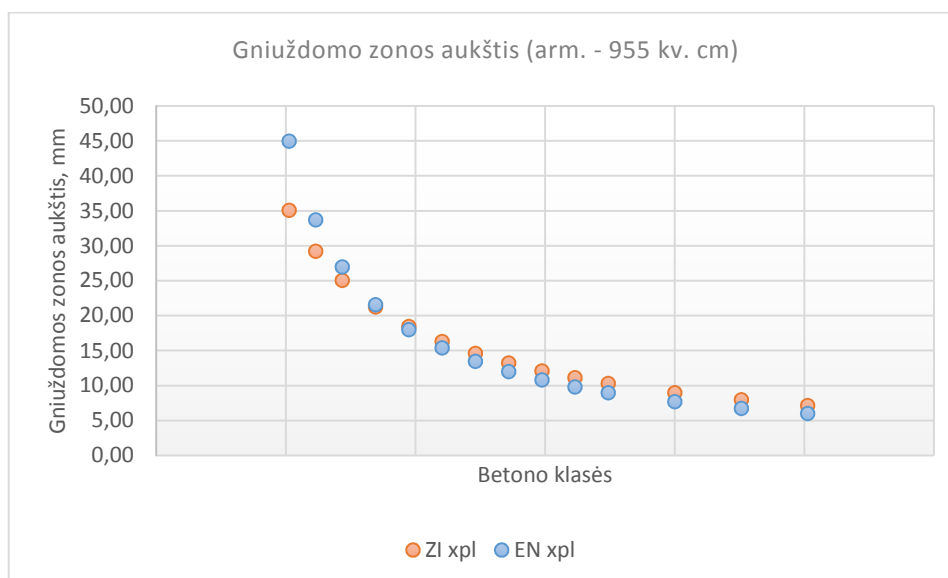
ZI	f _{cd}	10.26	12.31	14.36	16.92	19.49	22.05	24.62	27.18	29.74	32.31	34.87	40.00	45.13	50.26
	x _{pl}	27.71	23.09	19.79	16.80	14.59	12.89	11.55	10.46	9.56	8.80	8.15	7.11	6.30	5.66
EN	f _{cd}	8.00	10.67	13.33	16.67	20.00	23.33	26.67	30.00	33.33	36.67	40.00	46.67	53.33	60.00
	x _{pl}	35.53	26.65	21.32	17.05	14.21	12.18	10.66	9.47	8.53	7.75	7.11	6.09	5.33	4.74



3.7 pav. Apskaičiuotas gniuždomo betono zonos aukštis EN ir ZI metodikomis, kai armavimo procentas lygus 755 cm^2

3.7 lentelė. Apskaičiuoti skaičiuotiniai betono stipriai bei gniuždomos zonos aukštis EN bei ZI metodais, kai armavimo procentas lygus 955 cm^2

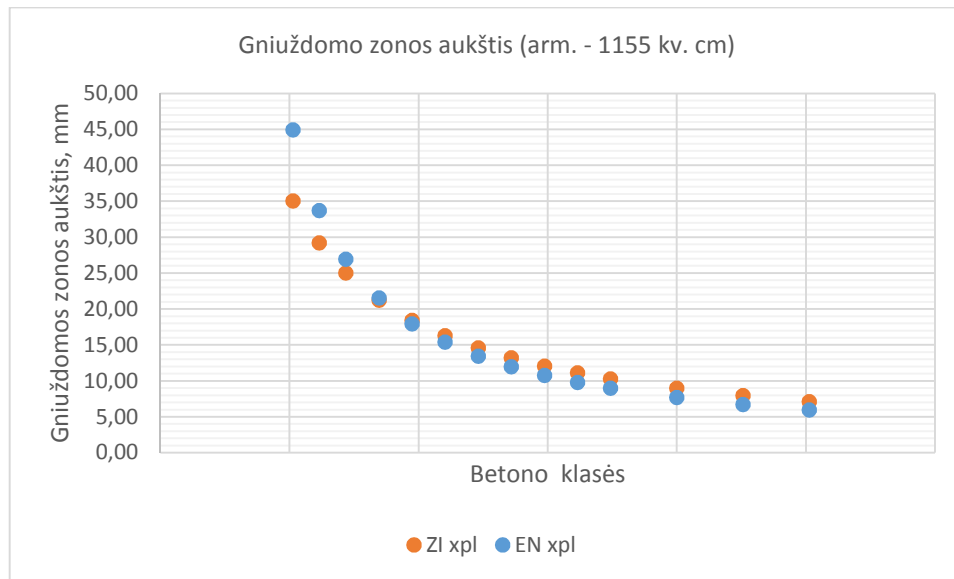
ZI	f_{cd}	10.26	12.31	14.36	16.92	19.49	22.05	24.62	27.18	29.74	32.31	34.87	40.00	45.13	50.26
	x_{pl}	35.05	29.21	25.04	21.24	18.45	16.30	14.61	13.23	12.09	11.13	10.31	8.99	7.97	7.15
EN	f_{cd}	8.00	10.67	13.33	16.67	20.00	23.33	26.67	30.00	33.33	36.67	40.00	46.67	53.33	60.00
	x_{pl}	44.94	33.71	26.96	21.57	17.98	15.41	13.48	11.98	10.79	9.81	8.99	7.70	6.74	5.99



3.8 pav. Apskaičiuotas gniuždomo betono zonos aukštis EN ir ZI metodikomis, kai armavimo procentas lygus 955 cm^2

3.8 lentelė. Apskaičiuoti skaičiuotiniai betono stipriai bei gniuždomos zonos aukštis EN bei ZI metodais, kai armavimo procentas lygus 1155 cm^2

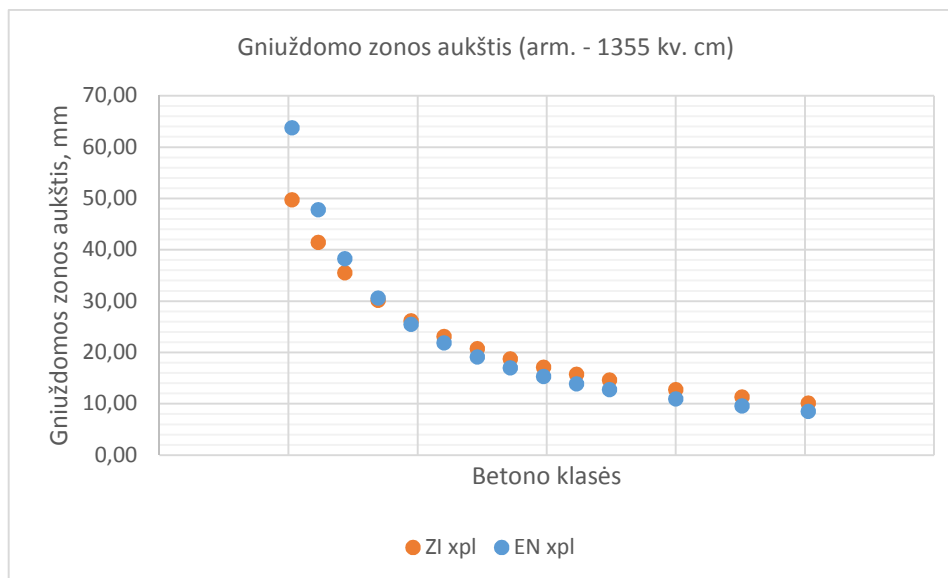
ZI	f_{cd}	10.26	12.31	14.36	16.92	19.49	22.05	24.62	27.18	29.74	32.31	34.87	40.00	45.13	50.26
	x_{pl}	42.40	35.33	30.28	25.69	22.31	19.72	17.66	16.00	14.62	13.46	12.47	10.87	9.64	8.65
EN	f_{cd}	8.00	10.67	13.33	16.67	20.00	23.33	26.67	30.00	33.33	36.67	40.00	46.67	53.33	60.00
	x_{pl}	54.35	40.76	32.61	26.09	21.74	18.64	16.31	14.49	13.04	11.86	10.87	9.32	8.15	7.25



3.9 pav. Apskaičiuotas gniuždomo betono zonos aukštis EN ir ZI metodikomis, kai armavimo procentas lygus 1155 cm^2

3.9 lentelė. Apskaičiuoti skaičiuotiniai betono stipriai bei gniuždomos zonos aukštis EN bei ZI metodais, kai armavimo procentas lygus 1355 cm^2

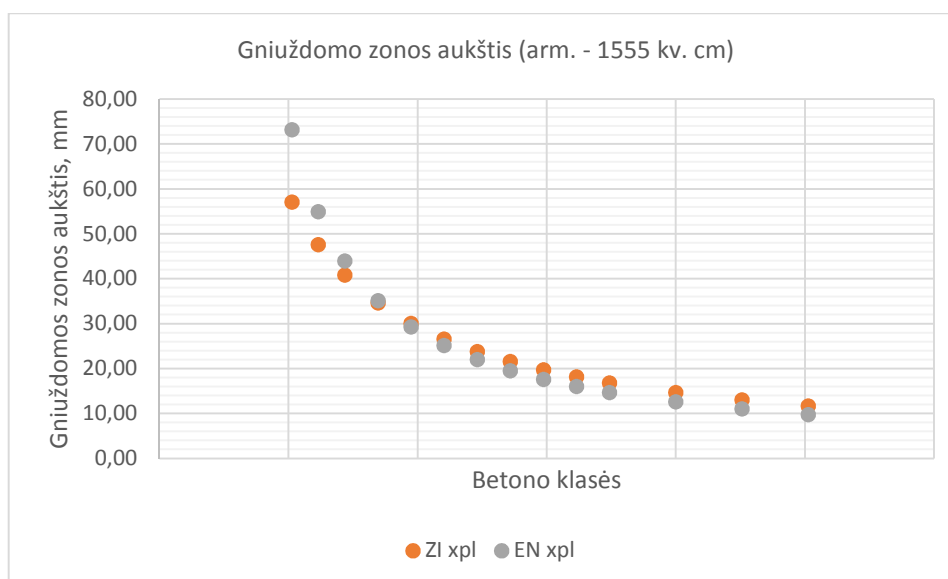
ZI	f_{cd}	10.26	12.31	14.36	16.92	19.49	22.05	24.62	27.18	29.74	32.31	34.87	40.00	45.13	50.26
	x_{pl}	49.74	41.45	35.53	30.14	26.18	23.13	20.72	18.77	17.15	15.79	14.63	12.75	11.30	10.15
EN	f_{cd}	8.00	10.67	13.33	16.67	20.00	23.33	26.67	30.00	33.33	36.67	40.00	46.67	53.33	60.00
	x_{pl}	63.76	47.82	38.26	30.61	25.51	21.86	19.13	17.00	15.30	13.91	12.75	10.93	9.56	8.50



3.10 pav. Apskaičiuotas gniuždomo betono zonos aukštis EN ir ZI metodikomis, kai armavimo procentas lygus 1355 cm²

3.10 lentelė. Apskaičiuoti skaičiuotiniai betono stipriai bei gniuždomos zonos aukštis EN bei ZI metodais, kai armavimo procentas lygus 1555 cm²

ZI	f _{cd}	10.26	12.31	14.36	16.92	19.49	22.05	24.62	27.18	29.74	32.31	34.87	40.00	45.13	50.26
	x _{pl}	57.08	47.56	40.77	34.59	30.04	26.55	23.78	21.54	19.68	18.12	16.79	14.64	12.97	11.65
EN	f _{cd}	8.00	10.67	13.33	16.67	20.00	23.33	26.67	30.00	33.33	36.67	40.00	46.67	53.33	60.00
	x _{pl}	73.18	54.88	43.91	35.12	29.27	25.09	21.95	19.51	17.56	15.97	14.64	12.54	10.98	9.76



3.11 pav. Apskaičiuotas gniuždomo betono zonos aukštis EN ir ZI metodikomis, kai armavimo procentas lygus 1555 cm²

4. SKAITINIS MODELIAVIMAS

Skyriaus tikslas - atkartoti tikrąją kompozitinės perdangos plokštės elgseną veikiant didžiausiam veikiančiam momentui naudojant baigtinių elementų programą „SOFiSTiK”. Gautus skaičiavimo rezultatus, įvertinus tikrąją medžiagos elgseną, palyginti su trečiajame skyriuje atliktais analitiniais skaičiavimais pagal EN 1994-1-1 bei ZI metodikas.

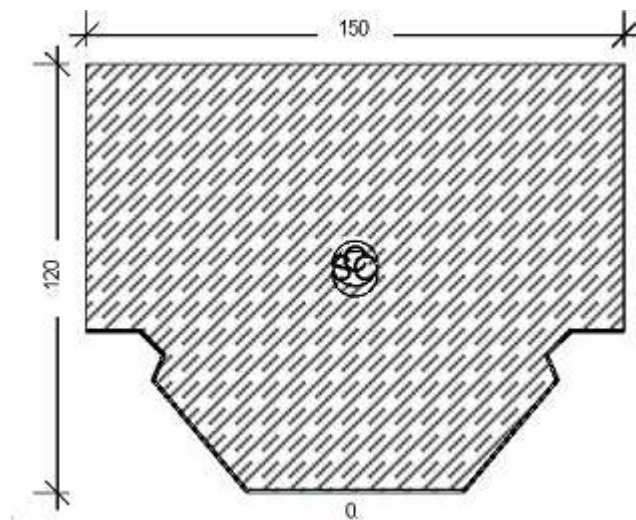
Didelis dėmesys skiriamas įtempių pasiskirstymui skerspjūvyje bei jų analizei.

4.1. Skaičiuojamojo modelio sudarymas

Pasirinktas skaičiuojamasis modelis analizuotas baigtiniu elementų programa „SOFiSTiK”. Pasirinkta tekstinė įvesties sistema, dėl skerspjūvio modeliavimo tikslumo.

Pasirinktą negrinėjamą skerspjūvį sudaro: 955 cm^2 porfuruotas plieno lakšas bei 120 mm betono sluoksnis virš plieninio lakšto, plokštės plotis – 1 m.

Nagrinėjamas skerspjūvis pasirinktas 0.150 m pločio (4.1 pav.).

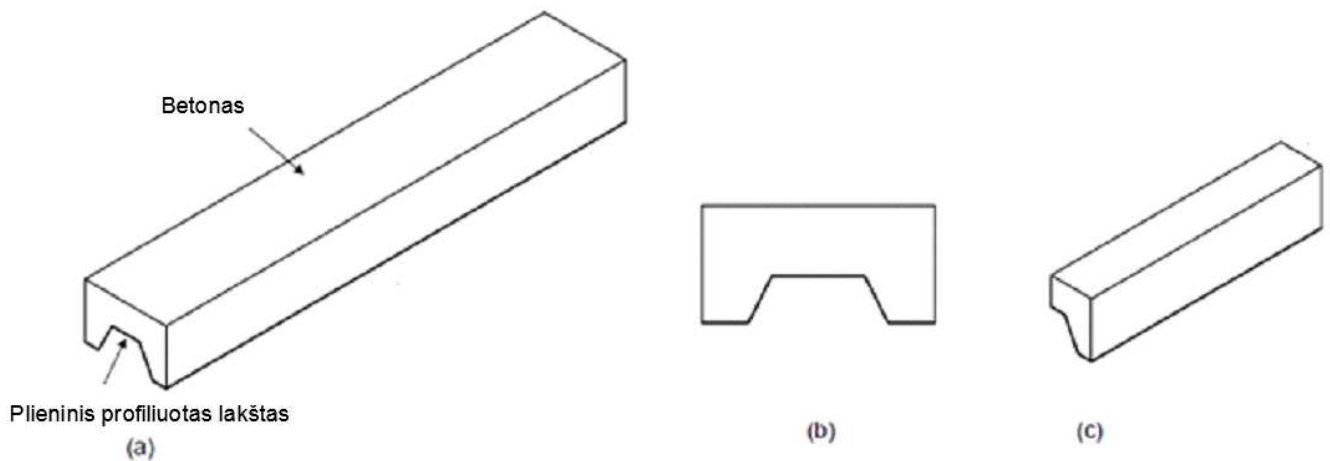


4.1 pav. Baigtinių elementų programoje SOFISTIK sumodeliuotas nagrinėjamas skerspjūvis

Modelyje naudojamos konstrukcinės medžiagos: betonas (priskirta netiesinė įtempių-deformacijų kreivė), metalinis paklotas (priskirta netiesinė įtempių-deformacijų kreivė).

Kompozitinė perdangos plokštė modeliuota baigtinių elementų programa „SOFiSTiK”. Modeliavimo tikslas - suskaičiuoti plokštę veikiančias maksimalias įražas pagal pasirinktas skerspjūvio charakteristikas, kai neutralioji ašies vieta – virš metalinio pakloto. Apatinis metalinis lakštas yra tempiamas. Todėl lakšto išklupimo dėl veikiančių tik tempimo įtempių plieniniame parfuruotame lakšte galime nevertinti.

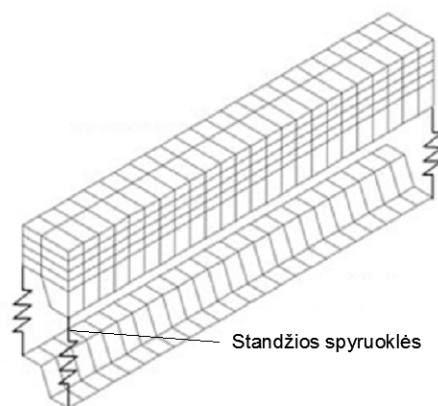
Tarp dviejų medžiagų, tempiamo kompozitinio lakšto bei gniuždomo betono, visiška sąveika, todėl galime nagrinėti skerspjūvį, kaip vienalytį elementą (pilna kompozicinė elgsena). Baigtinio modelio konstravimo principas pateiktas 4.2 pav.



4.2 pav. Modeliuojamo elemento schema: a) kompozitinės perdangos plokštės dalis; b) kompozitinės perdangos plokštės skerspjūvis; c) nagrinėjamos perdangos plokštės dalis priimta skaičiavimams

4.2 pav. c dalyje matome, kad imta ne 1 m kompozitinė perdangos plokštė, o tik jos dalis. Dėl to susilpnėja skerspjūvis tačiau tai įvertinama atsižvelgiant į galutinį rezultatą skaičiuojant galutinį lenkiamojo momento reikšmę.

4.3 pav. elementas suskirstytas baigtiniais elementais. Mazgų vietose tarp baigtinių elementų yra sumodeliuojamos begalinio standumo spyruoklės, dėl to užtikrinama visiška metalinio pakloto bei betono sąveika, kas leidžia pasiekti idealią kompozicinę elgseną tarp betono bei metalinio lakšto – skerspjūvis dirba kaip vienalytė medžiaga.



4.3 pav. Sumodeliuota visiško standumo perdangos plokštės sąveika tarp betono ir metalinio elemento programoje „SOFiSTiK”

4.2. Betono savybės

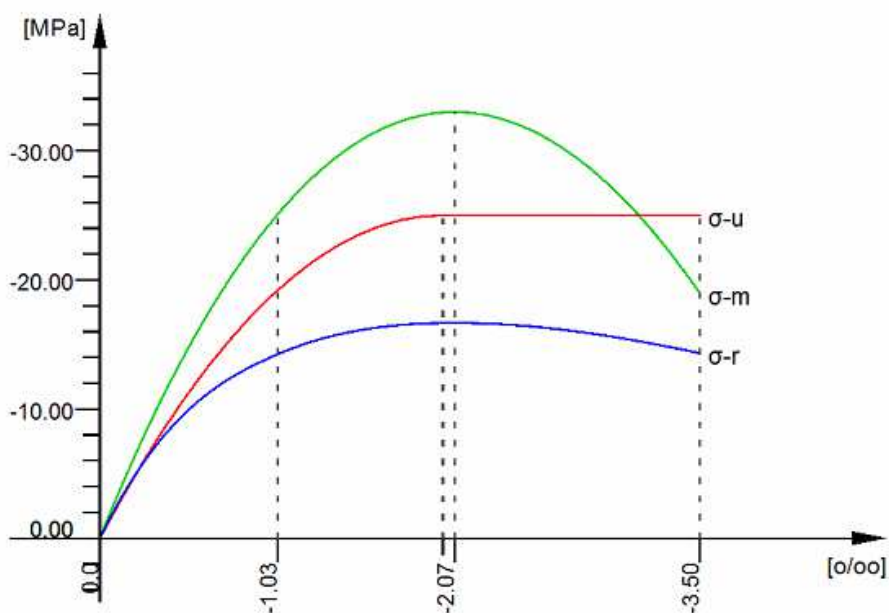
Betonas modeliuotas „*beam*“ tipo elementais. Betonas su plyšiais nebuvo vertinamas, nes tempimą perėmė metalinis paklotas. Gniuždomo betono elgsena perteikta įvertinus fizinių medžiagos netiesiškumą, nors pagal atliktus stebėjimus bei atliktus bandymus dažniausia ištis dėl tempiamo metalinio pakloto pasiektų ribinių įtempių pagal takumo ribą, todėl galima taikyti ir tiesinę gniuždomo betono elgseną tačiau norint gauti tikslų atlaikomą momentą su visiška sąveika tarp elementų priimta netiesinę gniuždomo betono elgseną.

Betono medžiagos savybės programoje „SOFiSTiK“ pateiktos 4.1 lentelėje.

4.1 lentelė. Betono savybės programoje SOFISTIK

Young's modulus	E	31476	[N/mm ²]	Safetyfactor		1.50	[-]
Poisson ratio	μ	0.20	[-]	Strength	f _c	25.00	[MPa]
Shear modulus	G	13115	[N/mm ²]	Nominal strength	f _{ck}	25.00	[MPa]
Compression modulus	K	17487	[N/mm ²]	Tensile strength	f _{ctm}	2.56	[MPa]
Weight	γ	25.0	[kN/m ³]	Tensile strength	f _{ctk,05}	1.80	[MPa]
Density	ρ	2350.00	[kg/m ³]	Tensile strength	f _{ctk,95}	3.33	[MPa]
Elongation coefficient	α	1.00E-05	[1/K]	Bond strength	f _{bd}	2.69	[MPa]
				Service strength	f _{cm}	33.00	[MPa]
				Fatigue strength	f _{cd,fat}	15.00	[MPa]
				Tensile strength	f _{ctd}	1.20	[MPa]

Baigtinių elementų programos vertinamo betono C25/30 charakteristikos pateiktos 4.4 pav. paveiksle matomos gniuždomo betono vidutinio stiprio, charakteristinio betono stiprio bei skaičiuojamojo betono stiprio kreivės, pagal kurias ir nagrinėjamas skerspjūvis.



4.4 pav. Betono charakteristikų kreivės (SOFiSTiK AG 2013)

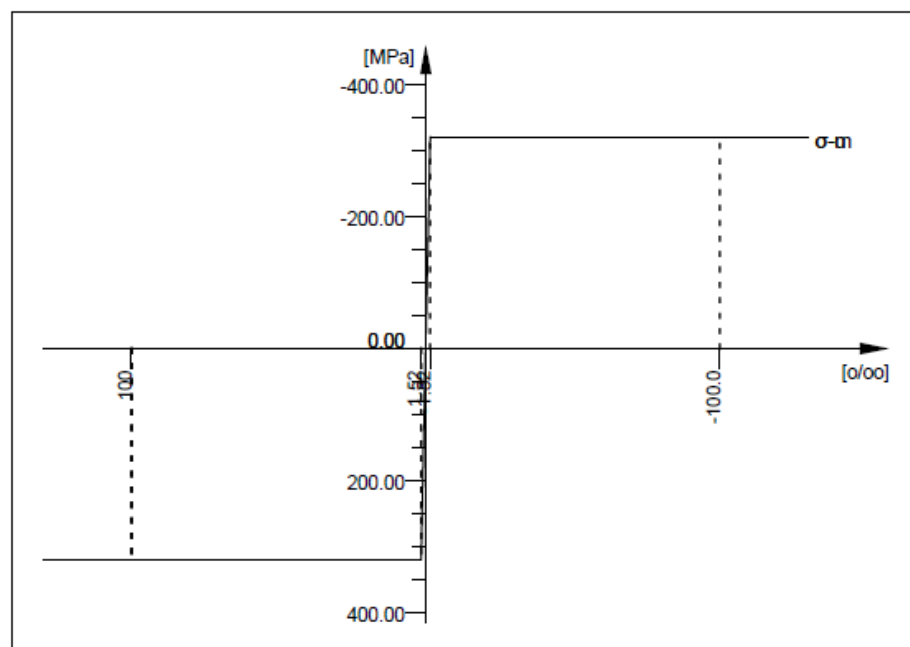
4.3. Metalinio pakloto savybės

Plieninis lakštas modeliuotas „beam“ elementais. Modeliuojant baigtiniais elementais nebuvo atsižvelgiama į metalinio pakloto parforaciją. Parforacija užtikrina bendrą betono ir metalinio pakloto darbą, tačiau dėl užduoto visiško standumo tarp dviejų medžiagų parforacija nebuvo vertinama. Skaiciuojant metalinio pakloto elgseną buvo priimtas tiesinė įtempių-deformacijų kreivė. Metalinio pakloto medžiagos savybės pateiktos 4.2 lentelėje.

4.2 lentelė. Betono savybės programoje „SOFiSTiK“

Young's modulus	E	210000	[N/mm2]	Safetyfactor	1.00	[-]
Poisson ratio	μ	0.30	[-]	Yield stress	fy	320.00 [MPa]
Shear modulus	G	80769	[N/mm2]	Compressive yield	fyc	320.00 [MPa]
Compression modulus	K	175000	[N/mm2]	Tensile strength	ft	320.00 [MPa]
Weight	γ	78.5	[kN/m3]	Compressive strength	fc	320.00 [MPa]
Density	ρ	7850.00	[kg/m3]	Ultimate strain		100.00 [o/oo]
Elongation coefficient	α	1.20E-05	[1/K]	relative bond coeff.		0.00 [-]
max. thickness		40.00	[mm]	EN 1992 bond coeff.	k1	0.00 [-]
				Hardening modulus	Eh	0.00 [MPa]
				Proportional limit	fp	320.00 [MPa]
				Dynamic allowance	σ -dyn	0.00 [MPa]

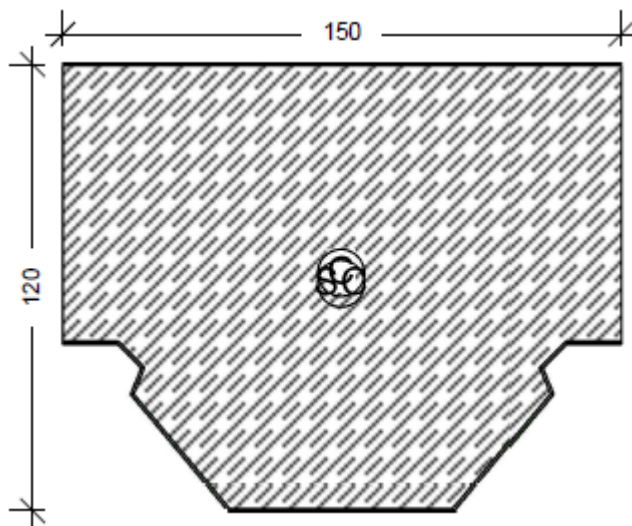
Baigtinių elementų programos vertinamas S320 plieno stiprio ir deformacijų priklausomybė pateikta 4.5 pav.



4.5 pav. S320 plieno stiprumo charakteristikos kreivė (SOFiSTiK AG 2013)

4.4. Lenkiamos kompozicinės perdangos plokštės analizė

Nagrinėjamo skerspjūvio analizė atlieka apskaičiuvus veikiantį didžiausią atlaikomą momentą ir sekant besikeičiančias įtempių reikšmes skerspjūvyje. Pasirinktas baigtinių elementų modelis „SOFiSTiK” programos aplinkoje pateiktas 4.1 pav.



4.1 pav. Baigtinių elementų programoje „SOFiSTiK” sumodeliuotas nagrinėjamas skerspjūvis

Atlikus skaičiavimus gauta, kad atlaikomas didžiausias plastinis momentas lygus 29,77 kNm/m (4.6 pav.):

Design bending resistance (for full shear connection):

$$M_{pl,Rd} = 29.77 \text{ kNm}$$

4.6 pav. Programos SOFISTIK apskaičiuotas lenkimo momentas kompozitinei perdangos plokštei

Gavus didžiausią plastinį momentą kokį atlaiko nagrinėjama perdangos plokštė galime analizuoti perdangos plokštę, kai veikia 25 % (7,44 kNm), 50 % (14,88 kNm), 75 % (22,33 kNm) bei 100% (29,77 kNm) maksimalios apkrovos.

4.5. Analizė veikiant 25 % maksimalaus atlaikomo momento

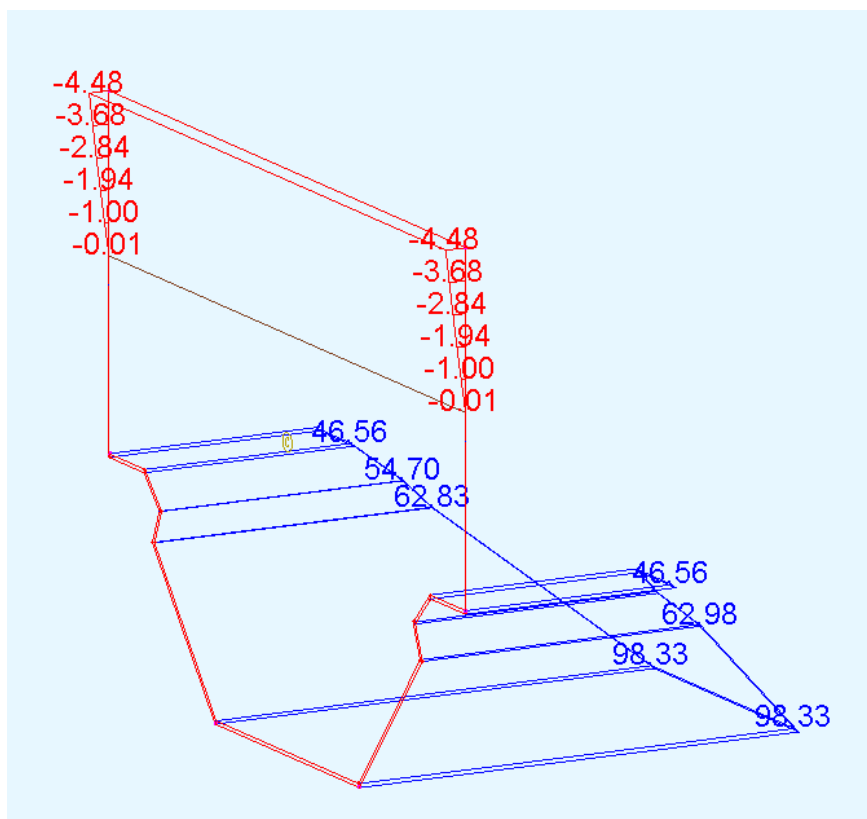
Pagal 4.7 pav. matome, kad metalinio pakloto lakšto išnaudojimas lygus 24,8 %.

Maximum Degree of Utilization

		N	Vy	Vz	Mt	My	Mz	Mb	Mt2	Total	c/t	
		sig-c	sig-t	tau	sig-*	tend.	As-l	As-v	crack	sigdyn	lamda	tau-*
Cross sect.	1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.248	0.000	0.000	0.000	0.248	0.000	
sheeting_section		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

4.7 pav. Programos „SOFiSTiK” apskaičiuotas metalinio lakšto išnaudojimo procentas

Plieninio lakšto įtempių pasiskirstymas pavaizduotas 4.8 pav., kai veikia 7.44 kNm. Plieninio lakšto įtempiai lygus 98,33 MPa, tai atitinka 24,8 % viso galimo plieninio lakšto išnaudojimo.



4.8 pav. Programos „SOFiSTiK” pateiktas įtempių pasiskirstymas skerspjūvyje

Pagal 4.8 pav. matome, kad įtempiai plieniniame elemente pasiskirsto netolygiai. Didžiausi įtempiai plieniniame lakšte lygus 98,33 MPa, betono maksimalūs įtempiai - 4,48 MPa. Gniuždomos betono diagramos forma artima trikampiui.

4.6. Analizė veikiant 50 % maksimalaus atlaikomo momento

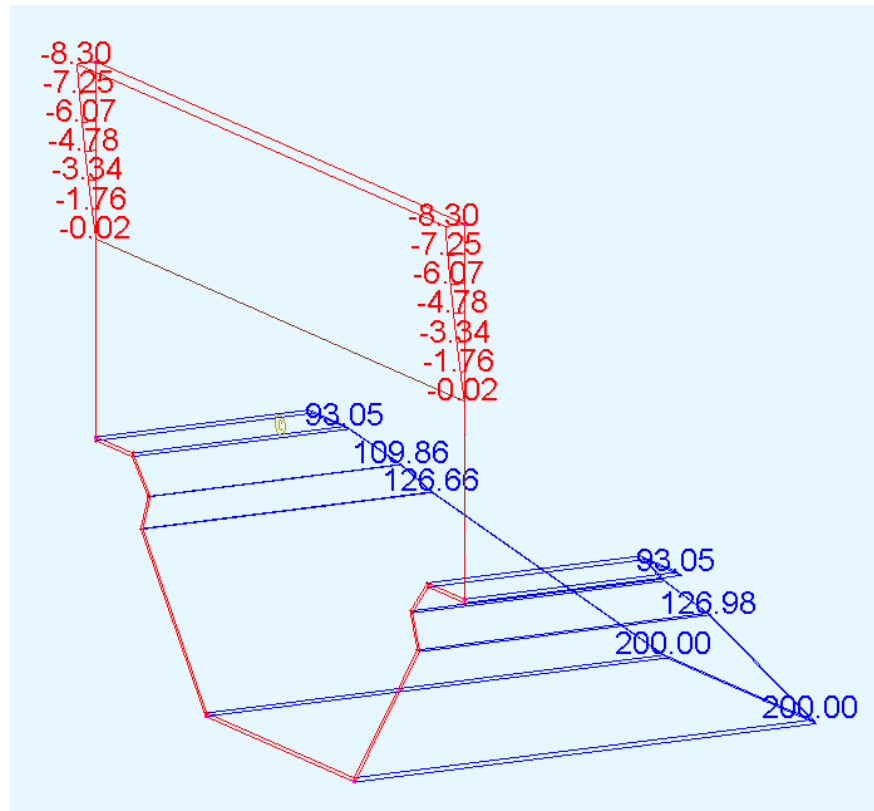
Pagal 4.9 pav. matome, kad metalinio pakloto lakšto išnaudojimas lygus 49,8 %.

Maximum Degree of Utilization

		N	Vy	Vz	Mt	My	Mz	Mb	Mt2	Total	c/t	
		sig-c	sig-t	tau	sig-*	tend.	As-l	As-v	crack	sigdyn	lamda	tau-*
Cross sect.	1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.498	0.000	0.000	0.000	0.498	0.000	
sheeting_section		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

4.9 pav. Programos „SOFiSTiK” apskaičiuotas metalinio lakšto išnaudojimo procentas

Plieninio lakšto įtempių pasiskirstymas pavaizduotas 4.10 pav., kai veikia 14,88 kNm. Lakšto įtempiai lygūs 200,00 MPa, tai atitinka 49,8 % viso galimo plieninio lakšto išnaudojimo.



4.10 pav. Programos „SOFiSTiK“ pateiktas įtempių pasiskirstymas skerspjūvyje

Pagal 4.10 pav. matome, kad įtempiai plieniniame elemente pasiskirsto netolygiai. Didžiausi įtempiai plieniniame lakšte lygūs 200,00 MPa, betono maksimalūs įtempiai – 8,30 MPa. Gniuždomos betono diagramos forma artima trikampiui.

4.7. Analizė veikiant 75 % maksimalaus atlaikomo momento

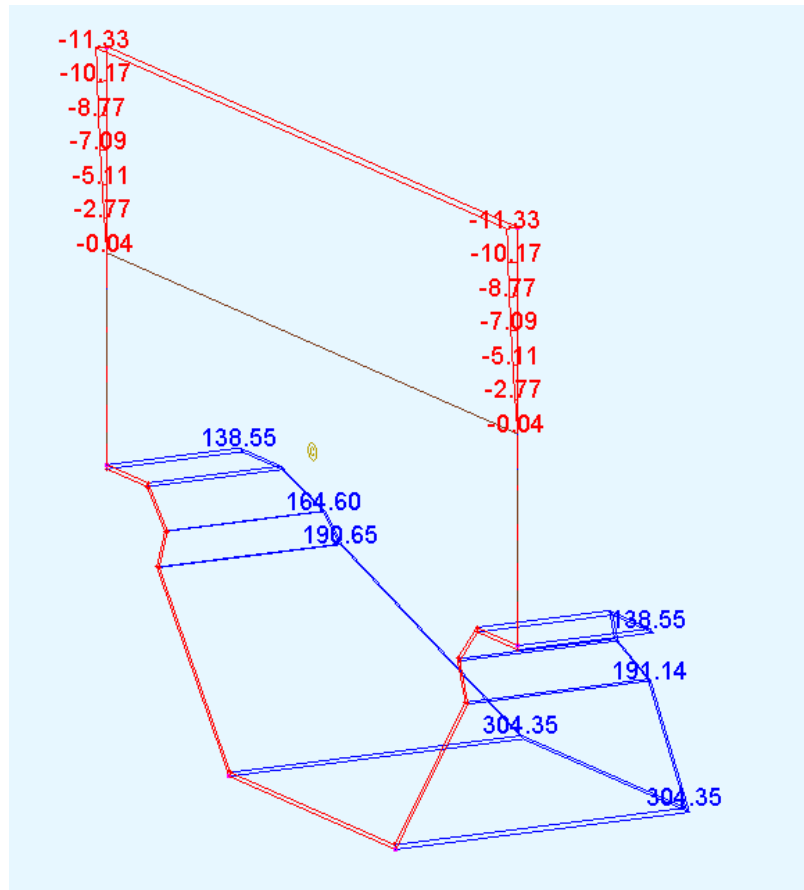
Pagal 4.11 pav. matome, kad metalinio pakloto lakšto išnaudojimas lygus 74,8 %.

Maximum Degree of Utilization

		N	Vy	Vz	Mt	My	Mz	Mb	Mt2	Total	c/t	
		sig-c	sig-t	tau	sig-*	tend.	As-l	As-v	crack	sigdyn	lamda	tau-*
Cross sect.	1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.748	0.000	0.000	0.000	0.748	0.000	
sheeting_section		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

4.11 pav. Programos „SOFiSTiK“ apskaičiuotas metalinio lakšto išnaudojimo procentas

Plieninio lakšto įtempių pasiskirstymas pavaizduotas 4.12 pav., kai veikia 22,33 kNm. Lakšto įtempiai lygus 304,35 MPa, tai atitinka 74,8 % viso galimo plieninio lakšto išnaudojimo.



4.12 pav. Programos „SOFiSTiK” pateiktas įtempių pasiskirstymas skerspjūvyje

Pagal 4.12 pav. matome, kad įtempiai plieniniame elemente pasiskirsto netolygiai. Didžiausi įtempiai plieniniame lakšte lygus 304,35 MPa, betono maksimalūs įtempiai – 11,33 MPa. Gniuždomos betono diagramos forma artima trikampiui.

4.8. Analizė veikiant 100 % maksimalaus atlaikomo momento

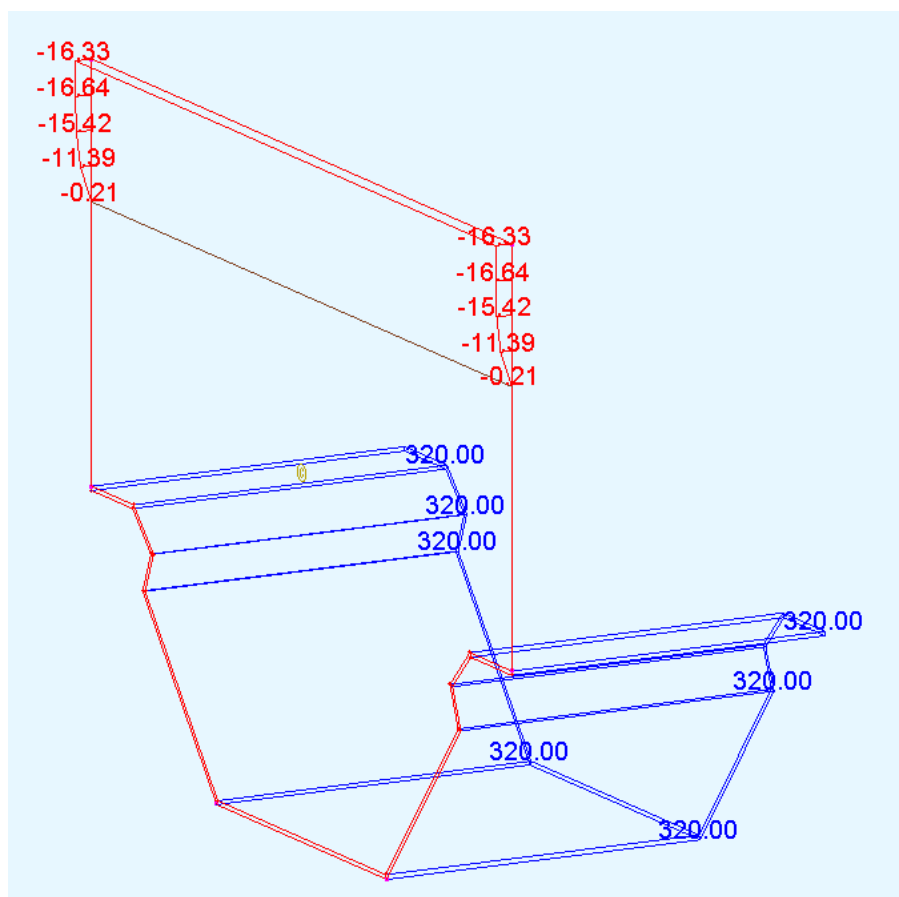
Pagal 4.13 pav. matome, kad metalinio pakloto lakšto išnaudojimas lygus 100 %.

Maximum Degree of Utilization

		N	Vy	Vz	Mt	My	Mz	Mb	Mt2	Total	c/t	
		sig-c	sig-t	tau	sig-*	tend.	As-l	As-v	crack	sigdyn	lamda	tau-*
Cross sect.	1	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	
sheeting_section		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

4.13 pav. Programos „SOFiSTiK” apskaičiuotas metalinio lakšto išnaudojimo procentas

Plieninio lakšto įtempių pasiskirstymas pavaizduotas 4.14 pav., kai veikia 29,77 kNm. Lakšto įtempiai visame skerspjūvyje lygūs 320 MPa, kas atitinka 100 % viso galimo metalio lakšto išnaudojimo. Visame tempiamame elemente pasireiškia didelės plastinės deformacijos. Pasiekiamas visiškas lakšto išnaudojimas pasiekus veikiantį momentą - 29,77 kNm.



4.14 pav. Programos „SOFiSTiK” pateiktas įtempių pasiskirstymas skerspjūvyje

Pagal 4.14 pav. diagramą galima spręsti, kad įtempiai paklote pasiskirsto tolygiai, tačiau atsižvelgus į pakloto deformacijas galime teigti, kad įtempiai pasiskirstė nevienodai, nes pirmiausia pradėjo tekėti kraštinis tempiamos juostos sluoksnis. Didėjant momentui plastinė elgseną elemento pastebima ir visame metaliniame skerspjūvyje. Didžiausi įtempiai plieniniame lakšte lygūs 320,00 MPa. Betono maksimalūs įtempiai siekia 16,33 MPa (medžiagos išnaudojimas – 98 %). Gniuždomos betono diagramos forma pasiekus artimus maksimaliems įtempius yra artima 4.4 pav. pateiktai skaičiuotinio betono įtempių-deformacijų priklausomybės kreivei. Pagal 4.14 pav. galime teigti, kad pasireiškia aiškus fizinis medžiagos netiesiškumas.

Pagal gautus rezultatus galime palyginti gniuždomos zonos aukštį naudojant tikrąją medžiagos elgseną modeliuota baigtinių elementų programa bei analitinių skaičiavimo metodų gautomis reikšmėmis.

Nonlinear Stresses

Beam	x[m]	NoS	LC	e-o [o/oo]	ky/kz [1/km]	x [mm]	zn/yn [mm]	Ni/Vi [kN]	Myi/Mzi [kNm]	Ey/Ez/G-EFF [N/mm2]
1	1.000	1	10002	3.213	103.517	24.8	24.8	0.0	4.46	2346

4.15 pav. Programos „SOFiSTiK” gniuždomos zonos aukštis

Pagal gautus analitinio skaičiavimo rezultatus pateiktus 3.7 lentelėje galima pastebėti, kad gautos reikšmės yra artimos programa apskaičiuotai reikšmei (4.3 lentelė).

4.3 lentelė. Betono gniuždomos zonos aukščio palyginimas

Metodas	Reikšmė
ZI	21,24 mm
EN	21,57 mm
Netiesinė analizė „SOFiSTiK” programa	24,8 mm

Pagal 4.3 lentelėje pateiktas reikšmes galime spręsti, kad artimesnė gniuždomos zonos reikšmė netiesinės analizės rezultatams yra naudojant EN metodą, tačiau tai galime paaiškinti, kad naudojant EN supaprastintą įtempių diagramos charakterį, jis skiriasi nuo naudojamos ZI metode, todėl tiksliau galime vertinti apskaičiavę galutinį lenkiamąjį momentą, kuris tarp ZI bei EN metodo labai artimas (3.1 – 3.5 lentelė).

4.9. Skaičiavimo rezultatų analizė

Atlikus skaičiavimus pagal EN 1994-1-1 pateiktą metodiką gautas lenkimo momentas lygus 27,57 kNm/m, apskaičiavus siūlomą ZI metodu gaunamas lenkimo momentas 27,66 kNm/m, skirtumas 0,33 %. Gautas mažas skirtumas tarp EN ir siulomo ZI metodo. Tačiau atsižvelgiant į skaičiavimo formules galime daryti išvadą, kad keičiant $M_{pl,rd}$ skaičiavimą pagal siūlomą ZI metodiką galima gauti didesnę lenkimo momentą. Lyginant analitinį skaičiavimą su baigtinių elementų programos rezultatais galime matyti, kad gauta reikšmė lygi 29,77 kNm/m įvertinant netiesinę gniuždomo betono elgseną. Skirtumas tarp EN metodo ir baigtinių elementų programos pateikto rezultato lygus 7,389 %. Tarp ZI metodo bei baigtinių elementų programos skirtumas – 7,087 %.

Galima daryti išvadą, kad ZI metodo skaičiavimo reikšmė gaunama artimesnė baigtinių elementų programos rezultatams. Įvertinus, kad EN 1994-1-1 pateiktas formules pritaikant ZI metodui būtų galima sumažinti atotrūkį tarp $M_{pl,rd}$ reikšmių.

IŠVADOS

1. Atlikta literatūros apžvalga nagrinėta tema. Apibrežta kompozitinės perdangos plokštės reikšmė, panaudojimas.
2. Skaičiavimai atlikti remiantis stiprumo sąlyga. Įlinkis darbe nebuvo nagrinėtas.
3. M_{Rd} stiprumo skerspjūvyje skaičiavimas siūlomą ZI metodu, kuriame panaudojama realiausia iš visų EN-2 reglamentuose pateiktų kreivinė įtempių-deformacijų tarpusavio priklausomybė yra artimesnis realiai konstrukcijos elgsenai ir nesudėtingas. Metodas gali būti panaudojamas ne tik konstrukcijoms projektuoti, bet ir įvairių faktorių, rezultatams tirti.
4. Geriausi M_{Rd} skaičiavimo ZI metodu rezultatai gaunami tuomet, kai $\gamma_{Fc} = 1,95$. Įprasto armavimo atveju didžiausias rezultatų nesąryšis siekia 2 % palyginti su rezultatais, apskaičiuotiems EN-2 metodu.
2. EN-2 norminiuose reglamentuose riba tarp normaliai ir gausiai armuotų elementų apskaičiuojama laikant, kad $\varepsilon_{c,lim} = \xi_{lim, u3}$. Gausiai armuotiems elementams imama $\xi_c = \xi_{lim, u3}$.
6. Gausiai armuotų sijų M_{Rd} skaičiavimas naudotais metodais yra labai sąlygiškas, apytikslis – jį reikia tobulinti.
7. Kompozitinės perdangos skaičiavimas ZI metodu skaičiavimo reikšmė gaunama artimesnė baigtinių elementų programos rezultatams (nesąryšis tarp skaičiavimų 7,08 %).
8. Skaičiavimais nustatyta, kad bandymo metu plieno lakšto maksimalūs įtempiai tapo ribiniais, kai betono medžiagos išnaudojimo koeficientas siekė 98 %. Galima pastebėti, kad naudotos medžiagos ribinius įtempius pasiekė beveik vienu metu.
9. Gniuždomo betono įtempių diagrama apkrovus kompozitinį elementą 25 %, 50 % bei 75 % apkrovos ir pasiekus atitinkamą lenkimo momentą kito tiesiškai arba artimai tiesiai, tačiau medžiagai artėjant prie 100 % išnaudojimo kreivė kitimas tapo kreivalinijinis, pasireiškė aiškus fizinis medžiagos netiesiškumas.
10. Skaičiavimas ZI metodu suteikia galimybę keisti EN 1994-1-1 $M_{pl,Rd}$ skaičiavimo metodiką, įvedus tam tikrą kitą gniuždomos zonos aukščio atstojamosios padėtį. Taip būtų gautas didesnis momentas, kuris būtų artimesnis rezultatams gautiems netiesinės analizės metu baigtinių elementų programa “SOFiSTiK”.

LITERATŪRA

- Andrade, V. 2004. Standardized composite slab systems for building constructions. *Journal of Constructional Steel Research* 60:493-524.
- ASCE 1985. Specification for the design and construction of composite slabs and commentary on specifications for design and construction of composite slabs (ANSI/ASCE 2–84). ASCE, New York.
- BS 5950: Part 4: Structural use of steelwork in building 1994. Code of practice for design of composite slabs with profiled steel sheeting, British Standards Institution, London.
- Calixto, J.; Lavall, A. 1998. Behavior and strength of composite slabs with ribbed decking. *Journal of Constructional Steel Research*, 46(1–3):211-212.
- Chen, S. 2003. Load carrying capacity of composite slabs with various end constraints. *Journal of Constructional Steel Research*, 59:385-403.
- Crisinel, M.; Marimon, F. 2004. A new simplified method for the design of composite slabs. *Journal of Constructional Steel Research*, 60:481-491.
- EN 1994-1-1: Eurocode 4: design of composite steel and concrete structures 2004. Part 1.1: general rules and rules for buildings. European Committee for Standardization, Brussels.
- IS 1079 1994. Specification of hot-rolled carbon steel sheets & strips. Bureau of Indian Standards, New Delhi.
- IS 456 2000. Indian standard code of practice for plain & reinforced concrete, 4th revision. Bureau of Indian Standards, New Delhi.
- Johnson, RP. 2004. Composite structures of steel and concrete. Blackwell Publishing, London.
- Luttrell LD 1987. Flexural strength of composite slabs. In *Composite steel structures: advances, design and construction*. Edited by Narayanan R. Elsevier, London.
- Makelainen, P.; Sum, Y. 1999. The longitudinal shear behaviour of a new steel sheeting profile for composite floor slabs. *Journal of Constructional Steel Research*, 49:117-128.
- Marimuthu, V.; Seetharaman, S. 2007. Experimental studies on composite deck slabs to determine the shear-bond characteristic (m-k) values of the embossed profiled sheet. *Journal of Constructional Steel Research*, 63:791-803.
- Mohammed, B. 2010. Structural behavior and m-k value of composite slab utilizing concrete containing crumb rubber. *Journal of Construction and Building Materials*, 24:1214-1221.
- Mohammed, B.; Abdullahi, M. 2011. Analytical and experimental studies on composite slabs utilizing palm oil clinker concrete. *Journal of Construction and Building Materials*, 25:3550-3560.
- Mohan, G.; Upadhyay, A.; Kaushik, S. 2005. Simplified design of composite slabs using slip block test. *J Adv Concr Technol*, 3(3):403-412.

- Oehlers, D.; Bradford, M. 1995. Composite steel and concrete structural members-Fundamental behaviour. Pergamon Press, Oxford.
- Poh, K.; Attard, M. 1993. Calculating the load-deflection behaviour of simply-supported composite slabs with interface slip. *Eng Struct*, 15(5):255-285.
- Porter, M.; Ekberg, C. 1976. Design recommendations for steel deck floor slabs. *J. Struct. Engg, ASCE*, 102(ST11):2121-2136.
- Porter, M.; Ekberg, C.; Greimann, L. 1976. Shear-bond analysis of steel-deck reinforced slabs. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 102(12):2255-2268.
- Vainiunas, P.; Valivonis, J. 2006. Analysis of longitudinal shear behaviour for composite steel and concrete slabs. *Journal of Constructional Steel Research*, 62:1264-1269.
- Veljkovic, M. 1998. Influence of load arrangement on composite slab behaviour and recommendations for design. *Journal of Constructional Steel Research*, 45(2):149-178.
- Wright, H.; Evans, H.; Harding, P. 1987. The use of profiled steel sheeting in floor construction. *Journal of Constructional Steel Research*, 7:279-295.
- STR 2.05:2004 Betoninės ir gelžbetoninės konstrukcijos. Pagrindinės taisyklės konstrukcijoms ir pastatams projektuoti. Vilnius, 2004. 125 p.
- EN 1992-1-1: Eurocode 2: design of concrete structures. Part 1.1: general rules and rules for buildings. European Committee for Standardization, Brussels; 2007.
- EN 1993-1-1: Eurocode 3: design of steel structures. Part 1.1: general rules and rules for buildings. European Committee for Standardization, Brussels; 2007.
- Tankūnas, M.; Urbonas, V.; Židonis, I. Sijų stiprumo statmename pjūvyje apskaičiavimas pagal kreivinę euronormų gniuždomo betono įtempių diagramą. *Jaunųjų mokslininkų darbai*, ISSN 1648-8776.-Šiaulių universitetas: VšĮ Šiaulių universiteto leidykla, 2012, Nr.3 (36), p. 140-148.
- Židonis, I. 2007. Alternative method for the calculation of stress-strain state parameters in normal sections of structural members. *Mechanika*. No. 5 (67). P. 24–32.
- Židonis, I.; 2007. A simple-to-integrate formula of stress as a function of strain in concrete and its description procedure. *Mechanika*. No. 4 (66). P. 23–30.
- Židonis, I.; Venckevičius, V. 2007, Simplified variant of easily integratable stress-strain relationship for concrete. *Lietuvos taikomųjų mokslų akademijos mokslo darbai. Tarptautinis inovacinis taikomųjų mokslo darbų žurnalas*. Nr. 4. P. 71–77.
- Marčiukaitis, G., Valivonis, J. 2007. Lengvosios sluoksniuotosios statybinės konstrukcijos, *VGTU leidykla „Technika“*.

“SOFiSTiK AG” 2013. Design of Cross Sections and of Prestressed Concrete and Composite Cross Sections, Oberschleissheim.

Skerspjūvio tekstinė įvestis baigtinių elementų programoje „SOFiSTiK“:

```
PROG AQUA urs:14.1
HEAD composite_floor_slab
PAGE UNII 5
ECHO MAT
HEAD composite_floor_slab
PAGE UNII 5
ECHO MAT
CTRL
CTRL RFCS 1
CTRL FACE -1
CTRL REFD 0
CTRL STYP 3
CTRL SINT 3
CTRL SCUT 17
SECT 1 MNO 1 MRF 2 FSYM NONE BTYP BEAM TITL "sheeting_section"
SV IT 100[o/o]
TVAR 'S_ACT' VAL 0
TVAR 'S_XI' VAL 0
TVAR 'INCR' VAL 0
TVAR 'INCL' VAL 0
POLY TYPE O MNO 3
VERT '0800' Y 52.92893 Z 81.32106 EXP 1
VERT '0801' Y 53.81524 Z 81.49542 EXP 1
VERT '0802' Y 56.76126 Z 88.52394 EXP 1
VERT '0803' Y 55.89280 Z 88.39213 EXP 1
VERT '0800' Y 52.92893 Z 81.32106 EXP 1
POLY TYPE O MNO 3
VERT '0900' Y 60 Z 74.25000 EXP 1
VERT '0901' Y 60.31066 Z 75 EXP 1
```

VERT '0902' Y 53.81524 Z 81.49542 EXP 1
 VERT '0903' Y 52.92893 Z 81.32106 EXP 1
 VERT '0900' Y 60 Z 74.25000 EXP 1
 POLY TYPE O MNO 3
 VERT '1000' Y 75 Z 74.25000 EXP 1
 VERT '1001' Y 75 Z 75 EXP 1
 VERT '1002' Y 60.31066 Z 75 EXP 1
 VERT '1003' Y 60 Z 74.25000 EXP 1
 VERT '1000' Y 75 Z 74.25000 EXP 1
 POLY TYPE O MNO 3
 VERT '1100' Y -75 Z 74.25000 EXP 1
 VERT '1101' Y -60 Z 74.25000 EXP 1
 VERT '1102' Y -60.31066 Z 75 EXP 1
 VERT '1103' Y -75 Z 75 EXP 1
 VERT '1100' Y -75 Z 74.25000 EXP 1
 POLY TYPE O MNO 3
 VERT '0300' Y -52.92893 Z 81.32106 EXP 1
 VERT '0301' Y -53.81524 Z 81.49542 EXP 1
 VERT '0302' Y -60.31066 Z 75 EXP 1
 VERT '0303' Y -60 Z 74.25000 EXP 1
 VERT '0300' Y -52.92893 Z 81.32106 EXP 1
 POLY TYPE O MNO 1
 VERT '0100' Y -30 Z 119.2500 EXP 1
 VERT '0101' Y -55.89280 Z 88.39213 EXP 1
 VERT '0102' Y -52.92893 Z 81.32106 EXP 1
 VERT '0103' Y -60 Z 74.25000 EXP 1
 VERT '0104' Y -75 Z 74.25000 EXP 1
 VERT '0105' Y -75 Z 1.16415E-06 EXP 1
 VERT '0106' Y 75 Z 1.16415E-06 EXP 1
 VERT '0107' Y 75 Z 74.25000 EXP 1
 VERT '0108' Y 60 Z 74.25000 EXP 1
 VERT '0109' Y 52.92893 Z 81.32106 EXP 1
 VERT '0110' Y 55.89280 Z 88.39213 EXP 1
 VERT '0111' Y 30 Z 119.2500 EXP 1

VERT '0100' Y -30 Z 119.2500 EXP 1
 POLY TYPE O MNO 3
 VERT '0400' Y -55.89280 Z 88.39213 EXP 1
 VERT '0401' Y -56.76126 Z 88.52394 EXP 1
 VERT '0402' Y -53.81524 Z 81.49542 EXP 1
 VERT '0403' Y -52.92893 Z 81.32106 EXP 1
 VERT '0400' Y -55.89280 Z 88.39213 EXP 1
 POLY TYPE O MNO 3
 VERT '0500' Y -30 Z 119.2500 EXP 1
 VERT '0501' Y -30.34971 Z 120 EXP 1
 VERT '0502' Y -56.76126 Z 88.52394 EXP 1
 VERT '0503' Y -55.89280 Z 88.39213 EXP 1
 VERT '0500' Y -30 Z 119.2500 EXP 1
 POLY TYPE O MNO 3
 VERT '0600' Y 30 Z 119.2500 EXP 1
 VERT '0601' Y 30.34971 Z 120 EXP 1
 VERT '0602' Y -30.34971 Z 120 EXP 1
 VERT '0603' Y -30 Z 119.2500 EXP 1
 VERT '0600' Y 30 Z 119.2500 EXP 1
 POLY TYPE O MNO 3
 VERT '0700' Y 55.89280 Z 88.39213 EXP 1
 VERT '0701' Y 56.76126 Z 88.52394 EXP 1
 VERT '0702' Y 30.34971 Z 120 EXP 1
 VERT '0703' Y 30 Z

Skaiciavimo modelio įvedimas baigtinių elementų programoje „SOFiSTiK“:

```
+PROG AQB urs:7
HEAD Section resistance - linear
ECHO FULL EXTR
let#b 0.15
LC 10001 (d)
BEAM 1 NCS 1 X 1 TYPE sect
S NCS 1 NO 1 X 1 MY 20.5*#b
DESI ULTI
@key BSCT_DES 10001 $ 147/LC BSCT_DES | Ultimate/Plastic Design results
  let#Myi @Myi
let#M #Myi/0.15
<text>
<b>Design bending resistance (for full shear connection):<b>
<lf>
  Mpl,Rd = #(M,4.2) kNm
</text>
END
+PROG AQB urs:16.1
HEAD Section resistance - nonlinear
ECHO FULL EXTR
let#b 0.15
LC 10002 (d)
BEAM 1 NCS 1 X 1 TYPE sect
S NCS 1 NO 1 X 1 MY 29.709*#b
NSTR ULTI
END
```