



Kauno technologijos universitetas
Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

Sijinio tilto sijų efektyvumo daugiakriteris vertinimas
Baigiamasis magistro studijų projektas

Rokas Stankevičius
Projekto autorius

Lek. dr. Dainius Vaičiulis
Vadovas

Panevėžys, 2022



Kauno technologijos universitetas
Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

Sijinio tilto sijų efektyvumo daugiakriteris vertinimas

Baigiamasis magistro studijų projektas
Statybos valdymas (6211EX007)

Rokas Stankevičius
Projekto autorius

Lek. Dr. Dainius Vačiulis
Vadovas

Lek. Jovita Kaupienė
Konsultantas

Recenzentas / Recenzentė

Panevėžys, 2022



Kauno technologijos universitetas
Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas
Rokas Stankevičius

Sijinio tilto sijų efektyvumo daugiakriteris vertinimas

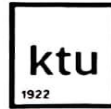
Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

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

Rokas Stankevičius

Patvirtinta elektroniniu būdu



Kauno technologijos universitetas
Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

TVIRTINU
TVKC vadovė
Doc. dr. Nida Kvedaraitė

Baigiamojo magistro projekto užduotis

Diplomantui Rokui Stankevičiui

Baigiamojo projekto tema lietuvių kalba

SIJINIO TILTO SIJŲ EFEKTYVUMO DAUGIAKRITERIS VERTINIMAS

Baigiamojo projekto tema anglų kalba

MULTICRITERIA EVALUATION OF BEAM BRIDGE BEAM EFFICIENCY

Patvirtinta 2021 m. lapkričio 19 d. dekanų potvarkiu Nr. V25-13-34.

Parengto baigiamojo projekto įkėlimo į Moodle aplinką terminas iki 2022 m. sausio 5 d.

Duomenys, reikalavimai ir sąlygos baigiamajam projektui

Tyrime panaudoti ne mažiau kaip 4-ias skirtingas sijinio tilto sijas. Taikyti daugiakriterį SAW metodą. Tyrime panaudoti ne mažiau kaip 6-is rodiklius, apibūdinančius sijinių tiltų sijas. Apklausti ne mažiau kaip 10-imt statybos srities ekspertų.

Baigiamasis magistro projektas turi atitikti KTU Panevėžio technologijų ir verslo fakulteto baigiamųjų projektų rengimo metodinius reikalavimus.

Baigiamojo projekto užduotys / uždaviniai, kurie turi būti atskleisti projekte

- 1. Išnagrinėti Lietuvos ir užsienio mokslininkų atliktus tyrimus susijusius su sijiniais tiltais.*
- 2. Aprašyti SAW metodo algoritmą.*
- 3. Atlikti statybos srities ekspertų apklausą apie sijinių tiltų sijų rodiklių reikšmingumą.*
- 4. Taikant daugiakriterį vertinimo metodą pasirinktai tilto schemai nustatyti racionaliausias (iš nagrinėtų) sijinių tiltų sijas.*

Vadovas / Vadovė:

Dainius Vaičiulis

(vadovo pareigos, vardas, pavardė, parašas)

Užduotį gavau:

Rokas Stankevičius

(studento vardas, pavardė, parašas)

2021 m. lapkričio 19 d.

Stankevičius, Rokas. Sijinio tilto sijų efektyvumo daugiakriteris vertinimas. Magistro studijų baigiamasis projektas. Vadovas lek. dr. Dainius Vaičiulis; Kauno technologijos universitetas, Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų kryptių grupė): Statybos inžinerija technologijos mokslai (inžinerijos mokslai).

Reikšminiai žodžiai: tiltų tipai, tiltas, sija, SAW, daugiakriteris vertinimas.

Panevėžys, 2022. 66 p.

Santrauka

Baigiamojo projekto tikslas - atlikti sijinio tilto sijų efektyvumo daugiakriterį vertinimą. Projekto uždaviniai – išanalizuoti pagrindinius tiltų tipus, ištirti sijinių tiltų statymo technologijas, išanalizuoti jiems naudojamas medžiagas Europoje ir Lietuvoje, pagal susikurtą modelį atlikti sijinio tilto sijų efektyvumo daugiakriterį vertinimą naudojant SAW (Simple Additive Weighting) metodą. Baigiamąjį projektą sudaro 3 dalys. Pirmoji yra mokslinių straipsnių analizė, antroji – SAW metodo analizė, trečioji – sijinių tiltų sijų daugiakriteris vertinimas.

Teorinėje dalyje analizuojami tiltų sijiniai, arkiniai, lyniniai, vantiniai, santvariniai ir mediniai tiltai, jų konstrukcinės schemas, aprašomi požeminiai elementai, viršžeminiai elementai, jų laikomieji elementai ir pačios konstrukcinės schemas. Toliau darbe, sijinių tiltų konstrukcinei analizei skirtas didesnis dėmesys. Buvo apžvelgtos polinių pamatų, rostverko, liemens/kolonų, rygelių, atraminių pagalvių, atraminių guolių, sijų, ir denio pakloto technologijos ir jų gausa. Buvo ištirtos ir sijinių tiltų statybai naudojamos medžiagos, tokios kaip plieninė armatūra, stiklo pluošto armatūra, betonas ir jo priedai. Sudarytos medžiagų palyginimo lentelės. Buvo atlikta ekspertų nuomonių suderinamumo analizė, kur buvo apklausti su tiltais ir keliais dirbantys atestuoti specialistai, kurie pareiškė savo nuomonę apie sijų vertinimo kriterijų svarbą. Susikurta sijinio tilto skaičiuojamoji schema. Naudojant „Robot Structural Analysis Professional 2019“ buvo apskaičiuotos labiausiai išnaudojama sija veikiančios apkrovos, pasirinkti racionalūs sijų profiliai. Darbe buvo lyginami 6 perdangos elementai: 2 dvitėjinio tipo plieniniai profiliai – HEA700 ir HEB500, 2 T formos betoninės sijos, iš kurių viena yra armuota plienų, kita stiklo-bazalto pluoštinė armatūra ir 2 betoninės perdangos plokštės, iš kurių viena yra armuota plienų, kita – stiklo-bazalto pluošto armatūra. Apskaičiuoti sijų svoriai, kainos, laikomosios galios išnaudojimai, įrengimo kainos. Pagal gautus rezultatus atliktas sijų daugiakriteris vertinimas ir sudaryta prioritetų eilutė.

Pagrindinės darbo išvados: Atlikus mokslinių šaltinių analizę buvo ištirta, kad pasaulyje vyrauja keletas pagrindinių tiltų statymo technologijų, tai – sijinio, arkinio, vantinio, kabamojo, santvarinio bei medinio tilto technologijos. Pagrindinis visų technologijų tiltų skirtumas – perdangos (denio) laikomoji schema. Sijinio tilto statyba prasideda gręžtiniais CFA poliais, toliau viš polių kyla rostverkas, liemui, rygeliai, inkaruojasi guoliai, montuojamos perdangos sijos arba plokštės, betonuojasi išlyginamieji sluoksniai, klijuojasi hidroizoliacija ir klojasi asfaltbetonio danga. Tiltu prieigų formavimas prasideda nuo gulekšnių, toliau ant jų gulasi pereinamos plokštės. Tolimesnis prieigų įrengimas nesiskiria nuo perdangos įrengimo – išlyginamųjų sluoksnių betonavimas, izoliacijos klijavimas, asfaltbetonio klojimas. Racionaliausia sija lyginant pagal SAW metodu gauta HEB500, Didžiausią įtaką plieninio profilio HEB500 pasirinkimui sudarė didžiausią rodiklių reikšmingumą turintys sijos medžiagų kaina, įrengimo kaina ir įrengimo darbų laikas.

Stankevičius, Rokas. Multicriteria evaluation of beam bridge beam efficiency. Master's Final Degree Project. Supervisor lek. dr. Dainius Vaičiulis; Panevėžys Faculty of Technology and Business., Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Construction engineering, Civil Engineering, Technology Sciences (Engineering Sciences).

Keywords: bridge types, bridge, beam, SAW, multicriteria evaluation.

Panevėžys, 2022. 66 p.

Summary

The aim of the final project is to perform a multi-criteria evaluation of the efficiency of beam bridge beams. The objectives of the project are to analyze the main types of bridges, to study the technologies of beam bridge construction, to analyze the materials used in Europe and Lithuania, to perform a multi-criteria evaluation of beam bridge girder efficiency using SAW (Simple Additive Weighting) method. The final project consists of 3 parts. The first is the analysis of scientific articles, the second is the analysis of the SAW method, and the third is the multicriteria evaluation of beam bridge beams. The theoretical part analyzes the bridge girder, arch, cable, cable, truss and wooden bridges, their constructional schemes, describes the underground elements, above-ground elements, their supporting elements and the structural schemes themselves. Further in the work, more attention is paid to the structural analysis of beam bridges. Technologies and abundance of pole foundations, grate, torso / columns, beams, support cushions, support bearings, beams, and deck decking were reviewed. Materials used in the construction of beam bridges, such as steel reinforcement, fiberglass reinforcement, concrete and its additives, were also investigated. Material comparison tables have been compiled. An analysis of the consistency of the experts' opinions was carried out, where certified specialists working with bridges and roads were interviewed, who expressed their opinion on the importance of the evaluation criteria for the beams. A computational scheme of a beam bridge has been developed. Using Robot Structural Analysis Professional 2019, the loads acting on the most exploited beam were calculated and rational beam profiles were selected. 6 floor elements were compared in the work: 2 double type steel profiles - HEA700 and HEB500, 2 T-shaped concrete beams, one of which is reinforced with steel, the other with glass-basalt fiber reinforcement and 2 concrete floor slabs, one of which is reinforced with steel, the other - glass-basalt fiber reinforcement. Beam weights, prices, load-bearing capacity utilization, installation prices were calculated. Based on the obtained results, a multi-criteria evaluation of the beams was performed and a series of priorities was formed.

The main conclusions of the work: After the analysis of scientific sources, it was investigated that several of the main bridge construction technologies prevail in the world - beam, arch, cable, suspension, truss and wooden bridge technologies. The main difference between all technology bridges is the floor (deck) support scheme. The construction of the beam bridge begins with the drilled CFA piles, then the grate, beams, anchors, anchored beams or slabs are installed, the screeds are laid, the waterproofing is laid and the asphalt concrete is laid. The formaphime of the bridge accesses starts from the sleepers, then the transition plates lie on them. Further installation of accesses is no different from installation of a floor - concreting of leveling layers, insulation gluing, laying of asphalt concrete. The most rational beam compared to the SAW method was obtained from the HEB500

Turinys

Paveikslų sąrašas	8
Lentelių sąrašas	10
Įvadas	11
1. Teorinė dalis	12
1.1. Tiltų tipai	12
1.2. Sijinių tiltų sudedamųjų dalių analizė	21
1.2.1. Antstatas	21
1.2.2. Viršutinė danga.....	21
1.2.3. Denis.....	22
1.2.4. Pagrindas	22
1.2.4.1. Atramos	22
1.2.4.2. Guoliai	23
1.2.4.3. Pagalvės.....	25
1.2.4.4. Stiebas	25
1.2.4.5. Galinė siena	26
1.2.4.6. Sparno sienelė.....	26
1.2.4.7. Rostverkas	27
1.2.4.8. Poliai.....	27
1.2.4.9. Sijos.....	29
1.2.4.10.Sijų antriniai nariai	31
1.3. Tiltų konstrukcijų naudojamų medžiagų analizė.....	32
2. Tyrimo metodologija	37
2.1. Daugiafunkcinių sprendimo priemimo metodų klasifikacija ir metodologija.....	37
2.2. Daugiatikslio sprendimo priemimo metodų kompleksas	38
2.3. SAW metodologija	41
3. Sijinio tilto sijų daugiakriteris vertinimas	42
3.1. Ekspertų nuomonių suderinamumo tyrimas	42
3.2. Sijinio tilto sijų efektyvumo tyrimas	45
Išvados	63
Literatūros šaltiniai	64
Priedai	67

Paveikslų sąrašas

1 pav. Sijinio tilto schema [1]	12
2 pav. Arkinis gelžbetoninis tiltas (Kumelionių tiltas) [1].....	13
3 pav. Mūrinio arkinio tilto schema [2]	13
4 pav. Auksinių vartų tiltas (1234 m. ilgio tarpatramis) [1].....	14
5 pav. Bruklino tiltas (angl. <i>Brooklyn Bridge</i>) [3]	15
6 pav. Vantinis tiltas [3].....	16
7 pav. Vantinio tilto schema [5].....	17
8 pav. Santvarinis geležinkelio tiltas [1]	18
9 pav. Santvarų tipai [6].....	18
10 pav. Laikiniai surenkamas santvarinis tiltas [6]	18
11 pav. Tiltas per Asvėjos ežerą, Dubingiai, Molėtų raj.....	19
12 pav. <i>Black Dog Halt Bridge</i> tiltas [9].....	20
13 pav. Sijinio tilto struktūra. 1 – antžeminė dalis, 2 – sija, 3 – guoliai, 4 – rigelis, 5 – rigelio galinė sienelė, 6 – rostverkas, 7 – poliai, 8 – požeminis pravažiavimas, 9 – šlaito tvirtinimas, 10 – naudojimo apkrova [11].....	21
14 pav. Įprastinės asfalto dangos ant tilto pjūvis [14].....	22
15 pav. Kūjo galvutės tipo atrama (Hammer pier support) [11].....	23
16 pav. Atramų tipai. A – kūjo galvutė, B – solidi siena, C – koloninė atrama, D – polinė atrama [11] 23	
17 pav. Elastomerinis tilto guolis [autorius nuotrauka]	23
18 pav. Elastomerinis tilto guolis su vienakrypčiu suvaržymu [Autoriaus nuotrauka]	24
19 pav. Tilto deformacijų vertinimo liniuotė [autorius nuotrauka].....	24
20 pav. Guolio prijungimo prie betoninės pagalvės pjūvis [autorius nuotrauka]	25
21 pav. Atraminė pagalvė [autorius nuotrauka]	25
22 pav. Stiebas jungiantis rostverką ir rigelį [autorius nuotrauka].....	26
23 pav. Sparno sienelė [11].....	26
24 pav. Iš anksto įtempto polio montavimas [18].....	27
25 pav. Iš anksto įtempto polio armavimas [19]	28
26 pav. FRP armatūrų profilių tipai: 1 – rifliuoti, 2 – padengta smėliu, 3 – susukta ir padengta smėliu, 4 – tuščiavidurė, 5 – rievėta [21]	28
27 pav. T profilio sijų schema [22]	29
28 pav. Armatūrų jungimo būdai [22]	30

29 pav. Armatūrų kombinacijų būdai [23].....	30
30 pav. Skirtingi betoninių sijų sutvirtinimo būdai [24].....	31
31 pav. Pagrindiniai sijinės atramos komponentai [11].....	31
32 pav. Pagrindiniai FRP/plieno armatūrų kombinacijų tipai [25].....	32
33 pav. FRP armatūrų tipai [27].....	33
34 pav. Plieno pluoštu sustiprintas polimerinis kompozicinis strypas (SFCB, angl. <i>Steel-Fiber Reinforced Polymer Composite Bar</i>) [30].....	35
35 pav. Daugiatikslių vertinimo metodų schema [33]	40
36 pav. Skaičiuojamojo tilto schema [autoriaus nuotrauka]	45
37 pav. Sijinio tilto sijos skaičiuojamoji schema [autoriaus nuotrauka].....	45
38 pav. Skersinės kaičiuojamosios schemos vizualizacija [autoriaus nuotrauka]	46
39 pav. Vilkiko svorių pasiskirstymas važiuojant tiltu [autoriaus nuotrauka].....	46
40 pav. Statinio uždavinio schema [autoriaus nuotrauka]	47
41 pav. Skaičiavimų rezultatai [autoriaus nuotrauka].....	47
42 pav. Vilkiko jėgų pasiskirstymas išilgai sijos [autoriaus nuotrauka].....	48
43 pav. Išilginio skerspjuvio skaičiuojamoji schema [autoriaus nuotrauka]	48
44 pav. Denginio konstrukcija [autoriaus nuotrauka].....	49
45 pav. Plieninis profilis HEA700 (kairėje) ir plieninis profilis HEB500 (dešinėje).....	51
46 pav. G/b sijos išarmavimo schema [autoriaus nuotrauka]	51
47 pav. Perdangos plokštės armavimo schema [autoriaus nuotrauka].....	53
48 pav. Rodiklio subjektyvus reikšmingumas (Santykinis svoris) [autoriaus nuotrauka]	57
49 pav. Sijų medžiagų kainos palyginimas, Eur/m [autoriaus nuotrauka].....	57
50 pav. Sijų įrengimo kainos palyginimas, Eur/m [autoriaus nuotrauka].....	57
51 pav. Sijų nuosavosios masės palyginimas, kg/m [autoriaus nuotrauka]	58
52 pav. Sijų įrengimo darbų laiko palyginimas, h [autoriaus nuotrauka]	58
53 pav. Sijų laikomosios galios išnaudojimo palyginimas [autoriaus nuotrauka].....	59
54 pav. Sijų garantinio laikotarpio palyginimas, m [autoriaus nuotrauka]	59
55 pav. SAW tyrimo rezultatai [autoriaus nuotrauka]	61

Lentelių sąrašas

1 lentelė. FRP ir plieno armatūros palyginimai [28, 29].....	34
2 lentelė. Daugiatikslių metodų klasifikacija[32]	38
3 lentelė. Svarbumo skalės lentelė[33].....	40
4 lentelė. Vertinimo kriterijų balų reikšmė	42
5 lentelė. Ekspertų nuomonių rezultatai.....	43
6 lentelė. Tilto skaičiuotinės apkrovos.....	50
7 lentelė. HEA700 ir HEB500 charakteristikos	50
8 lentelė. T formos sijų charakteristikos	53
9 lentelė. Perdangos plokščių charakteristikos.....	55
10 lentelė. Pradinė sprendinių priemimo matrica	56
11 lentelė. Normalizuota matrica	60
12 lentelė. Galutinė reikšmių ir prioritetų matrica	61

Įvadas

Keliaudami Lietuvoje pravažiuojame ne vieną čia esantį tiltą ar viaduką. Vieni iš jų – naujos statybos: akį traukiantys, patogūs, pritaikyti visuomenės poreikiams ir normoms, kiti – senosios statybos (sovietmečio), ant kurių yra matomas ne vienas aplinkos poveikio ar naudojimo randas. Senosios statybos tiltai jau nebeatitinka naujųjų Europos standartų „Eurocode“. Senieji tiltai buvo projektuoti pagal tuometinius standartus, kurie reglamentavo iki 2 kartų mažesnes apkrovas negu dabar reglamentuoja „Eurocode“as“. Pagrindinis dalykas, dėl kurio šiuo metu realios tiltų apkrovos yra žymiai didesnės – sparčiai augantis eismo intensyvumas. Sovietmečiu buvo skaičiuojama, kad tiltai, pagal savo laikančiąją konstrukciją turi tarnauti: gelžbetoniniai – 80 metų, plieniniai 50 metų, mediniai 20 metų. Nesunku paskaičiuoti, kad toks laiko tarpas vienoms tiltų konstrukcijoms jau praėjo, o kitoms - greitai ateis. Skaičiuojama, kad Lietuvos keliuose stovi per 1500 tiltų, iš kurių ne vienas yra kritinės būklės. Daugelis reikalauja remonto arba rekonstrukcijos, todėl šiuos darbus tenka atlikti iš VĮ „Automobilių kelių direkcijos“ pinigų. Vieni seniausių ir paprasčiausių statomų tiltų – sijiniai. Čia problema tik viena – kokio tipo sijas pasirinkti, kad šios būtų efektyvios ir bendra tilto statyba sunaudotų kuo mažiau žmogiškųjų ir ekonominių resursų.

Tyrimo objektas – sijinių tiltų sijos.

Tikslas – atlikti sijinio tilto sijų efektyvumo daugiakriterį vertinimą.

Darbo uždaviniai:

1. Išnagrinėti Lietuvos ir užsienio mokslininkų atliktus tyrimus susijusius su sijiniais tiltais.
2. Aprašyti SAW metodo algoritmą.
3. Atlikti statybos srities ekspertų apklausą apie sijinių tiltų sijų rodiklių reikšmingumą.
4. Taikant daugiakriterį vertinimo metodą pasirinktai tilto schemai nustatyti racionaliausias (iš nagrinėtų) sijinių tiltų sijas.

Tyrimo metodai – mokslinių duomenų analizė, ekspertų apklausa, SAW daugiakriteris vertinimo metodas.

Išanalizuotas 41 mokslinis straipsnis.

Autoriaus konferencijoje skaityti pranešimai:

Stankevičius, Rokas. Sijinio tilto sijų daugiakriteris vertinimas. Technologijų ir verslo aktualijos 2021. Panevėžys: Kauno technologijos universitetas, 2021 m. balandžio 23 d.

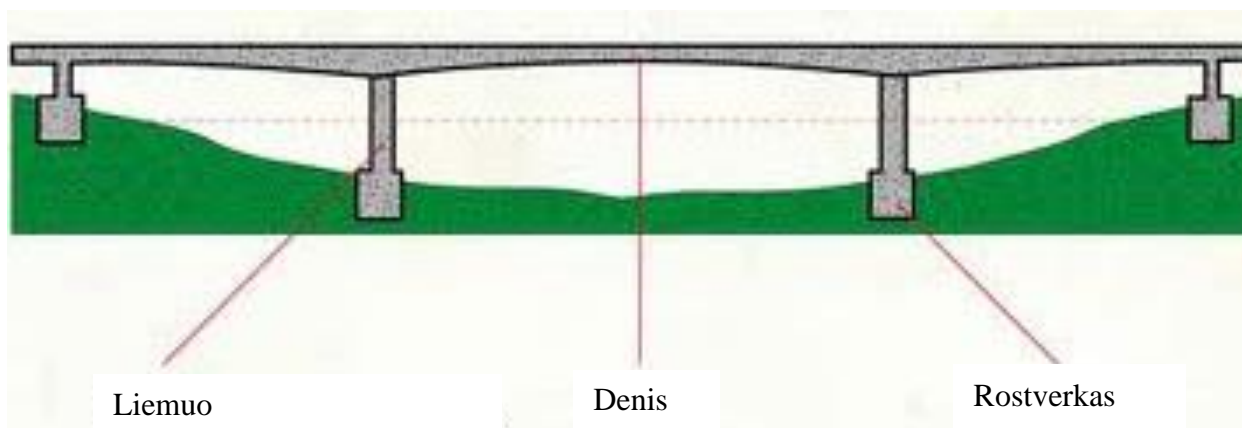
1. Teorinė dalis

Tiltas yra pagrindinė šių dienų priemonė norint kirsti upes, slėnius, didelių eismų sankryžas ar panašias vietas, kur tiesiogiai nutiesti kelią yra per sunku arba pažeidžiama vietinė infrastruktūra. Tiltai naudojami ne tik automobiliams, po truputį ateina tendencijos tiltus statyti ir pėstiesiems ar dviratininkams. Preliminarus tilto projektavimo proceso etapas yra apsvarstyti ir pateikti projektavimo kriterijus tinkamiausiam tilto tipui, argumentuotai pasirinkti konkrečią vietą ir tikslą. Tokios kokybinės atrankos dažnai būna priimamos remiantis ekspertų nuomone ir nebūtinai sekant sistemingą, loginį ir visiems priimtina procesą. Labai svarbu paminėti, kad laikui bėgant keičiasi ir aplinka, daranti įtaką profesinėms nuostatom. Norint nesuklysti renkantis racionaliausią sprendimą tam tikroje situacijoje, labai svarbu žinoti grunto, aplinkos, eismo intensyvumo, galimybės tiekti į objektą tam tikras medžiagas, sąlygas. Statybos valdymas prasideda ten, kur reikia priimti racionaliausią esamą sprendimą. Pirmas darbas – išsiaiškinti labiausiai paplitusius ir naudojamus tiltų tipus Lietuvoje ir pasaulyje.

1.1. Tiltų tipai

Tiltai pagal savo konstrukciją yra skirstomi į skirtingas rūšis.

Sijiniai tiltai. Sijiniai tiltai yra vieni iš labiausiai paplitusių tiltų tipų Lietuvoje. Jie taikomi mažiems ir vidutiniams tarpatramiams. Sijiniai tiltai yra nesunkiai projektuojami, nesudėtingai statomi bei remontuojami (žr. 1 pav.). Dviatramė sijinė perdanga yra nejautri atramų sėdimui, temperatūrinėms deformacijoms. Trūkumas – veikiant toms pačioms apkrovoms dviatramėse sijose atsiranda gerokai didesnės įrašos nei nekarpytose ar rėminėse perdangose. Kaip dviatramės sijos skaičiuojamos ir plokštinės perdangos, atremtos galuose 2 kraštinėmis, tokiu atveju, kai jų darbas skersine linkme įvertinamas supaprastintais būdais. Pavyzdžiui, tuštumėtoji plokštė darbo ir skaičiavimo požiūriu yra labai artima sijinei perdangai. Racionaliausias tarpatramio ilgis gelžbetoninėms perdangoms – 15 m., įtemptojo gelžbetonio perdangoms iki 35 m., metalinėms sijoms – iki 50 m. [1].



1 pav. Sijinio tilto schema [1]

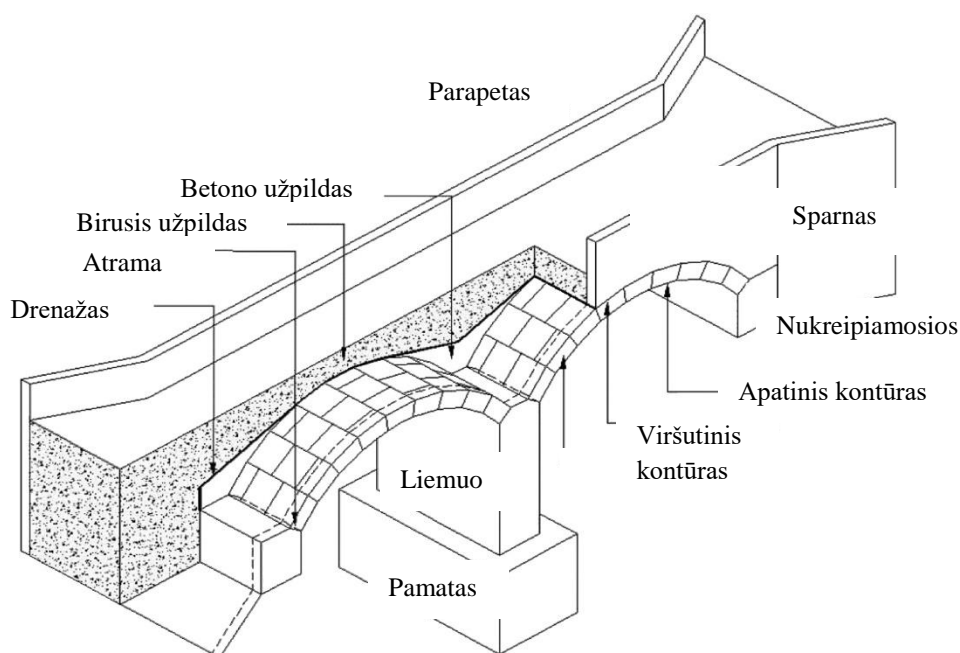
Arkiniai tiltai – tai viena iš seniausių tiltų statymo technologijų. Arka – tai pagrindinė antikos ir viduramžių laikų tiltų schema (žr. 2 pav.). Arkiniai statiniai stovi iki šių dienų, jie ne tik atsparūs laiko poveikiams, bet ir pasižymi gera architektūrine išvaizda. Kuomet arka yra veikiamas apkrovų, ji yra gniuždoma, todėl tokiai schemai galima rinktis įvairias mūrines medžiagas, kaip plytos ar akmenys

blokai. Tiesa, arkiniai tiltai šiuo metu yra vis mažėjanti tendencija. Juos statyti sunku, reikalauja dideles apkrovas laikančių pastolių, ant kurių yra renkami, remiami ir betonuojami. Taip pat būtinos ir masyvios atramos, priimančios dideles skėtimo ir gniuždymo jėgas. Tiesa, taikant metalines arkas statyba gali būti racionali, galima jas surinkinėti ant kranto ir montuoti kranu arba nuplukdyti iki montavimo vietos [1].



2 pav. Arkinis gelžbetoninis tiltas (Kumelionių tiltas) [1]

Pagrindinė senųjų arkinio tiltų medžiaga – mūras, apibrėžiamas kaip konstrukcinė medžiaga, pagaminta surenkant natūralius (akmeninius) arba dirbtinius (plytas) elementus, su skiediniu arba be jo, tinkama konstrukcijos laikantiems elementams realizuoti. Atsižvelgiant į panašią morfologiją, plytų tiltai turėtų būti analizuojami kartu su akmeniniais tiltais ir laikomi jų dalimi. Tipinė mūro arkos tilto struktūra parodyta 13 paveiksle [2].



3 pav. Mūrinio arkinio tilto schema [2]

Akmens arkos tiltai turi keletą privalumų, palyginti su betoniniais tiltais. Didesnė vietoje prieinamų išteklių dalis naudojama akmeniniuose tiltuose, nes juos galima pastatyti naudojant žmogaus darbą ir vietinius akmenis. Priešingai, betoninių tiltų statybai, statybos vietoje reikia perkelti žaliavas ir mašinas bei reikalinga specializuota techninė patirtis. Palyginti su brangiais užpildais, vietiniai akmenys yra stiprios ir prieinamos medžiagos, dažnai esančios šalia statybvietsės. Kalbant apie statybos sąnaudas, betoniniams tiltams reikia daugiau investicijų ir naudoti specialią įrangą, kuri nekompensuoja žmogaus algos išlaidų už akmens arkos tiltų statybą. Potvynių rizika nuplauti akmens arkos pralaidas sumažėja dėl jų pačių svorio. Be to, jungiamoji arka ir didelis jos svoris užkerta kelią tipiškiems techniniams iššūkiams, susijusiems su betono tilto atramomis (t. y., pakreipimu ir slydimu, kurį sukelia užpildyta grunto masė) [2].

Nepaisant to, betoniniai tiltai yra tinkamesnė technologija, jei reikia didesnio darbo efektyvumo ir mažesnės trukmės. Atsižvelgiant į tai, maksimalus vienas tarpatramis akmenų tiltuose paprastai yra mažesnis nei 20 m. Didesnių viengubų tarpatramių atveju geresnis variantas yra gelžbetonis, nes akmens mūro tūris didesnis. Vietos amatininkų ir rangovų gebėjimų ugdymas yra dar vienas iššūkis, kurį reikia apsvarstyti, nes kompetencijos trūkumą pakeisti gali būti brangu. Šiuo tikslu pramoninės šalys nusprendė naudoti iš anksto įtemptą betoną, o ne investuoti pinigus į ekspertus mūrininkus ir atsitiktinius darbininkus. Šiuo metu tiltų statybai naudojama akmens arkos technika yra mažai naudojama arba jos atsisakoma [2].

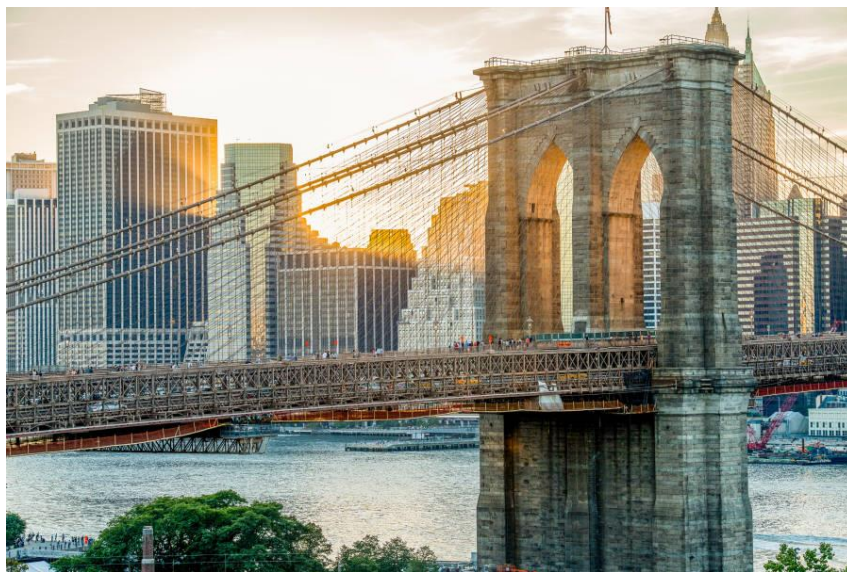
Kabamieji tiltai. Turbūt visi, jeigu ne gyvai, tai bent jau filmuose, yra matę vieną iš įspūdingiausių kabamųjų tiltų pasaulyje – Auksinių vartų tiltą (žr. 4 pav.). Šių tiltų technologija pagrįsta lyno tempimu. Lyno pakabos palaiko važiuojamąją dalį. Naudojamas lynas atlaiko didžiules tempimo jėgas, gaminamas statybos metu šaudyklės pagalba. Lynas sudarytas iš tūkstančių vielų, kurios pasiekus tinkamo skerspjuvio plotą yra supinamos. Lynas veikiamas didžiulės tempimo jėgos neleidžia tiltui sukniubti. Lynas tvirtinamas kraštinėse, kuriose betonuojami laikantieji blokai [1].



4 pav. Auksinių vartų tiltas (1234 m. ilgio tarpatramis) [1]

Konstrukcijų inžinieriai dėl savo konstrukcinio efektyvumo ir estetinio patrauklumo visuomet pasisakė už kabamųjų tiltų (angl. *Cable-Suspenden Bridge* – CSB) virš upių pervažų ir sąsiaurių. CSB idėja atsirado, kai buvo kuriami pakabos tiltai, tačiau XIX a. pradžioje dėl ankstyvųjų CSB nesėkmių šios idėjos laikinai atsisakyta. Tai įtakojo techninių žinių stoka sprendžiant sunkumus, analizuojant CSB ir dėl tinkamų medžiagų kabeliams trūkumo. „Stay“ kabeliai vėl buvo pristatyti kaip papildomi komponentai statant kabamuosius tiltus XIX a. pabaigoje, pavyzdžiui, Bruklino tiltui (žr. 5 pav.),

siekiant padidinti tilto standumą nuo vėjo sukeltos vibracijos, kuris pabrėžė nepaprastą kabelių naudojimo svarbą ilguose tarpatramiuose [3].



5 pav. Bruklino tiltas (angl. *Brooklyn Bridge*) [3]

Tarptautiniu mastu CSB kūrimas prasidėjo aštuntajame dešimtmetyje, tačiau spartus kompiuterinių programų tobulėjimas 1990-aisiais pasirodė esąs didžiulis žingsnis į priekį. Be tokių tiltų evoliucijos, statybų pramonėje per pastaruosius kelis dešimtmečius plačiai pripažinta Jacqueso Mathivato sugalvota ekstruduočių tiltų (EDB) koncepcija [3].

Pakabinamas tiltas yra plačiai naudojamas kertant plačias upes, ežerus ir slėnius. Pakabinami tiltai paprastai turi ilgą denį ir platų tarpatramį bei vibruoja dėl įvairių veiksnių, pavyzdžiui, judančių transporto priemonių ir vėjo [4].

Pagal dabartinę projektavimo praktiką kabeliais paremtų konstrukcijų reikalingumas nustatomas taikant patirtimi pagrįstą vertinimo metodą, pagal priimtina saugumo ribą tarp stiprumo ir apkrovos poveikio. Tačiau atliekant įprastą struktūrinę analizę, naudojant deterministinį metodą, sunku aiškiai suprasti tilto konstrukcijos elgseną ir tiksliai iširti jos saugos lygį, esant neapibrėžtumui, įtrauktam į projektinius kintamuosius [4].

Vantiniai tiltai (angl. *Extradosed Bridge – EDB*) – viena iš labiausiai akį traukiančių tiltų konstrukcinių schemų (žr. 6 pav.). Pagal savo konstrukcinę schemą vantiniai tiltai yra labai panašūs į kabamuosius tiltus, o ne retai netgi painiojami. Vantiniai tiltai paplito po Antrojo pasaulinio karo kaip pakaitalas kabamajai technologijai. Šie tiltai racionalūs, tinkantys dideliems tarpatramiams, naudojami tiek automobilių, tiek pėsčiųjų tiltams. Šis tiltų tipas pamažu išstumia kabamosios sistemos tiltus, dėl lengvesnio montavimo ir pigesnės kainos [1]. Panašu, kad tiek CSB, tiek EDB identiškios konstrukcijos, nes abiejų tipų tiltai sujungia denį su bokštais, naudojant kabelius. Tačiau jų struktūrinis elgsenys skiriasi dėl skirtingo aukščio ir pločio santykio. Daugelis tyrinėtojų atliko analitinius tyrimus, kad palygintų CSB ir EDB struktūrines sistemas, jie apibrėžė EDB kaip intervencinį sprendimą ir hibridinę tilto struktūrą tarp CSB, ir iš anksto įtemptų betoninių tiltų (PCB). CSB atveju didžiąją dalį savosios ir naudojimo apkrovų neša laikantieji kabeliai, tuo tarpu standi sija be jokio tvirtinimo lyno neša visas savąsias ir naudojimo apkrovas PCB atveju. Įdomu tai, kad EDB turi dalines šaknis iš CSB ir PCB, kuriose savosios apkrovos yra paskirstytos tarp atraminių kabelių

ir sijos, o didžiąją naudojimo krūvio dalį neša standi sija. Taigi CSB ir EDB schemų atsisakymas iš esmės priklauso nuo tvirtinamų kabelių saugumo, kuris paprastai užtikrinamas numatant tinkamą saugos koeficientą. Pagal apibrėžimą, perteklinis yra struktūros sugebėjimas perskirstyti apkrovas skirtingais keliais po to, kai sugenda bet kuris komponentas [4].

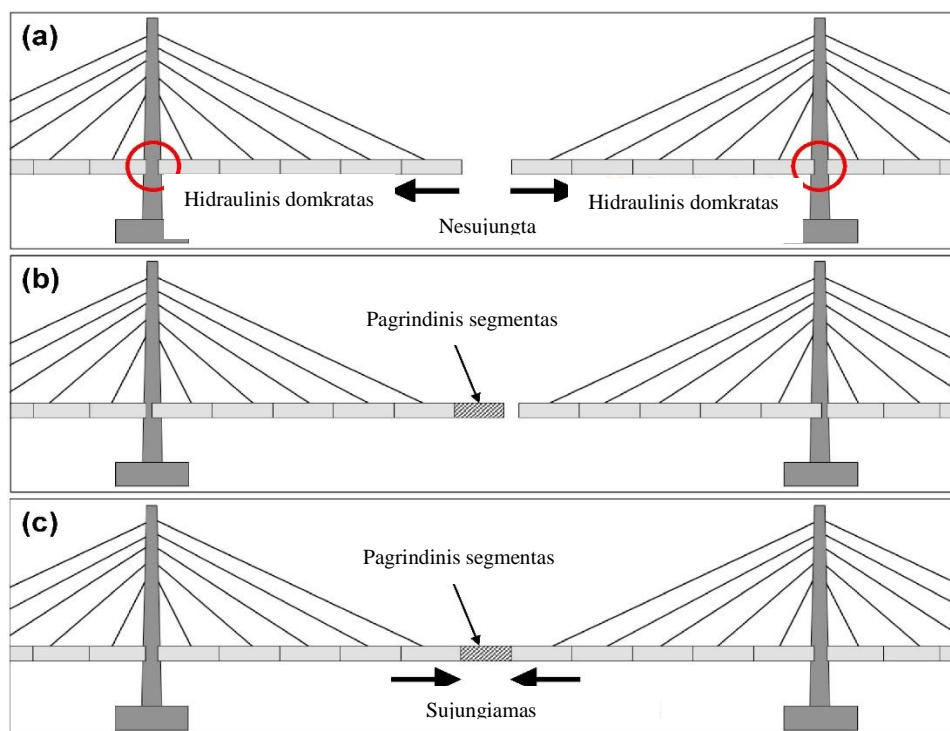


6 pav. Vantinis tiltas [3]

Paprastai lyninis tiltas statomas naudojant laisvojo konsolio metodą (FCM, dar žinomą kaip subalansuoto konsolio metodas). FCM pirmiausia montuojami pilonai, po kurių prie pilonų pritvirtinamos segmentinės dvitėjos sijos, dėl kurių susidaro konsolinės konstrukcijos. Galiausiai iš dviejų stulpų besitęsiančios konsolės sujungiamos įrengiant specialų segmentą, vadinamą „rakto segmentu“, kuris montavimo metu, vadinamas „rakto segmento uždarymu“ ir atliekamas tokia tvarka:

1. Naudojant du hidraulinius kėliklius, pritvirtintus prie kiekvieno pilono, abu konsoliai traukiami link atitinkamų stulpų (žr. 7 pav., a).
2. Tada pagrindinis segmentas pritvirtinamas prie vieno iš konsolių (žr. 7 pav., b).
3. Pakartotinis sumažinimas: tada hidraulinės kėlikliai atleidžiami, o konsolės vėl gražinamos į pradinę padėtį (žr. 7 pav., c).
4. Toliau laisvas pagrindinio segmento galas privirinamas prie kitos konsolės [5].

Tačiau, norint pagerinti atsparumą vėjui monolitiškai sujungtų stulpų ir denių danga yra tvirtai sujungta su pilonu, todėl raktų segmento uždarymas, naudojant hidraulinį kėliklį, yra neįmanomas. Šis trūkumas taip pat galioja lyniniam tiltui, sukonstruotam naudojant iš dalies įžemintą kabelių lynų (PEAC) sistemą (paprastai taikomą pagrindiniam ilgiui viršijant 500 m.), nes hidrauliniams kėlikliams reikėtų panaudoti didelę reakcijos jėgą nesėkmės etape [5].



7 pav. Vantinio tilto schema [5]

Neseniai buvo siūloma terminio išplėtimo pagrindu įdiegti pagrindinius segmentus, kaip alternatyvą nesėkmingam diegimui. Taikant šį metodą, kai tarp šiluminės apkrovos tarpas tarp dviejų konsolių yra didžiausias (t. y., kai konsolės yra trumpiausios), vienas pagrindinio segmento galas pritvirtinamas prie vieno iš konsolių. Tada kitas pagrindinio segmento galas sujungiamas su kitu konsoliu, kai tarpas yra mažiausias (t. y., kai konsolės yra ilgiausios) [5].

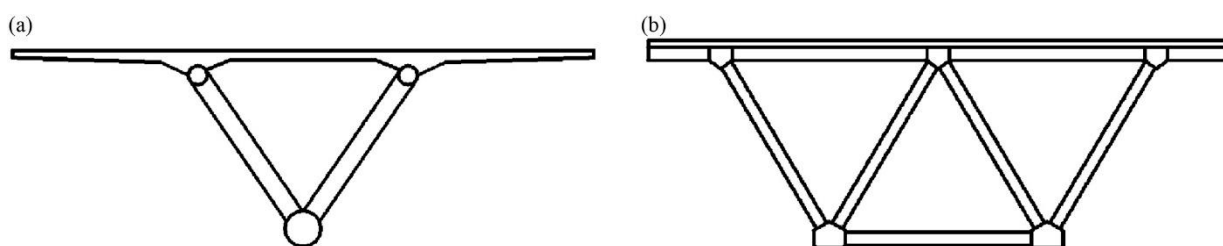
Santvarinis tiltas – santvarinėms technologijoms pažengus iki neregėtų aukštumų, jos pradėtos naudoti ne tik stogams, bet ir tiltams. Tiesa, santvariniai automobilių tiltai sutinkami gana retai. Ši technologija tiltų statybai dažniausiai taikoma geležinkelio tiltams. Tai – pigus, greitai montuojamas ir pasiteisinantis sprendimas, kur nereikia nei architektūrinio grožio, nei patogumo, svarbiausia – pats faktas, kad tiltas veikia. Santvara yra sudaroma iš apatinės ir viršutinės horizontalių sijų ir statramsčių, kurie tempimo bei gniuždymo jėgomis neleidžia sijai sukniubti (žr. 8 pav.) [1].

Pastaraisiais dešimtmečiais daugelio puikių projektų atvejų metu buvo sukurta sudėtinių santvarų tiltų su HSS (angl. *Hollow Structural Section*) tuščiavidurė konstrukcinė forma. Įprastą kompozicinį santvaros tiltą su HSS elementais sudaro betoninė perdangos plokštė ir vamzdinės santvaros konstrukcijos. Pastaraisiais dešimtmečiais Prancūzijoje ir Japonijoje buvo plačiai naudojamas novatoriškas sprendimas, sukurtas iš betoninės dvitėjės sijos, vadinamas betoniniu kompoziciniu tiltu su plieninėmis santvarų juostomis. Šiame tilte betoniniai tinklai buvo pakeisti HSS tinkleliais, kad būtų sumažintas savasis svoris, arba tiltams, kurių ilgis svyruoja nuo 40 m. iki 120 m., buvo pritaikytas kompoziciniams santvaros tiltams [6]. 3D santvaroms dažniausiai naudojami trikampio ir trapecijos formos skerspjūviai (žr. 9 pav.). Trikampis pjūvis (žr. 9 pav., a) yra paprasčiausias skerspjūvis, susidedantis iš dviejų viršutinių ir vieno apatinio. Paprastai jis naudojamas mažo tarpatramio tiltelyje, kurio diapazonas yra 40–60 m. Trapecijos formos 3D pjūvį (žr. 9 pav., b) sudaro trys viršutiniai ir du apatiniai elementai [6].



8 pav. Santvarinis geležinkelio tiltas [1]

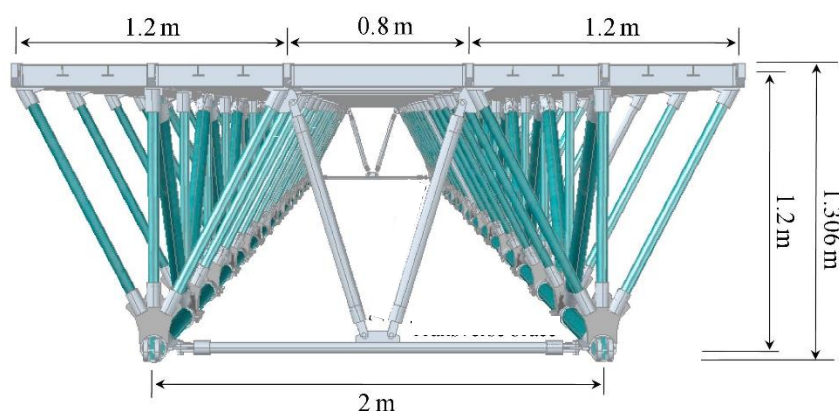
Keturi vientisos santvaros gabalai yra sujungti horizontaliais elementais, kad būtų sukurta erdvinė struktūra su stabilia sistema tiek vertikalia, tiek horizontalia kryptimi, kuri tenkina platesnių tiltų denių reikalavimus.



9 pav. Santvarų tipai [6]

Keturi vientisos santvaros gabalai yra sujungti horizontaliais elementais, kad būtų sukurta erdvinė struktūra su stabilia sistema tiek vertikalia, tiek horizontalia kryptimi, kuri tenkina platesnių tiltų denių reikalavimus. Trimatės santvaros daugiausia naudojamos tiltuose, kuriems taikomi riboti vertikalaus atstumo reikalavimai [6].

(b)



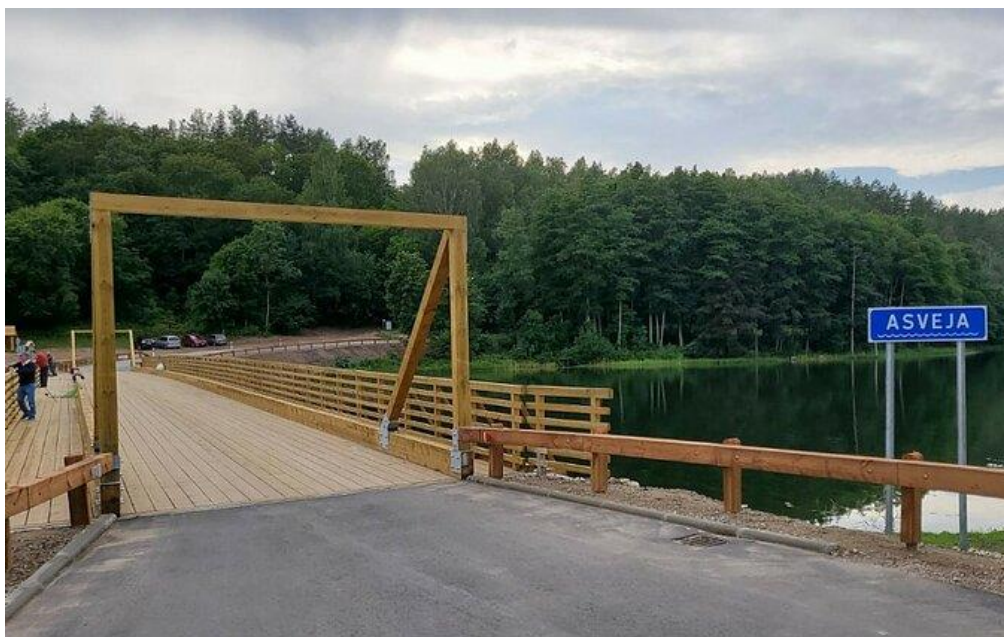
10 pav. Laikiniai surenkamas santvarinis tiltas [6]

3D santvaros skiriasi nuo plokštuminių santvarų, dėl sudėtingesnių jungtčių, todėl lieti plieniniai vamzdiniai sujungimai yra geros suvirintų plieninių vamzdinių jungtčių alternatyvos. Be to,

dabartiniuose tyrimuose dėmesys skiriamas antriam momentui dėl daugiasluoksnių šarnyrų standumo. Santvariniai tiltai taip pat puikiai naudojami kur yra poreikis lengviems avariniams tiltams, kuriuos kritinėse situacijose galima lengvai transportuoti ir montuoti izoliuotose kalnų vietovėse, kuriose yra daug apribojimų [6].

Tokių tiltų prieinamumas tampa vis svarbesnis, kai surenkant plieninius avarinius tiltus jų medžiagas transportuojančios sunkiasvorės mašinos bei transporto priemonės gali nepatekti į montavimo vietą. Buvo pasiūlytas projektas, kaip veiksmingai išspręsti šią problemą kuriant lengvą, vienos atkarpos, vienos juostos transporto priemonių avarinį tiltą, valdomą naudojant įvairias apkrovos ir įtempimo galimybes, naudojant pažangias pultruotas medžiagas [7].

Mediniai tiltai. Nuo XIX a. antrosios pusės tokioms medžiagoms kaip geležiui, plienui ir gelžbetoniui buvo teikiama pirmenybė medienos atžvilgiu. Nepaisant to, pastaraisiais dešimtmečiais mediena buvo naudojama daugelyje Europos šalių kaip konstrukcinė medžiaga būtent tiltams, lyg iš naujo atrasta tendencija (žr. 11 pav.): dėl didelio šios medžiagos jautrumo aplinkos poveikiams, inžinerijos būdu pagaminta klijuota mediena ir susijusios jungtys. Italija taip pat išgyvena šį etapą, ypač naudojant klijuotos medienos technologijos tiltus, pritaikytus pėstiesiems ir dviratininkams. [8].



11 pav. Tiltas per Asvėjos ežerą, Dubingiai, Molėtų raj.

Šiuolaikinis medinis tiltas yra konstrukcija, turinti energijos taupymo ir ekologiškų pranašumų. Šiuo metu Kinija aktyviai skatina miesto ir kaimo transporto plėtrą. Dėl Kinijos plataus kalnų ploto, jei šiuolaikinės medinės konstrukcijos bus pritaikytos trumpais ir vidutinio ilgio tiltais, tai ne tik padės sutaupyti išlaidas ir sutrumpins statybų laikotarpį, bet ir labai pagerins bei pagražins aplinką. Šiuolaikinio medinio tilto sukūrimas turės daug privalumų. Pirmiausia, jis naudos daugiau atsinaujinančių išteklių ir apsaugos mineralinius išteklius. Antra, tai praturtins kuniškų trumpųjų ir vidutinių tiltų iš statybinių medžiagų formas. Pagaliau tai paskatins Kinijos medienos pramonės plėtrą ir sumažins atotrūkį tarp Kinijos ir užsienio šalių medienos procesų technologijose. Šiuolaikinis medinis tiltas yra populiarus daugelyje šalių, pavyzdžiui, Norvegijoje, Amerikoje, Japonijoje ir pan. Yra sėkmingų šiuolaikinio medinio tilto pavyzdžių [9]. Daugelio medinių tiltų pagrindiniai tarpatainiai yra didesni nei 40 m. Šiuolaikinis medinis tiltas labiau tinka trumpo ir vidutinio ilgio tiltams. Tai turės gerą

ekonominę ir aplinkosauginę naudą, jei krašto keliai, kaimo keliai ir viadukų tiltai būtų pritaikyti moderniams mediniams trumpojo ir vidutinio ilgio tiltams.



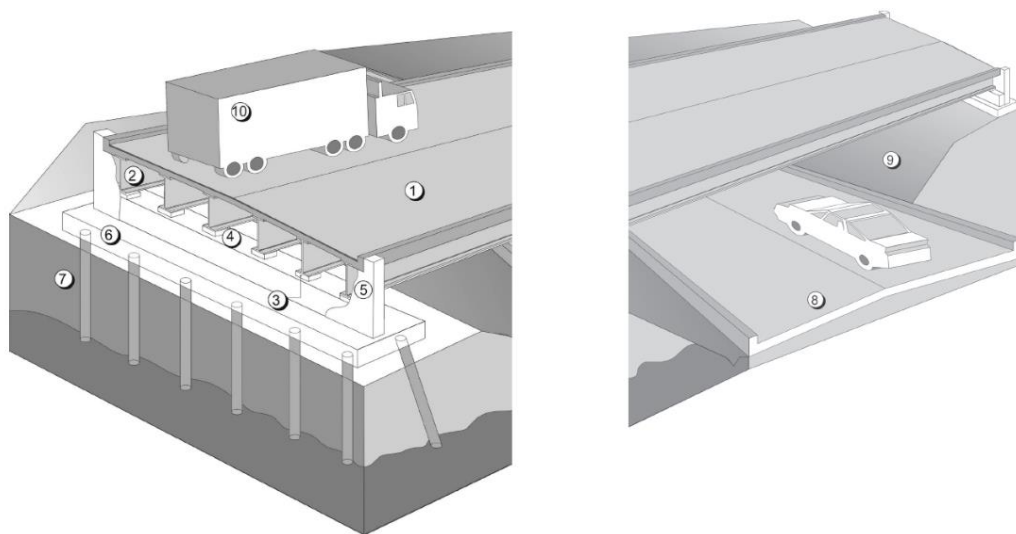
12 pav. *Black Dog Halt Bridge* tiltas [9]

Pavyzdžiui, *Black Dog Halt Bridge* tiltas, kaip parodyta 12 paveiksle, yra pėsčiųjų tiltas, esantis pietvakarių Anglijoje. Naudoto klijuoto arkos sekcijos ilgis – 34 m. Tradicinės jungtys paprastai yra sekcijos sujungimas, įpjova, šarnyras, taip pat jų sujungimas ir pan. Tačiau šių jungčių laikomoji galia ir statybos efektyvumas yra labai nedidelis, ir jų nusidėvėjimo rodikliai yra prasti. Tuo tarpu, plėtojant šiuolaikinį medinį tiltą, tarpatramiai palaipsniui didėja, poreikiai gerėja, o jungčių formos vis gausesnės. Rutulinis ir kištukinis sujungimas, leidžia sukonstruoti sudėtingas medinių santvarų konstrukcijas. Vyrių jungtys įtakoja didesnę medinės arkos tiltų populiarumą. Konstrukcijų sujungimas varžtais užtikrina daugelio kitų elementų standumą, kuris tampa saugesnis ir patikimesnis. Be to, palaipsniui atsiranda keletas naujų plieno ir medienos jungčių [9]. Klijuota mediena yra technologija, užtikrinanti medžiagos tvirtumą ir ilgaamžiškumą, todėl ji yra ideali statybinė medžiaga. Tačiau, kadangi ji yra biologinio ir poringo pobūdžio, ji yra linkusi į skilimą ir defektus. Kiekvienas defektas turi įvairių priežasčių. Yra dvi pagrindinės medienos gedimo grupės: biologinė ir nebiologinė. Pagrindinė biologinio gedimo veiksnio forma yra vabzdžių puolimas. Pagrindiniai nebiologiniai blogėjimo veiksniai atsiranda dėl fizinio irimo ir dėl atmosferos poveikio [10]. Šiuolaikinio medinio tilto ilgaamžiškumo rodikliai yra žymiai geresni, sukūrus modernią antikorozinę ir priešgaisrinę technologiją, ir pritaikius ją medinių tiltų denių dangoms. Pirma, antikorozinė technologija pagerina medinio tilto ilgaamžiškumą. Šiuolaikinės antikorozinės technologijos ir impregnantų atsiradimas pagerina medienos konstrukcijos antikorozines savybes. Impregnantais apdorotos medienos kokybė yra stabili ir ekonomiškai, todėl galima tinkamai pritaikyti ir pagerinti šiuolaikinio medienos tilto eksploataciją. Be to, palaipsniui tobulinamos su korozija susijusios specifikacijos. Antra, patobulintas atsparumas ugniai. Mediena yra tam tikra biologinė medžiaga, sudaryta iš daugybės vamzdinių ląstelių ir pasižyminti mažu šilumos laidumu. Tuo tarpu tarp ląstelių yra laisvo vandens, kad sumažėtų temperatūra, priklausomai nuo vandens garavimo. Be to, degant susidaro nedegios dujos. Didelio dydžio komponentams ant paviršiaus susidaręs karbido sluoksnis neleidžia tiekti deguonies. Didelio dydžio medienos konstrukcijos atsparumas ugniai yra toks pat geras, kaip ir kitų medžiagos komponentų. Pavyzdžiui, kai konstrukcija kenčia dėl aukštos

temperatūros (~800 °C), medienos konstrukcija nebus greitai sunaikinta, tačiau plieno konstrukcija bus greitai pažeista dėl staigaus stiprumo sumažėjimo [9].

1.2. Sijinių tiltų sudedamųjų dalių analizė

Kaip ir bet kurios profesijos atveju, tiltų inžinerija turi savo unikalią kalbą, kurią pirmiausia turi suprasti inžinieriai, kad būtų sukurtas vienodas diskusijų pagrindas. Ratinėms transporto priemonėms, tokioms kaip automobiliai, dviračiai ar sunkusis transportas, Lietuvoje dažniausiai yra naudojamos sijinės technologijos tilto konstrukcija. Pavyzdžiui, 13 paveiksle pavaizduota tipiška plokštės ant sijos konstrukcija, vadinama viaduku, kuri skersai kertą kitą kelią. Ši konkreti struktūra, parodyta paveikslėlyje, susideda iš vieno tarpatramio. Atstumas apibrėžiamas kaip tilto segmentas nuo atramos iki atramos [11].



13 pav. Sijinio tilto struktūra. 1 – antžeminė dalis, 2 – sija, 3 – guoliai, 4 – rigelis, 5 – rigelio galinė sienelė, 6 – rostverkas, 7 – poliai, 8 – požeminis pravažiavimas, 9 – šlaito tvirtinimas, 10 – naudojimo apkrova [11]

Visų pirma, norint analizuoti tilto konstrukcijas, reikia atkirti darbų procesus į pagrindines sijinio tilto statybos dalis.

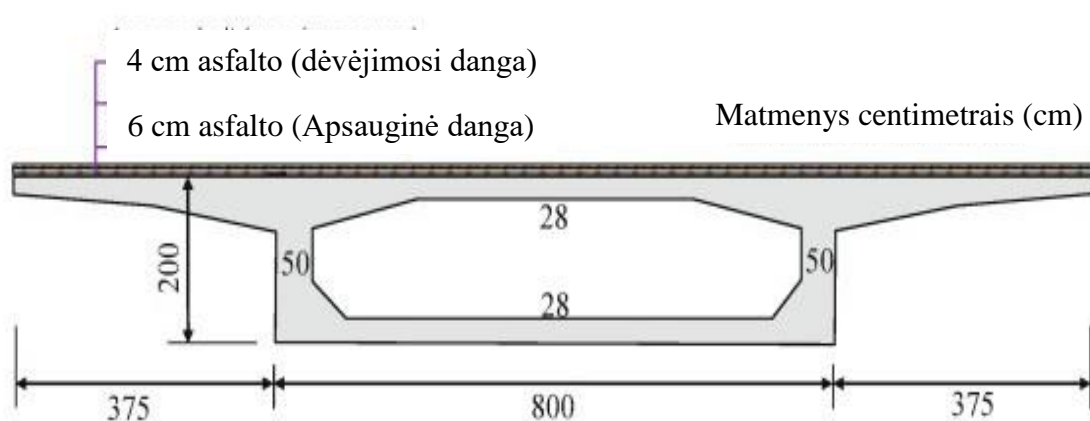
1.2.1. Antstatas. (angl. *Superstructure*)

Visų komponentų visuma esanti virš atramų. Dėl regiono topografijos (pvz., Slėnių), einant keliais, greitkeliais ir pan., tiltai paprastai neišvengiamai yra netaisyklingi. Nelygumai gali būti įvairaus altitudės aukščio, skirtingo ilgio tarpo, tilto kreivumo ar pasvirimo kampo, denio nepertraukiamumo ir pan. Nors tiltas paprastai laikomas paprasta konstrukcija su nuspėjamu seisminiu atsaku, kai kurių netaisyklingų tiltų seisminis elgesys praėjusiais žemės drebėjimais nebuvo pakankamai patenkinamas, daugiausia dėl problemų, atsiradusių dėl tiltų geometrijos pažeidimų. Paprastai taip yra dėl to, kad lankstumo reikalavimai yra sutelkti didesnio standumo elementuose, kurie linkę absorbuoti daugiau energijos, dėl to jie nusileidžia ir net sugenda, o kiti elementai gali laikyti apkrovas elastingoje būsenoje [12]. 13 paveikslėlyje parodytas tipinio antstato skerspjūvis.

1.2.2. Viršutinė danga (angl. *Wearing Surface*)

Viršutinė danga yra ta tilto skerspjūvio dalis, kuri atsispiria eismo nusidėvėjimui. Dažniausiai tai yra atskiras sluoksnis, pagamintas iš bituminės medžiagos, o kai kuriais kitais atvejais - betono danga.

Integralus susidėvėjimo paviršius paprastai yra nuo 13 iki 51 mm. Bituminio dėvėjimo sluoksnio storis paprastai svyruoja nuo 51 iki 102 mm. Tačiau storis kartais gali būti didesnis dėl tilto kelio dangos atnaujinimo, kuris vyksta per visą tilto gyvavimo ciklą [11]. Asfalto danga ant betoninio tilto denio, kuri tarnauja kaip konstrukcija, tiesiogiai veikiama apkrovų, turi atsparumo ir išsklaidymo apkrovoms funkciją. Mechaninio atsako analizėje ji dažnai laikoma vienalyte struktūra, tačiau asfalto betonas denio dangoje yra nevienalytė medžiaga, kurią sudaro asfalto skiedinys, šiurkščiavilnių užpildas ($d \geq 2,36$ mm.) ir oro tuštumos, o kiekvienas komponentas sąveikauja tarpusavyje sudėtingoje asfaltbetonio mezostruktūroje [13]. Įprastai asfaltbetonio sluoksniai ant tilto sijos viršaus yra tokie: 6 cm. storio C30/37 betonas kaip išlyginamasis sluoksnis, 6 cm. storio AC-20C asfaltbetonis kaip antrinis sluoksnis (t.y. apsauginė danga) ir 4 cm. storio SMA-13 asfaltbetonis kaip viršutinė danga (t.y. dėvėjimo danga) (žr. 14 pav.). Maksimali asfaltbetonio dangos temperatūra yra 140 °C.



14 pav. Įprastinės asfalto dangos ant tilto pjūvis [14]

1.2.3. Denis (angl. *Deck*)

Denis yra fizinis kelio pratęsimas per kliūtį, kurią reikia nutiesti, suformuoti nuolydžius ir išlyginti. Pagrindinė denio funkcija yra paskirstyti apkrovas skersai ir išilgai tilto skerspjūvio. Denis arba remiasi į rėmą, arba į kitą konstrukcinę sistemą, suprojektuotą paskirstyti apkrovas išilgai tilto ilgio [11].

1.2.4. Pagrindas (angl. *Substructure*)

Pagrindas susideda iš visų elementų, reikalingų antstatui paremti. 13 paveikslėlyje tai būtų 3–7 punktai. Pagrindinius pagrindo komponentus sudaro šie elementai:

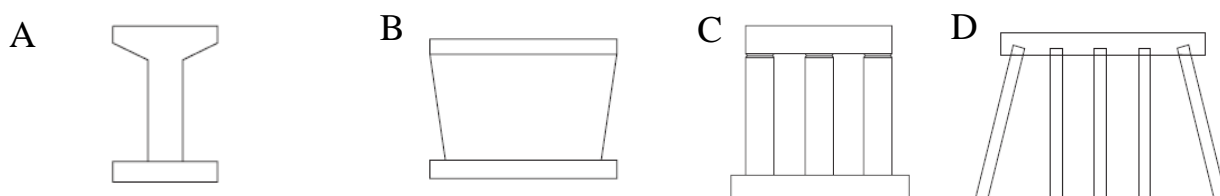
1.2.4.1. Atramos (angl. *Supports*)

Atramos tai konstrukcijos, palaikančios antstatą. Kadangi 8 paveikslėlyje pavaizduota konstrukcija susideda tik iš vieno tarpatramio, reiškia nereikia prieplaukos. Kaip ir atramos, prieplaukos būna įvairių formų, kai kurios jų yra pavaizduotos šoninėje juostoje. Estetiniu požiūriu, prieplaukos yra vienas iš labiausiai matomų greitkelio tilto komponentų ir gali pakeisti vizualiai malonią ar nepatrauklią konstrukciją. 15 paveiksle parodyta kūjo galvutės tipo atrama [11]. Atramos yra įvairių formų ir dydžių, kurie priklauso nuo konkretaus pritaikymo.



15 pav. Kūjo galvutės tipo atrama (Hammer pier support) [11]

Žemiau pateiktose schemose pavaizduoti kai kurios pagrindinio tipo atramos (žr. 16 pav.), paplitusios sijiniuose tiltuose.



16 pav. Atramų tipai. A – kūjo galvutė, B – solidi siena, C – koloninė atrama, D – polinė atrama [11]

1.2.4.2. Guoliai (angl. *Bearings*)

Pagrindinės tilto guolių, kurios yra esminė tilto konstrukcijos dalis, funkcijos yra ne tik prisitaikyti prie horizontalių ar sukimosi deformacijų dėl temperatūros pokyčių ir seisminės apkrovos, bet ir išlaikyti ir perkelti vertikalias apkrovas nuo antstato tilto denio prie pagrindo.



17 pav. Elastomerinis tilto guolis [autoriaus nuotrauka]

Pagal tilto kodeksus guolis apibrėžiamas kaip „konstrukcinis įtaisas, kuris perduoda apkrovas, tuo pačiu palengvindamas vertimą arba sukimąsi“. Statybos tikslais tilto guoliai, dar vadinami seisminiais izoliatoriais, kurie paprastai yra veikiami vertikalios ir horizontalios krypties. Palyginti su neizoliuotais tiltais, izoliacijos technika atjungia tilto antstatą nuo pagrindo, įterpdama lanksčius izoliacijos įtaisykus, tokius kaip elastomeriniai guoliai arba slankiojantys guoliai [15]. 17 paveikslėlyje pavaizduoti nesuvaržyti guoliai, kurie nevaržo tilto poslinkių nei x, nei y ašimis, taip pat neriboja jo galimo pasisūkimo. Nepaisant to, kad tiltų guoliai naudojami tiltams, jie patiria sijų sukamas deformacijas[15] . Viena iš svarbiausių tilto gedimo priežasčių yra tilto guolių konstrukcija ir konstrukciniai trūkumai. Pastaruoju metu bazinės izoliacijos sistemoje plačiai naudojami tipiniai tilto guoliai su plieno ar pluošto sutvirtinimu. Ypač pluoštu sustiprintiems guminiams guoliams jie suteikia daug privalumų, kaip didesnis standumas, stiprumas, lankstumas ir mažesnės transportavimo bei gamybos išlaidos [15]. 18 paveikslėlyje pavaizduotas tilto poslinkį varžantis guolis. Kadangi dėl skirtingų tiltų konstrukcijų ir skaičiuojamųjų schemų guolių prireikia įvairių, todėl montavimo kryptis pasirenkama statybos vietoje.



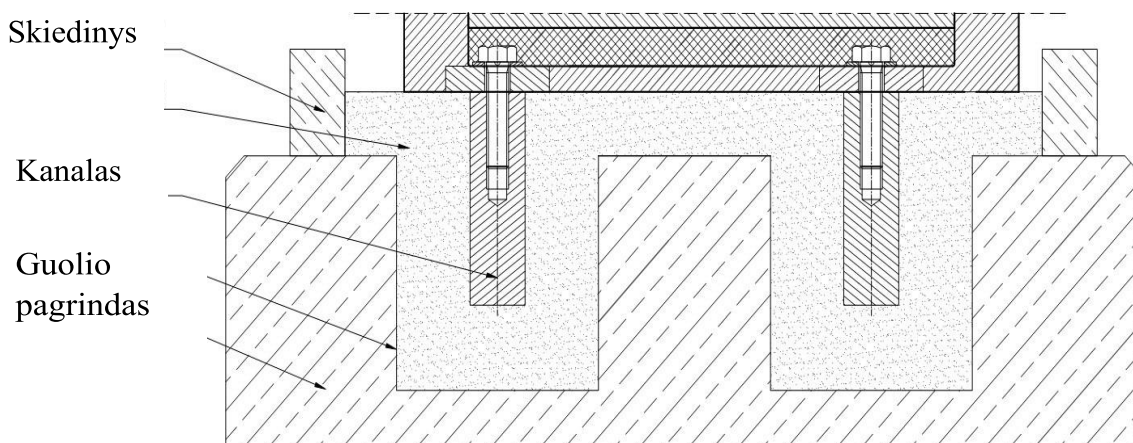
18 pav. Elastomerinis tilto guolis su vienakrypčiu suvaržymu [autorius nuotrauka]

Poslinkį varžantys guoliai ant savo sienelės turi kryptinę liniuotę, kurioje galima vertinti tilto sijų deformacijas tilto eksploatavimo laikotarpiu, kaip pavaizduota 19 paveikslėlyje.



19 pav. Tilto deformacijų vertinimo liniuotė [autorius nuotrauka]

Paprastai guoliai prijungiami prie betoninės apatinės konstrukcijos (žr. 20 pav.) .



20 pav. Guolio prijungimo prie betoninės pagalvės pjūvis [autoriaus nuotrauka]

Guolis montuojamas ant papildomo skiedinio sluoksnio arba, jei būtina, tiesiai ant cokolio. Kiekvienu atveju svarbu užtikrinti, kad guoliai turėtų tolygią atramą visame plote ir, kad po guoliu nebūtų laisvos erdvės. Daugeliu atvejų tinkamą atramą suteikia papildomas skiedinys. Skiedinio pagrindo storis turi atitikti skiedinio gamintojo reikalavimus ir standartą EN 1337-11.

1.2.4.3. Pagalvės (angl. *Pedestal*).

Pagalvė yra nedidelė atrama guoliui, kuri tiesiogiai palaiko pagrindinį antstato elementą. Kaip matyti 13 paveikslėlyje, prie kairiosios atramos išpjovos, platus flanšo strypas pritvirtintas prie guolio, kuris savo ruožtu pritvirtintas prie pagalvės. Terminas „tiltinė sėdynė“ taip pat vartojamas viršutiniam pagalvės paviršiui nurodyti. Paprastai pagalvės yra suprojektuoti skirtingo aukščio, norint gauti reikiamą guolio sėdynės aukštį (žr. 21 pav.) [11].



21 pav. Atraminė pagalvė [autoriaus nuotrauka]

1.2.4.4. Stiebas (angl. *Stem*).

Stiebas yra pagrindinis atramos komponentas virš atramos, laikantis pagalves. Jo pagrindinė funkcija yra perkelti apkrovas iš antstato į pamatą kaip pavaizduota 22 paveikslėlyje [7].



22 pav. Stiebas jungiantis rostverką ir rigelį [autoriaus nuotrauka]

1.2.4.5. Galinė siena (angl. *Backwall*)

Galinė sienelė yra atramos komponentas, veikiantis kaip atraminė konstrukcija ant stiebo. Jis taip pat palaiko privažiavimo plokštę, jei tokia yra [11].

1.2.4.6. Sparno sienelė (angl. *Wingwall*)

Sparno sienelė yra šoninė atramos atraminės sienelės ir stiebo siena, sukurta padėti uždaryti žemę už atramos. Sparnai gali būti suprojektuoti lygiagrečiai tiltui ir prieigoms, arba jie gali turėti pasvirimo kampą, kaip parodyta 23 paveikslėlyje [11]. Hibridiniai plienbetonio sieniniai rėmai dažniausiai naudojami pramoninėse konstrukcijose kaip seisminiam poveikiui atspari sistema [16]. Sparnų sienos atlieka dvigubą vaidmenį, nes, visų pirma, išlaiko užpildą, o visų antra, dalyvauja tilto seisminio atsparumo sistemoje (angl. *Earthquake Resisting System*). Sparnų sienos yra nukreiptos, kai jų stipri ašis sulenkiamą išilgine tilto kryptimi, kad padidėtų jų išilginis pasipriešinimas [17].



23 pav. Sparno sienelė [11]

Sparną monolitiškai galima supilti su atraminiu stiebu ir siena, kad būtų suformuota viena, integruota konstrukcija. Alternatyvus būdas yra uždėti šarnyrą tarp galinės sienelės ar stiebo ir sparno, taip sukuriant sparno, kuris pats veikia kaip konsolinė atraminė siena, efektą. Monolitiškai išpiltą sparno sieną sunku išanalizuoti, o armatūrinio plieno, jungiančio sparną su galine sienele, konstrukcija yra gana empirinė [11].

1.2.4.7. Rostverkas (angl. *Footing*)

Kai guoliai perkelia antstato apkrovas į apatinę konstrukciją, taip savo ruožtu galiniai ir tarpiniai rostverakai perkelia apkrovas iš pamatų į podirvį ar poliūs. Rostverkas, kurį palaiko dirvožemis arba pagrindas, be polių, vadinamas paskirstyta atrama. Polių atrama, tokia kaip 13 paveikslėlyje, yra žinoma kaip polių dangtelis. Poliais paremti pamatai dar vadinami giliaisiais pamatais [11].

1.2.4.8. Poliai (angl. *Piles*)

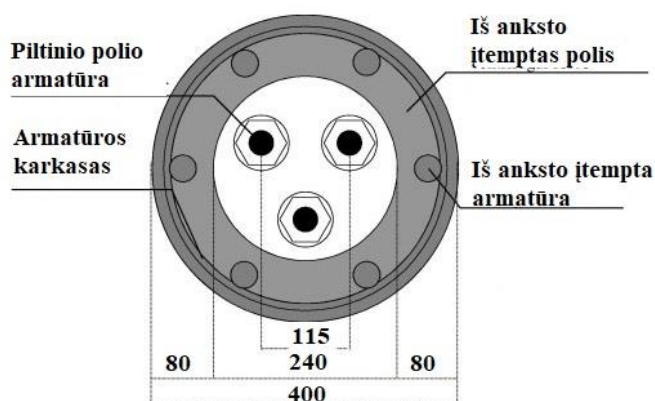
Kai paklotas dirvožemis negali tinkamai palaikyti pagrindo (atsižvelgiant į laikomąją galią, bendrą stabilumą ar nusėdimą), atrama gaunama naudojant poliūs, kurie tęsiasi nuo rostverko iki stipresnio grunto sluoksnio arba į pagrindą. Yra daugybė polių rūšių, pradedant betonu, kuris išlietas vietoje (dar vadinami išgręžtais velenais ar kesonais), surenkamieji arba plieninių H profilio polių. Poliai gali atsispirti apkrovoms per galinį guolį, trinties fikciją. 8 paveikslėlyje pavaizduoti poliai, kuriais statant tiltą remiama atrama [11]. Poliai paprastai užtikrina ekonomišką ir greitą tilto pamatą, kai yra silpnas viršutinis dirvožemio sluoksnis. Taigi, jie atitinka pagreitinoto tilto statybos principus, nes jame naudojami polių segmentai, surenkami gamyklose ir pristatomi į vietą montuoti. Vienas iš labiausiai paplitusių polių tipų yra iš anksto įtempto betono polių PPCP (angl. *Prestressed-Precast Concrete Pile*) [18]. Tokie poliai pavaizduoti 24 ir 25 paveikslėliuose.



24 pav. Iš anksto įtempto polio montavimas [18]

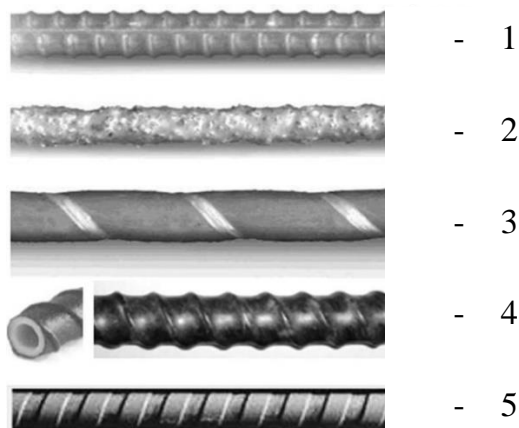
PPCP panaudojimas yra viena iš praktinių galimybių tarp įvairių tipų polių ir montavimo būdų. Ši galimybė daugeliu atvejų yra ekonomišką ir greitą alternatyvą. Dėl įvairių priežasčių dažnai atsitinka taip, kad polių segmentų sujungimas turi būti atliekamas toje vietoje, kad būtų pasiektas didesnis polio ilgis. Transportavimo taisyklės gali apriboti surenkamų iš anksto įtemptų polių segmentų, kuriuos galima pristatyti į tilto vietą, ilgį. Be to, kai yra ribojamas aukščio ilgis poliams vežioti, polių segmentų ilgis gali būti mažesnis nei bendras ilgis, reikalingas tinkamam atsparumui nustatyti. Tokiais atvejais sujungimas gali būti iš anksto suplanuotas. Kita priežastis, dėl kurios polių segmentai būtų mažesni už atsparumui reikalingą ilgį, yra nenusėjęs dirvožemio atsparumas, dėl kurio atsiranda neplanuotas sujungimas. Kaiščiai yra vienas iš įprastų sujungimo būdų, kai į apatinės krūvos

viršų įmetamos arba išgręžiamos skylės, kad būtų galima gauti kaiščio armatūrą, kyšančią iš viršutinio krūvos apatinio galo.



25 pav. Iš anksto įtempto polio armavimas [19]

Paprastai tradiciniuose įtemptuose poliuose naudojamos anglies plieno armatūra, kuri yra linkusi korozijai, ypač kai ji yra jūrinėje aplinkoje. Tokioje aplinkoje kintantis vandens lygis, vandens purslai ir aerozoliai sukelia druskų ir chlorido jonų nusėdimą, migraciją ir difuziją arba viską kartu, o tai gali pagreitinti koroziją. Pakrantės valstijose daugelis tiltų pamatų yra veikiami sūraus vandens ir atšiaurios jūrų aplinkos, o tai gali sukelti brangių priežiūros problemų ir sutrumpinti tilto tarnavimo laiką. Įprasti poliai tokioje korozinėje aplinkoje dažniausiai nusidėvi greičiau. Betono polių korozija taip pat atsiranda dirvožemyje ir požeminiame vandenyje, kur yra žemas pH, didelis chlorido ir sulfato kiekis. To pasekmė yra apkrovos sumažėjimas ir tikėtina, kad padidės nusėdimas, galiausiai sukeldamas antstatų gedimą. Nors sugedusios polių konstrukcijos gali būti pakeistos arba modifikuotos, jų priežiūra kainuos brangiai ir nebus patikima dėl ilgalaikio jų eksploatavimo. Apskaičiuota, kad įprastų polių sistemų remontas ir keitimas Jungtinėms Valstijoms kasmet kainuoja daugiau nei 1 milijardą JAV dolerių (pagal tyrimo metu pateiktą įvertinimą). Todėl didelis patvarumas, maža priežiūra ir didelis saugumas visada yra svarbiausi bet kurio tilto statytojo prioritetai. Suprantama, kad stiklo pluoštu sustiprinti polimerai GFRP (angl. *Glass fiber reinforced polymers*), anglies pluoštu sustiprinti polimerai CFRP (angl. *Carbon fiber reinforced polymers*) ir didelio stiprumo nerūdijantis plienas HSSS (angl. *High strength stainless steel*) gali būti naudojami kaip korozijai atspari armatūra [20]. Pluoštu sustiprintas polimeras FRP (angl. *Fiber reinforced polymer*) yra termiškai ir elektrai nelaidi, lengva ir labai atspari korozijai medžiaga. Taigi jie gali pasiūlyti geresnę alternatyvią medžiagą nei įprastas plienas laikančioms polių konstrukcijoms.

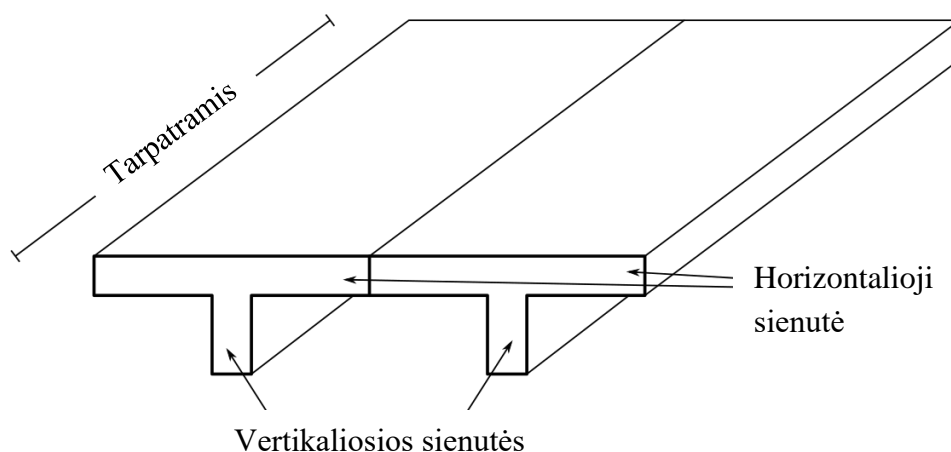


26 pav. FRP armatūrų profilių tipai: 1 – rifliuotoji, 2 – padengta smėliu, 3 – susukta ir padengta smėliu, 4 – tuščiavidurė, 5 – rievėta [21]

FRP yra anizotropinė medžiaga, pasižyminti puikiu tvirtumu lygiagrečiai pluoštų kryptims. Ši FRP savybė turi didelį poveikį šlyties stiprumui, kaiščio veikimui ir sukibimui. Nors FRP svoris yra tik ketvirtadalis plieno, jo tempiamasis stipris yra beveik tris kartus didesnis nei įprastų plieno medžiagų. FRP gaminamas iš dviejų pagrindinių pluošto dalių ir matricos dervos. Pluoštas suteikia tvirtumo ir standumo, ir gali būti pagamintas iš stiklo, bazalto, anglies arba aramido. Matricinė derva apsaugo pluoštus ir perkelia įtempius tarp pluoštų, ir gali būti pagaminta iš poliesterio, epoksido, vinilo esterio ir uretano [21].

1.2.4.9. Sijos (angl. *Beams*)

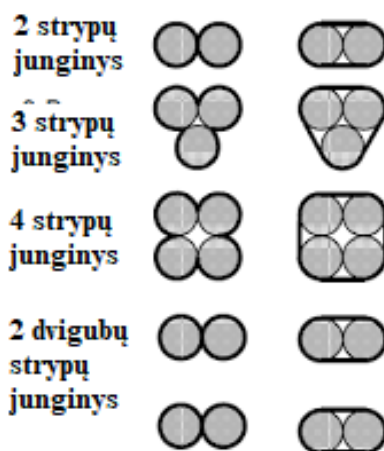
Pagrindiniai elementai – sijos, paskirsto apkrovas išilgai ir paprastai yra skirti atsparumui lenkimui ir kirpimui. 13 paveikslėlyje pagrindinius elementus sudaro susuktos plačios flanšo sijos. Kai kuriais atvejais senų tiltų išoriniai arba fasadiniai elementai turi didesnę gylį ir gali turėti jų apačioje suvirintą dangčio plokštelę, kad būtų galima atlaikyti didesnes apkrovas. Dengiamosios plokštės nebenaudojamos dėl nuovargio problemų. Naujiems tiltams dažniausiai naudojami tokie patys dydžiai tiek vidaus, tiek išorės elementams, kad ateityje būtų lengviau išplėsti tiltą. Tokie pluošto tipo pagrindiniai nariai, kaip šis, taip pat vadinami styginiais arba sijiniais. Šie elementai gali būti plieninės plačios flanšo dalys, plieninės plokščių sijos (t. y., plieninės plokštės, suvirintos kartu, kad sudarytų I profilį), įtemptas betonas, klijuota laminuota mediena ar kita sijos rūšis. Užtuot padėjus plokštę tiesiai ant pagrindinio elemento, tarp denio plokštės ir viršutinės sijos flanšo galima įdėti nedidelę jungtį. Pagrindinė šarnyro funkcija yra koreguoti denio geometriją. Taip pat tilto antstatas gali būti suformuotas dėžutės formos (stačiakampio arba trapecijos formos). Dėžinės sijos tiltai gali būti pagaminti iš plieno arba įtempto betono, ir naudojami tais atvejais, kai reikalingi dideli tarpatačiai, o kartais ir horizontaliai išlenktiems tiltams [11]. Taip pat vienos iš dažniausiai naudojamų perdangos būdų – gelžbetoninės sijos. Esant paprastam tarpsniui, ilgesniam nei maždaug 25 pėdos (apytiksliai 7,60 m.) ir nepertraukiamam, ilgesniam nei 35 pėdos (apytiksliai 10,67 m.), gelžbetoninių T sijų ekonomija tampa akivaizdi.



27 pav. T profilio sijų schema [22]

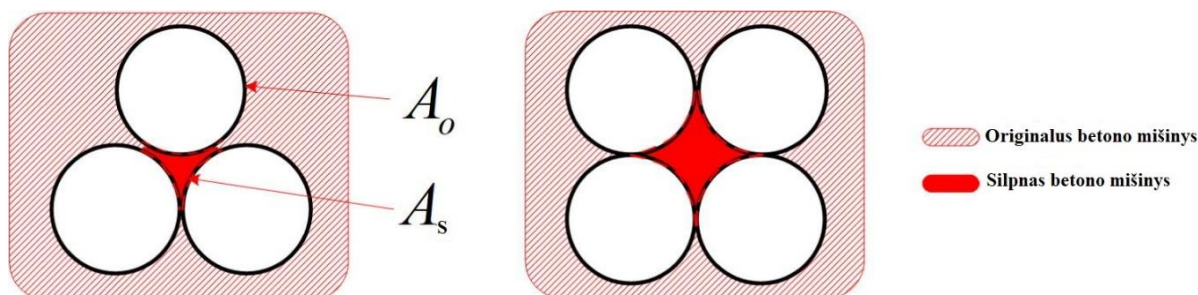
Priklausomai nuo tarpatačio ilgio ir darbo bei medžiagų kainų įvairiose geografinėse vietose, T formos sijos ekonomiškai lyginamos su gelžbetoninėmis plokštėmis, plieninėmis styginėmis (valcuotomis sijomis), suvirintomis plokščių sijomis (tiek sudėtinėmis, tiek nekompozicinėmis), gelžbetoninėmis dvitėjomis įtemptomis sijomis. Esant maždaug 25 pėdų tarpsniui (apytiksliai

7,60m.), T formos sijos ekonomiškai prilyginamos išilgai sutvirtintoms plokštėms, o ilgesnėse - jas reikia lyginti su kitų tipų perdangomis [22]. Neretai T formos sijos gaminamos naudojant sujungtų strypų technologiją, kuri pavaizduota 28 pav.



28 pav. Armatūrų jungimo būdai [22]

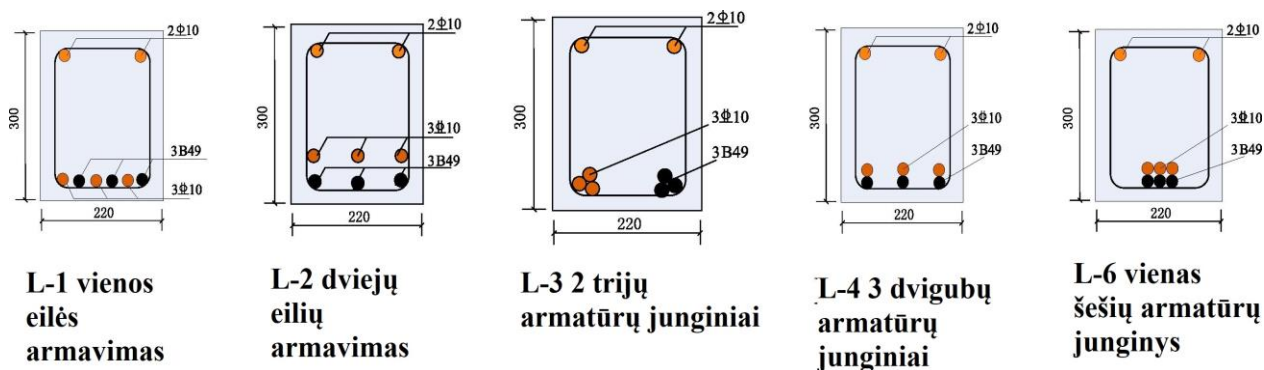
Sujungti strypai labai efektyviai sumažina betono sekcijų dydį ir sumažina armuojančio plieno labirintą, kuris dažnai trukdo betono klojimui. Pavyzdžiui, T formos sijos stiebui, sustiprintam aštuoniais Nr. 11 in. (metrinėje skalėje $\varnothing 36$ mm.) strypais dviem sluoksniais, reikia 16 colių (40cm.) pločio. Įdėjus šiuos strypus į du ryšulius, po tris strypus ir du strypus viršutiniame sluoksnyje, plotis gali būti sumažintas iki 13 colių (33 cm.). Be to, plieno ir betono klojimas yra supaprastintas. Keturios juostos gali būti sujungtos, nors pageidautina apriboti skaičių iki trijų. Ne daugiau kaip vienas strypas turi būti nutrauktas bet kuriame paketo taške. Kiekvienos juostos kūrimo ilgis turi būti toks, kad atskiros juostos skersmuo padidėtų 20 procentų trijų strypų paketui ir 33 proc. keturių strypų paketui [22]. Šis didesnio armatūros diametro poreikis susidaro dėl 29 paveikslėlyje pavaizduotos situacijos.



29 pav. Armatūrų kombinacijų būdai [23]

Didesnio armatūros diametro poreikis naudojant sujungtų strypų technologiją buvo įrodytas ir [24] straipsnio tyrime, kuriame buvo tirti 6 sijos profiliai su skirtingų tipų armavimais. Kiekvienos sijos išilginės armatūros išdėstymas yra pavaizduotas 30 paveikslėlyje. Tempiamasis L-1 sutvirtinimas yra tolygiai išdėstytas tame pačiame sluoksnyje, o atstumas yra maždaug 21 mm. Tempiamasis L-2 sutvirtinimas yra išdėstytas dviem sluoksniais, kur FRP strypai yra išdėstyti išoriniame sluoksnyje, horizontalus atstumas tarp armatūrų L-2 yra maždaug 67 mm., o vidinis plieninis strypas yra maždaug 40 mm. nuo išorinio FRP strypo. L-3 plieniniai strypai ir FRP strypai yra sutelkti į vieną ryšulį plonais plieniniais laidais, o atstumas tarp dviejų ryšulių yra maždaug 124 mm. Du sijos L-4 išilginiai strypai (FRP ir plieniniai strypai) yra vertikaliai išdėstyti grupėje, o L-4 strypų atstumai yra panašūs į L-2. Skirtumas tarp L-4 ir L-2 yra tas, kad L-4 nėra plieninio strypo ir FRP strypo vertikalaus tarpo. Šeši

išilginiai L-5 strypai sutelkti į vieną ryšulį, kuriame plieniniai strypai yra išdėstyti vidinėje pusėje, FRP strypai yra išdėstyti išorinėje pusėje, o strypo kraštai yra maždaug 67 mm. atstumu nuo abiejų maišytuvų šonus[24].

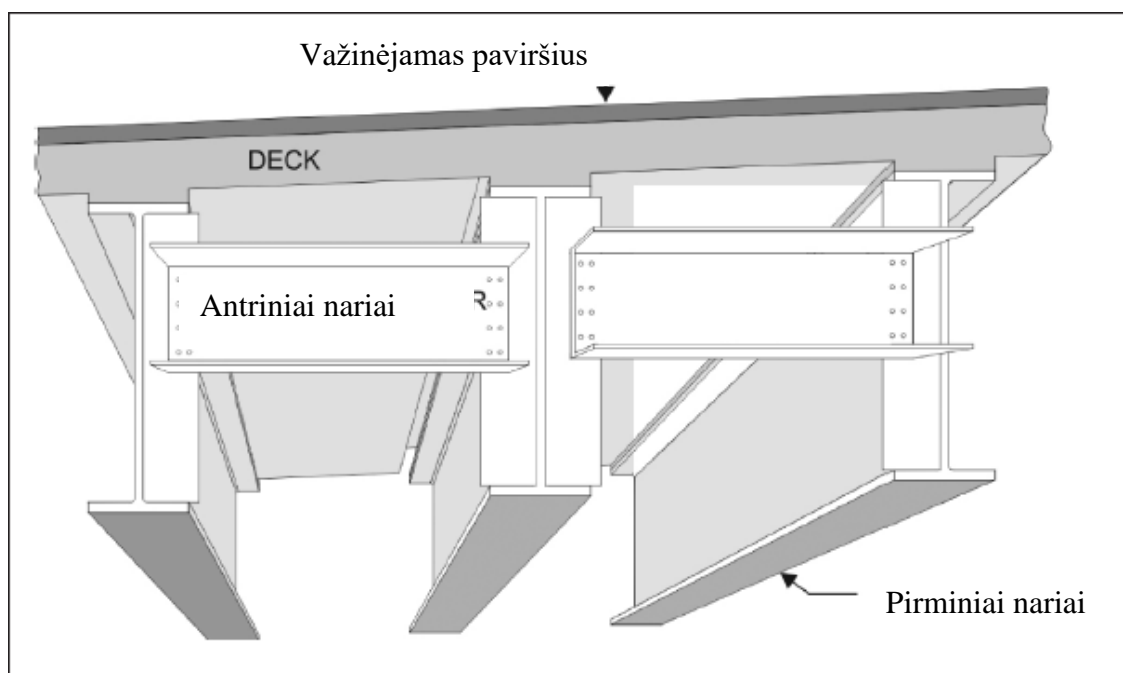


30 pav. Skirtingi betoninių sijų sutvirtinimo būdai [24]

Atliekant lenkimo momento testą kiekvienai sijai, buvo gauta, kad Betono sijos išeigos taške ir galutiniame taške sijos poslinkis su sutvirtinta armatūra yra daug didesnis nei sijos su paskirstyta armatūra, o galutinis pirmojo poslinkis net du kartus didesnis už pastarosios poslinkį, tačiau pirmojo ir antrojo galutinė apkrova buvo panaši. Šio galutinio poslinkio neatitikimo priežastis yra ta, kad sujungimo plotas tarp išilginės armatūros ir betono yra mažesnis sujungtoje armatūros sijoje nei paskirstytoje armatūros sijoje, o pirmojo jungties stiprumas taip pat yra mažesnis[24].

1.2.4.10. Sijų antriniai nariai (angl. *Beams Secondary Members*)

Sijų antriniai nariai tvirtinami tarp pagrindinių elementų (jeigu yra reikalingi), skirtų atspirti antstato rėmo skerspjūvio deformacijai ir padėti paskirstyti dalį vertikalios apkrovos tarp styginių. Jie taip pat naudojami konstrukcijos stabilumui statant. 13 paveikslėlyje išsamus tilto antstato vaizdas rodo kanalo tipo diafragmas, naudojamas tarp valcuotų sekcijų stygų.



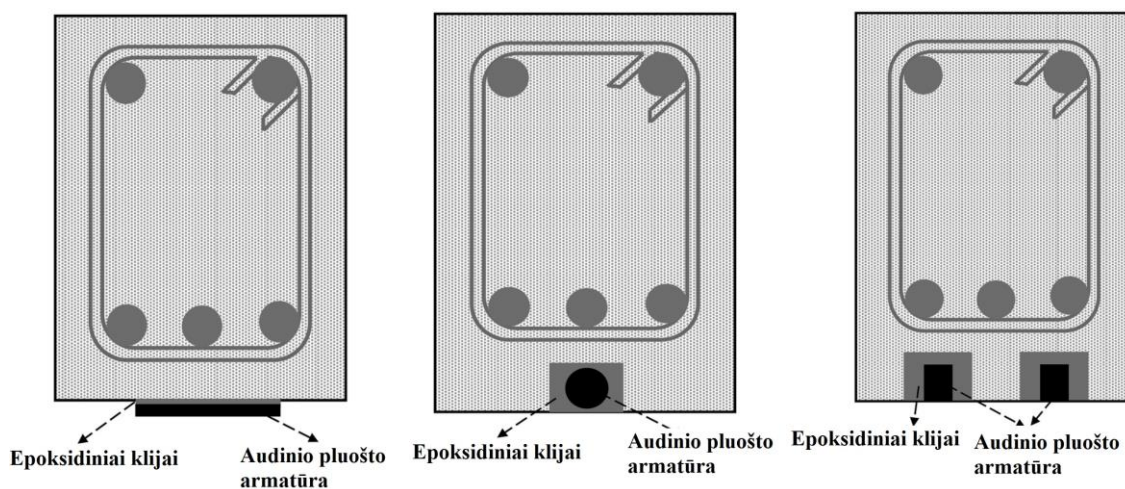
31 pav. Pagrindiniai sijinės atramos komponentai [11]

Kanalai yra prisukami prie plieninių jungiamųjų plokščių, kurios savo ruožtu privirinamos prie parodytų plačių flanšų stygų. Kiti diafragmų tipai yra nedidelių gylių, plačios flanšo sijos arba kirsti plieno kampai. Antriniai elementai, sudaryti iš horizontalių sukryžiuotų rėmų virvelės viršutiniame arba apatiniame flanše, naudojami pasipriešinti šoniniam deformavimui. Šis, antrinio elemento tipas, vadinamas šoniniu tvirtinimu [11].

1.3. Tiltų konstrukcijų naudojamų medžiagų analizė

1.3.1. Stiklo pluošto (FRP – angl. *Fiber Reinforced Polymer*) armatūros analizė

Vis dažniau ateinanti tendencija naudoti jau anksčiau minėtą FRP armatūrą sijose, kaip priemonę apsaugoti konstrukciją nuo atšiaurių aplinkos poveikių. Pluoštu sustiprintos polimerinės (FRP) kompozicinės medžiagos pasižymi puikiomis savybėmis, tokiomis kaip geras patvarumas atšiauriomis sąlygomis, didelis stiprumo ir svorio santykis, palyginti su tradicinėmis statybinėmis medžiagomis. Todėl FRP medžiagos vis dažniau naudojamos naujai statomoje civilinėje infrastruktūroje, ypač atšiaurioje aplinkoje ir pakrančių regionuose, kaip apkrovą nešančios sudedamosios dalys, tokios kaip armatūros strypai betoninėms sijoms, įtempiamieji kabeliai lyniniams tiltams, tiltų deniams ir sijoms. Iš daugelio FRP produktų pultruotieji FRP profiliai buvo ekonomiškai efektyvus ir patvarus pėsčiųjų tiltų sijų ir kelių tiltų denių sprendimas. Nepaisant šių pritaikymų, pultruotos FRP konstrukcijos dažnai yra valdomos mažo standumo, o ne stiprumo, todėl medžiaga yra neefektyviai naudojama ir padidėja pradinės išlaidos. Struktūriškai derinant pultruduotus FRP profilius su betonu, pastaruoju metu žymiai padaugėjo tiltų denių ir sijų, kaip ekonomiškesnės struktūros nei visos FRP konstrukcijos. Šios hibridinės konstrukcijos padidino lengvojo pultruoto FRP profilio ilgaamžiškumą ir nebrangios bei geros gniuždymo savybės betonui. Tarp jų pultruotos FRP-betono hibridinės sijos buvo pasiūlytos kaip efektyvus ir ekonomiškas tiltų antstatų sprendimas [25]. Nepaisant to, kad konstrukcijų sutvirtinimas FRP medžiagomis turi daug privalumų, palyginti su sutvirtinančiomis konstrukcijomis ir plieno lakštais, tamprumo trūkumas ir greitas minkštėjimas esant aukštai temperatūrai yra problematiškas [25]. Gelžbetoninių konstrukcijų sutvirtinimas naudojant FRP yra suskirstytas į du pagrindinius metodus, įskaitant išorinę armatūrą EBR (angl. *Externally Bonded Reinforcement*) ir armatūrą, pritvirtintą prie paviršiaus NSM (angl. *Near-Surface Mounted*), parodyta 32 paveikslėlyje

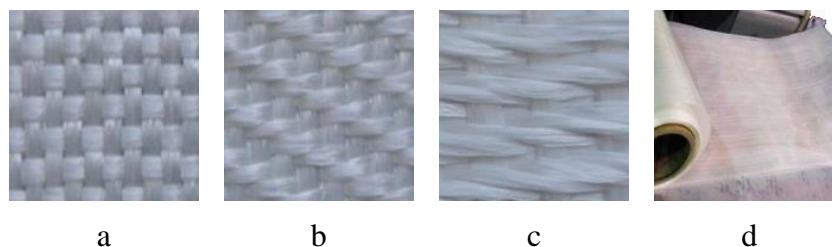


32 pav. Pagrindiniai FRP/plieno armatūrų kombinacijų tipai [25]

Laminatai yra sukibę su betono elementų tempiamuoju paviršiumi, siekiant sustiprinti lenkimą, arba elemento tinklelyje, kad sustiprėtų betono elementai. FRP strypų ar juostelių įterpimas į iš anksto supjaustytus griovelius, esančius elementų įtempimo pusėje ir iš anksto supjaustytų griovelių užpildymas didelio stiprumo klijais, daugiausia epoksidine derva, yra pagrindiniai gelžbetoninių elementų sutvirtinimo NSM metodai [25].

Kai toks FRP-RC betono elementas yra veikiamas ugnies, jo elgesyje daug labiau dominuoja FRP savybės nei betono ar plieno armatūra ankstyvosiose gaisro poveikio stadijose. Tai daugiausia lemia tai, kad FRP armatūra turi mažą toleranciją aukštai temperatūrai, todėl ankstyvosiose gaisro ekspozicijos stadijose labai pablogėja savybės, o tai savo ruožtu daro įtaką bendrai sustiprinto betono elemento ugniai. Paprastai įprastas betono elementas gali pasiekti reikiamą atsparumą ugniai, jei plieno armatūra yra pakankamai uždengta betonu. Tačiau sustiprinus tą patį RC elementą, FRP armatūra stipriau ir standžiau mažėja esant temperatūrai nei plieninė armatūra ir betonas, todėl FRP sustiprinto elemento pajėgumas mažėja daug greičiau ankstyvosiose gaisro stadijose. Kai FRP efektyvumas išnyksta, pajėgumų pablogėjimą daugiausia kontroliuoja betono ir plieno armatūros savybės, taigi sustiprinto elemento elgesys vėlesniuose gaisro poveikio etapuose atitinka RC elemento elgesį [26]. Kita svarbi problema, turinti įtakos FRP sustiprinto elemento reakcijai į ugnį, yra jungčių pablogėjimas tarp FRP ir betono. Esant tokiam sustiprintam elementui, FRP laminatai prie betoninio elemento išorinio paviršiaus yra klijuojami epoksidiniais klijais. Šie klijai gali užtikrinti gerą sukibimą aplinkos sąlygomis ir todėl yra stabilūs. Tačiau epoksidiniai klijai suminkštėja palyginti žemoje temperatūroje (net apie 65 °C), kaip aptarta anksčiau, todėl ryšys (stiprumas) tarp FRP ir betono žymiai sumažėja. Pasiekus FRP savybių kritimo temperatūrą, epoksidinės jungties stiprumas jau gali būti mažesnis nei šlyties įtempis, atsirandantis FRP-betono sąsajoje, todėl FRP laminatai gali nusilupti. Kai visiškai išardomas, FRP sutvirtinimas vargu ar prisideda prie betono elemento lenkimo ar šlyties gebos. Atliekant FRP sustiprintų RC sijų ugnies bandymus, dalis išorinio FRP laminato maždaug 20 minučių nuo gaisro pradžios nukrito nuo pradinės RC sijos. Taigi, didžioji dalis FRP stiprumo indėlio į lenkiamųjų narių pajėgumą prarandama. Verta paminėti, kad galiojančiose projektavimo standartų nuostatose neatsižvelgiama į FRP stiprumą, įvertinant skerspjūvio pajėgumą gaisro sąlygomis [26]. Darbe [27] buvo išbandytas daugybė FRP betoninių dvitramių sijų, tarp kurių buvo skirtingų skerspjūvių ir gylių sijų. Polietileno tereftalato (PET) FRP strypai laikomi labiau tinkamais nei įprasta plieninė armatūra dėl didesnio plastiškumo. Atliekant bandymus su FRP armatūra, kaip vertinimo kriterijai buvo pasirinkti keturių tipų laminatai:

- PW (angl. *Plain Woven*) – Austo audinio (žr. 33a pav.);
- TW (angl. *Twill Woven*) – Pinto audinio (žr. 33b pav.);
- UW (angl. *Unbalanced Twill Woven*) – Išbalansuoto pynimo audinio (žr. 33c pav.);
- UD (angl. *Unidirectional*) – Vienakrypčio audinio (žr. 33d pav.).



33 pav. FRP armatūrų tipai [27]

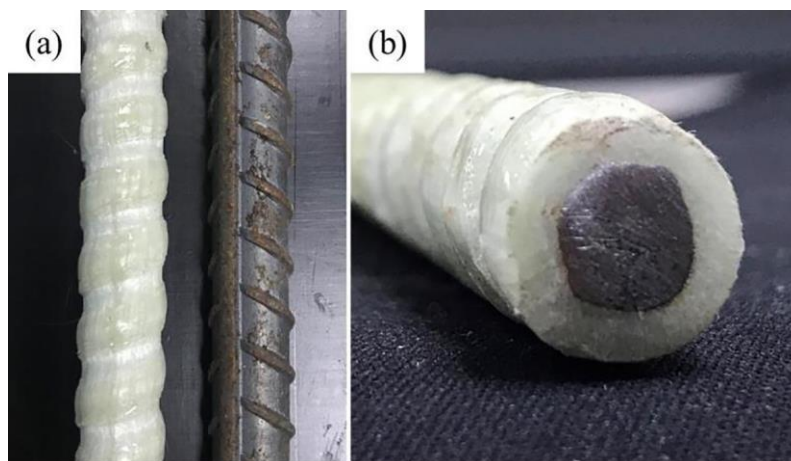
Kaip vertinimo kriterijai pasirinkti: reakcijos jėga dinaminio smūgio metu, absorbuota smūgio energija, maksimali centrinė laminato deformacija, paviršiaus frakcija, vidinio pažeidimo dydis, išorinis matomas pažeidimas, „sveiko“ (nepažeisto) mėginio galutinis lenkimo stiprumas, santykinis galutinio lenkimo stiprumo praradimas dėl smūgio, „sveiko“ mėginio atsparumas lenkimui ir santykinis lankstumo arba tvirtumo praradimas dėl smūgio. Vienakrypčio audinio (UD – angl. *Unidirectional*) laminatas gerai sugeria smūgio energiją, pasižymi didele reakcijos jėga ir centrine deformacija. Kalbant apie žalos plotą, UD laminatas taip pat pasirodė gerai. UD laminato smūginis atsparumas, palyginti su austais laminatais buvo labai prastas. Todėl taikant nedidelio greičio smūgio programas, kai vienkartinis/daugkartinis smūgiai sąlygoja mechaninių savybių sumažėjimą, pirmenybė gali būti teikiama austiems kompozitams [27]. Taip pat svarbu paminėti, kad stiklo pluošto armatūra atlaiko didesnes tempimo jėgas, todėl FRP armatūra gali būti mažesnio skersmens lyginant su plienine armatūra (žr. 1 lentelę).

1 lentelė. FRP ir plieno armatūros palyginimai [28, 29]

FRP armatūros skersmuo, mm	Plieno armatūros atitikmuo, mm	FRP armatūros santykinė masė, kg/m	Plieno armatūros santykinė masė, kg/m
4	6	0,02	0,222
6	8	0,08	0,395
8	12	0,08	0,617
10	14	0,13	1,210
12	18	0,20	2,000
16	22	0,33	2,980

Pagal 1 lentelę matoma, kad FRP armatūros strypų skersmenys yra mažesni, dėl ko susidaro mažesnė kosntrukcijos savoji apkrova (angl. *Dead Load*).

2016 m. Pasaulinė betono gamyba sudarė apie 25 milijardus tonų [30], sunaudojant daug gėlo vandens ir upių smėlio. Dėl didžiulės produkcijos trūksta gėlo vandens ir upių smėlio, taip pat sunaikinama ekologinė aplinka. Gausūs jūros vandens ir jūros smėlio ištekliai yra alternatyvus sprendimas jūrų ir pakrančių projektams. Remiantis ankstesniais tyrimais, jūros vandens smėlio betono (SWSSC, angl. *Seawater Sea-Sand Concrete*) mechaninės savybės yra panašios į Portlando paprastojo betono savybes. Tačiau jūros vandenyje ir jūros smėlyje yra chloro jonų, kurie pagreitina plieninių strypų koroziją, o tai riboja jūros vandens ir jūros smėlio naudojimą statyboms. Daugybė tyrimų parodė, kad plieną pakeitus pluoštu armuotu polimeru (FRP), lengvu, dideliu stiprumu ir puikiu atsparumu korozijai, tikimasi išspręsti plieno korozijos problemą. FRP ir SWSSC derinys, turintis didelę reikšmę laivų inžinerijos statybai, sulaukė vis didesnio dėmesio. Atsižvelgiant į tai, kad FRP strypai yra labai stiprūs, jie turi mažo elastingumo modulio ir trapių trūkumų, todėl FRP strypų gelžbetonio elementų standumas ir lankstumas yra mažas. Siekiant išspręsti aukščiau išvardytas problemas, FRP ir plieniniai strypai sumaišomi, siekiant padidinti FRP gelžbetonio elementų standumą ir lankstumą. Yra du hibridinio sutvirtinimo būdai. Pirmasis būdas yra tiesiogiai pridėti plieninių strypų, kad būtų paruoštos tiesioginės hibridinio gelžbetonio konstrukcijos, o antrasis - apvynioti FRP ant plieninio strypo, kad būtų paruoštas plieno pluoštu sustiprintas polimerinis kompozicinis strypas (SFCB, angl. *Steel-Fiber Reinforced Polymer Composite Bar*), kuris pavaizduotas 34 paveikslėlyje.



34 pav. Plieno pluoštu sustiprintas polimerinis kompozicinis strypas (SFCB, angl. *Steel-Fiber Reinforced Polymer Composite Bar*) [30].

Nors tiesioginis plieninių strypų pridėjimas yra veiksmingas ir patogus, plieno strypų korozijos problema vis dar egzistuoja ir kelia susirūpinimą dėl patvarumo. SFCB gali efektyviai pagerinti FRP gelžbetoninių elementų standumą, lankstumą ir pasižymi puikiu atsparumu korozijai. Taigi SFCB turi labai plačią perspektyvą pakrančių ir tiltų statyboje naudojant jūros vandenį[30].

1.3.2. Betono savybių gerinimo priedų analizė

Betonas yra viena iš plačiausiai naudojamų medžiagų statybos inžinerijoje. Tačiau ilgalaikio eksploatavimo metu betonai gali pablogėti, pvz., Karbonizacija ir jonų erozija, dėl to sumažėja eksploatacinės savybės ir sutrumpėja statybos tarnavimo laikas. Todėl konkrečių rezultatų gerinimas vis dar yra neatidėliotinas klausimas. Per pastaruosius 50 metų cemento pagrindu pagamintų medžiagų bio-mineralizacijos technologija sparčiai vystėsi. Darbai biomineralizacijos srityje patvirtino, kad jis yra patikimas gerinant našumą trimis pagrindiniais būdais. Vienas iš būdų yra padengti paviršių mikroorganizmais, kad būtų apsaugotas paviršinis betono sluoksnis, o antrasis - ištaisyti įtrūkimus, paskutinis - į betoną dedami mikroorganizmai, siekiant pakeisti jo vidinę mikrostruktūrą, taip pagerinant betono savybes [31]:

1. Betonų paviršių padengimas mikroorganizmais. Biologinė mineralizacija ant cemento pagrindo medžiagų paviršiaus paprastai buvo nusodinama CaCO_3 kristalų sluoksniu. Šis sluoksnis buvo naudojamas kaip danga arba barjerinis sluoksnis, siekiant užkirsti kelią ar sumažinti korozinių medžiagų prasiskverbimą į betono matricą, taip pagerinant betono savybes. Sluoksnio storis priklauso nuo biogeninio CaCO_3 kiekio. Naudojant grynas karbamido skaidančias kultūras, vandens absorbcija sumažėjo žymiai labiau nei naudojant mišriąsias karbamido skaidančias kultūras. Terpės sudėtis gali paveikti kalcio karbonato kristalų morfologiją ir polimorfą. Veiksmingas būdas gaminti daugiau CaCO_3 kritulių buvo padidinti bakterijų ląstelių koncentraciją. Darbai šioje srityje parodė, kad bakterinis karbonatas ne tik tvirtai prilipo prie paviršiaus, bet ir turėjo konsolidacinį poveikį paviršiui [31].
2. Įtrūkimų ištaisymas. Retai naudojamas betono kokybės gerinimo būdas, taikomas deformuotai konstrukcijai. Gali būti panaudotas tas pats CaCO_3 , nusodintas biologinės mineralizacijos būdu [31].
3. Į betono mišinį dedamų mikroorganizmų būdas. Mikroorganizmų maišymas į cemento pagrindu pagamintas medžiagas taip pat pagerina jo veikimą. Mokslininkai išskyrė bakteriją *Bacillus* sp. CT-5 iš cemento pavyzdžių ir gelžbetonio pavyzdžius apdoroto mikrobu indukuoto karbonato

kritulių (MICP, angl. *Microbially Induced Carbonate Precipitation*) metodu. Rezultatai parodė, kad po MICP apdorojimo pagerėjo bandinių tempiamasis stipris ir atsparumas korozijai. Taip pat išskyrė ureolitines bakterijas iš šarminių dirvožemių ir sumaišė bakterijas į betoną. Rezultatai parodė, kad *S. pasteurii* biologinė mineralizacija padidino gniuždymo jėgą, sumažino betono poringumą ir pralaidumą. Išskyrus bakterijas *Bacillus megaterium* BSKAU, *Bacillus licheniformis* BSKNAU ir *Bacillus flexus* BSKNAU iš šarminio dirvožemio šalia cemento gamyklos, rezultatai parodė, kad mėginio mikro įtrūkimai buvo sutvarkyti ir pagerėjo atsparumas gniuždymui [31].

2. Tyrimo metodologija

2.1. Daugiafunkcinių sprendimo priėmimo metodų klasifikacija ir metodologija

Daugiakriteriai sprendimų metodai, naudojami optimaliam sprendimui rasti, skirstomi į dvi pagrindines grupes: daugiaobjekčius ir daugiatislius. Šių metodų pirminiai duomenys yra rodiklių reikšmingumo vektorius ir sprendimo priėmimo matrica, sudaryta iš rodiklių reikšmių. Pirminiai duomenys nustatomi remiantis statistiniais ar ekspertiniais duomenimis. Daugiatisliu metodu gautas rezultatas yra nagrinėjamų alternatyvų išreiškimas prioritetine eilute[32].

Vienas svarbiausių pastato įgyvendinimo proceso daugiakriterės analizės etapų - alternatyvas apibūdinančių reikšmių ir reikšmingumų nustatymas. Apskaičiavus kriterijų reikšmes ir reikšmingumus bei taikant projektų daugiakriterės analizės metodus, nustatomi lyginamų variantų prioritetiškumas, naudingumo laipsnis ir vertė. Apskaičiuojamos viso projekto kiekybinių ir kokybinių kriterijų reikšmės. Naudojantis rekomendacijomis, kainynais, normatyvais, žinynais, projektais, kitais informacijos šaltiniais apskaičiuojamos kiekybinės reikšmės. Kokybinių kriterijų reikšmės dažniausiai nustatomos remiantis ekspertiniais metodais[32].

Daugiakriteriai sprendimų priėmimo metodai (angl. *MultiCriteria Decision Making*.) naudojami optimalaus sprendimo suradimui skirstomi į dvi grupes: daugiaobjekčius ir daugiatislius metodus. Daugiakriterių sprendimo priėmimo metodai, naudojančys vektorinę optimizaciją, pagrįstą sprendimo proceso modeliu, vadinami daugiakriteriais optimizavimo metodais arba daugiaobjekčiais (angl. *Multi Objective Decision Making*.) metodais. Šie metodai taikomi sprendžiant problemą, apimančią daugelį tikslo funkcijų, kurios optimizuojamos vienu metu. Išsamiai daugiakriterinio optimizavimo metodai nagrinėjami daugelio mokslininkų. Daugiatisliai (angl. *Multi Attribute Decision Making*) metodai taikomi, kai reikia išrinkti racionalią alternatyvą iš konkretaus žinomų alternatyvų sąrašo. MADM nagrinėja problemas, tarp kurių sprendinių aibė yra diskretinė (angl. *Discrete*), t.y. ją sudaro aibė galimų alternatyvų. Alternatyvos – tai galimi skirtingi ir tikslingi sprendimai, apibūdinami tam tikrais rodikliais. Rodikliai atspindi tam tikrus alternatyvų nagrinėjimo aspektus, ir kiekvienas iš jų apibūdina vieną alternatyvos savybę. Kadangi skirtingi rodikliai atspindi skirtingus požiūrius į alternatyvas, jie gali būti prieštaraujantys vieni kitiems (pvz., kainos rodiklis gali prieštarauti naudos rodikliui ir pan.). Taip pat svarbu pažymėti, kad rodikliai gali būti matuojami skirtingais mato vienetais (pvz.: kaina – pinigais, kiekis – vnt., m^2 , m^3 ir pan.). Todėl rodiklius būtina normalizuoti, kad jie taptų bedimensiniais dydžiais. Pasak kai kurių autorių, norint palyginti alternatyvas, būtina įtaką darančius veiksnius išreikšti tarpusavyje lyginamais dydžiais, kad juos būtų galima lygiavertiškai naudoti alternatyvų vertinime. Rodiklių svarbai, reikšmingumui nusakyti nustatomi santykiniai rodiklių reikšmingumai, kurie parodo, kiek vienas rodiklis yra svaresnis už kitą. Pasaulyje sukurta nemažai daugiatislių sprendimo metodų, bet kol kas nėra nustatyta, kuris labiausiai tinka spręsti vienokio ar kitokio tipo uždaviniams. Pagal pradinių duomenų, naudojamų alternatyvų rangavimui, tipą daugiatisliai sprendimo priėmimo (MADM) metodai klasifikuojami į deterministinius, stochastinius ir neapibrėžtų (angl. *Fuzzy*) aibių teorijos metodus. Kitas būdas klasifikuoti MADM metodus yra pagal tai, kiek sprendimo priėmėjų (angl. *Decision Makers*) dalyvauja sprendimo priėmime. Atsižvelgiant į sprendimo priėmėjų kiekį, gali būti vieno asmens sprendimas arba grupės sprendimas. Mokslininkai vieno asmens MADM metodus dar skirsto į kategorijas pagal informacijos tipą ir jos prieinamumą. Remiantis daugelio mokslininkų aprašytais daugiakriterinių sprendimo priėmimo metodų klasifikacijomis, autorius siūloma MADM metodų

sudaroma daugiatislių sprendimo priėmimo metodų klasifikacija, paremta informacija apie rodiklius. Naudojama klasifikacija pateikta lentelėje (2 lentelė) [32].

2 lentelė. Daugiatislių metodų klasifikacija[32]

<i>Metodų klasė</i>	<i>Informacija, gauta iš sprendimą priimančio asmens, apie rodiklius</i>	<i>Metodai ir jų klasės</i>
Metodai pagrįsti daugiakriterė naudingumo teorija	Kiekybiniai matavimai	SAW, TOPSIS, TOPSIS-G, COPRAS, COPRAS-G, ARAS, MOORA, VIKOR, MultiMOORA
Analitinės hierarchijos ir neapibrėžtų aibių metodai	Kokybiniais matavimams suteikiamas kiekybinis pavidalas	Analitinis hierarchijos procesas (AHP) Metodai naudojantys neapibrėžtas aibes (Fuzzy) (Fuzzy TOPSIS), (Fuzzy AHP)
Verbalinės analizės sprendimų metodai	Kokybiniai matavimai, nepereinama prie kiekybinių kintamųjų	Verbaliniai metodai: ZAPROS, PARK, ORKLASS, CLARA, DIFLASS, CIKL
Lyginamosios preferencijos metodai	Kiekybiniai ir kokybiniai matavimai	ELECTRE metodai, PROMETHEE metodai, MELCHIOR metodas, UTA metodas, MAUT metodas, TACTIC metodas ir kt..

Daugiakriterinės analizės sritis iki galo neišnagrinėta, o naudojami metodai nėra tobuli. Triantaphyllou (2000) palygino skirtingus daugiakriterinės analizės metodus ir priėjo išvados, kad neįmanoma nustatyti geriausio metodo. Konkrečioms problemos spęsti metodai gali būti tinkami arba ne ir kiti mokslininkai teigia, kad daugiatisliais metodais nepasiekama galutinio sprendimo. Galutinį sprendimą priima žmogus ar keletas žmonių. Daugiatisliai metodai padeda susisteminti ir apdoroti matematiškai pateiktą informaciją – sudaryti alternatyvų prioritetų eilutę (alternatyvas ranguoti), parodančią, vienos alternatyvos pranašumą už kitą. Asmuo priimantis sprendimus, analizuoja galimas alternatyvas, remdamasis jas apibūdinančiais rodikliais, kurie gali tarpusavyje skirtis tiek savo struktūra, tiek patikimumo lygiu. Atsižvelgiant į turimus pradinis duomenis, daugiatislių sprendimo priėmimo problemų sprendimui parenkamas atitinkamas daugiatislis sprendimo priėmimo metodas ar metodų kompleksas. Nors visi daugiatisliai sprendimo priėmimo metodai skirti nagrinėjamų alternatyvų rangavimui, tačiau kartais pasitaiko, jog taikant kelis daugiatislius sprendimų priėmimo metodus tų pačių alternatyvų rangavimui, rangavimo rezultatai nesutampa.[32]

2.2. Daugiatislio sprendimo priėmimo metodų kompleksas

Daugiatisliai sprendimo priėmimo metodai taikomi daugelyje sričių, tiek inžinerinių, tiek medicininių, tiek investicinių uždavinių sprendimui. Šie uždaviniai turi keletą bendrų bruožų: alternatyvos vertinamos pagal keletą rodiklių, vertinimo kriterijai gali būti prieštaraujantys vieni kitiems, vertinimo rodikliai gali turėti skirtingus matavimo vienetus. Daugiatislio vertinimo tikslas – visų, nagrinėjamo reiškinio alternatyvų, surangavimas. Sprendimų priėmimo procesą sudaro trys etapai:

1. Alternatyvų sąrašo sudarymas;
2. Rodiklių, pagal kuriuos vertinamos alternatyvos, apibrėžimas;
3. Alternatyvų surangavimas [32].

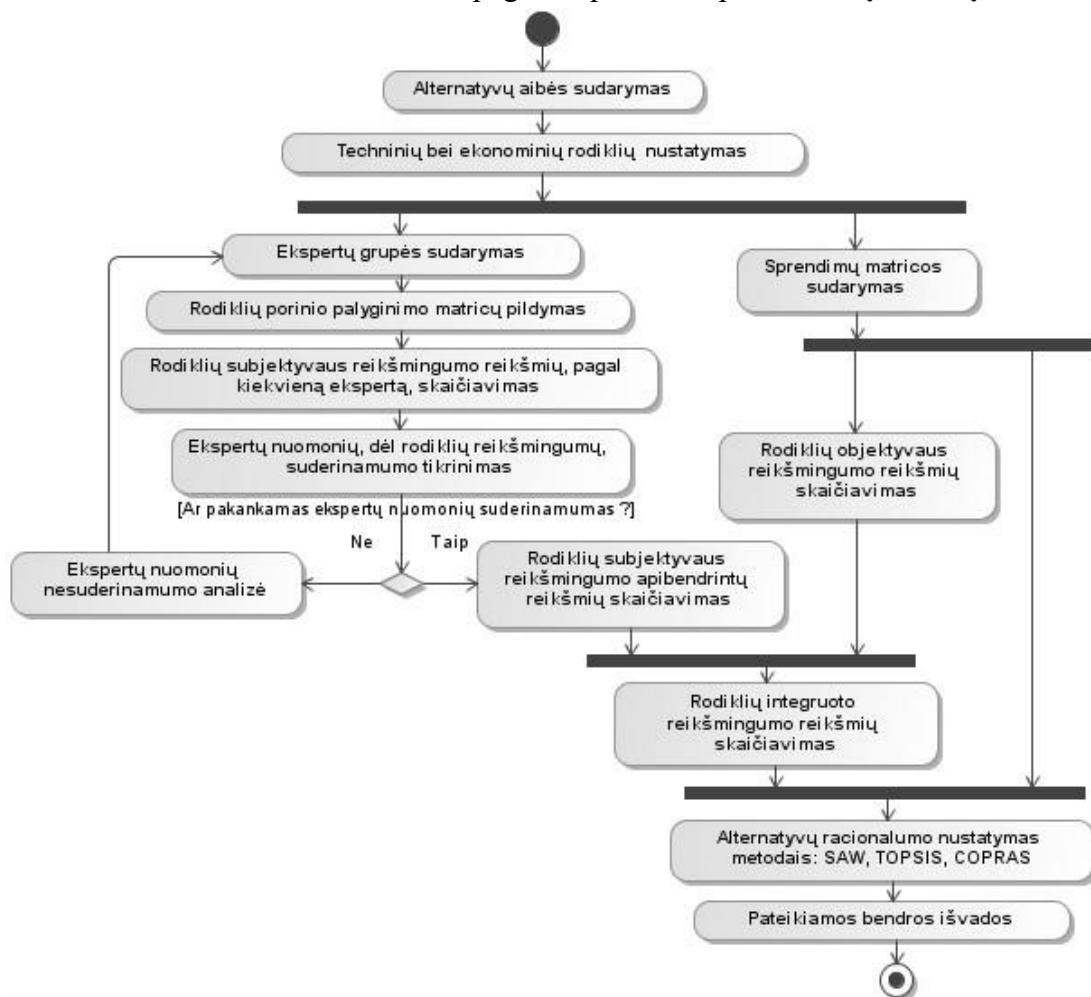
Pirmu darbo etapu sudaroma alternatyvų, kurios bus naudojamos uždaviniams spręsti, aibė. Šios alternatyvos trumpai vadinamos sprendimo variantais. Antru darbo etapu sudaroma rodiklių aibė, nustatomos tų rodiklių reikšmės kiekvienai alternatyvai. Trečiu darbo etapu analizuojami sprendimo variantai. Geriausio varianto išrinkimas pagrįstas diferencijuotu variantų vertinimu naudojant antrame etape gautus. Tobulėjant valdymo metodams ir skaičiavimo technikai, daugiatisliai sprendimo priėmimo metodai tampa vis svarbesni priimant sprendimus įvairiose veiklos srityse. Vienkriteriniais vertinimo metodais neįmanoma išspręsti problemų sudėtingose technologijų ar marketingo sistemose. 2007 metais pasiūlytas daugiatislių metodų kompleksas (MCDM-1), leidžiantis sudaryti efektyvią sudėtingų problemų sprendimo metodiką, apimančią daugelį efektyvumo rodiklių. Minėtas metodų kompleksas bus naudojamas visame darbe, atliekant metodų TOPSIS (angl. *Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution*), SAW (angl. *Simple Additive Weighting*) bei COPRAS (angl. *The COmplex PROportional Assessment*) jautrumo analizę, bei pačio metodų komplekso jautrumą analizę. MCDM-1 sudaro šie etapai:

1. Sudaroma reiškinio alternatyvų aibė;
2. Apibrėžiami techniniai bei ekonominiai efektyvumo rodikliai, kuriais remiantis bus nagrinėjamos alternatyvos.
3. Sudaroma reiškinio sprendimų matrica.
4. Sudaroma grupė, kuri pildo efektyvumo rodiklių porinio palyginimo matricas.
5. Pagal kiekvieno eksperto užpildytas rodiklių porinio palyginimo matricas, apskaičiuojamos efektyvumo rodiklių reikšmingumo reikšmės ir pagal gautas reikšmes nustatomi rodiklių rangai.
6. Patikrinamas ekspertų nuomonių, dėl rodiklių reikšmingumų, suderinamumas, skaičiuojant konkordancijos koeficientą. Jei ekspertų nuomonių suderinamumas pakankamas, galima pasikliauti nustatytais efektyvumo rodiklių subjektyvaus reikšmingumo reikšmėmis.
7. Naudojant sprendimų matricą apskaičiuojamos efektyvumo rodiklių objektyvaus reikšmingumo reikšmės.
8. Naudojant rodiklių subjektyvaus ir objektyvaus reikšmingumo reikšmes – skaičiuojamos rodiklių integruoto reikšmingumo reikšmės ir tolimesniems skaičiavimams naudojamos būtent jos.
9. Naudojant sprendimų matricą ir atitinkamas efektyvumo rodiklių reikšmingumo reikšmes alternatyvų vertinimui taikomi trys daugiatisliai sprendimo priėmimo metodai: artumo idealiajam taškui metodas (TOPSIS), paprastasis adityvus svorių metodas (SAW) bei kompleksinio proporcingumo vertinimo metodas (COPRAS).
10. Atlikus daugiatislę analizę, daromos bendrosios išvados.

Atliekant daugiatislių metodų komplekso jautrumo analizę, pagrindinis dėmesys skiriamas šiems etapams:

1. Techninių bei ekonominių rodiklių nustatymui – bus nagrinėjama efektyvumo rodiklių reikšmių galimų paklaidų įtaka alternatyvų rangavimui;
2. Efektyvumo rodiklių subjektyvus reikšmingumo nustatymui – bus nagrinėja alternatyvų rangavimo priklausomybė nuo rodiklių reikšmingumo reikšmių pokyčių, kuriems įtaką turi ekspertų nuomonės;
3. Ekspertų nuomonių nesuderinamumo analizei – bus nagrinėjama ekspertų nesuderinamumo ir porinio palyginimo matricų darnos tarpusavio priklausomybė.

Daugiatiksliai vertinimo metodai atliekami pagal 24 paveiksle pavaizduotą schemą.



35 pav. Daugiatikslių vertinimo metodų schema [33]

Rodiklių subjektyvus reikšmingumas, nurodo jį nustatančio eksperto subjektyvų požiūrių rodiklių svarbą. Subjektyvus reikšmingumas gali būti nustatomas porinio palyginimo metodu. Šis metodas patogus tuo, kad ekspertas gali lyginti rodiklius tarpusavyje po du. Prioritetui nustatyti naudojama pačio autoriaus pasiūlyta reikšmingumų skalė (žr. 3 lentelę) [33].

3 lentelė. Svarbumo skalės lentelė [33]

Svarbumo lygis	Apibrėžimas
1	Rodikliai vienodai svarbūs
3	Vienas rodiklis truputi svarbesnis už kitą
5	Vienas rodiklis svarbesnis už kitą
7	Vienas rodiklis daug svarbesnis už kitą
9	Vienas rodiklis nepalyginti svarbesnis už kitą
2,4,6,8	Tarpinės reikšmės

Ekspertinės porinių rodiklių palyginimo anketos (lentelės) pildomos šiuo principu: eilutėje esantis rodiklis lyginamas su stulpelyje esančiais rodikliais. Turint ekspertų užpildytas rodiklių porinio palyginimo anketas, sudaromos matricos, kurios naudojamos efektyvumo rodiklių subjektyvaus reikšmingumo reikšmių apskaičiavimui.

2.3. SAW metodologija

Paprastasis adityvus svorių metodas (SAW – Simple Additive Weighting) yra vienas iš paprastesnių ir plačiausiai taikomų metodų. Metodo taisyklės apibendrinio MacCrimmon (MacCrimmon, 1968). Įvesties duomenys – sprendimų matrica ir rodiklių reikšmingumo reikšmės. SAW metodo žingsniai:

1. Sprendimų matrica normalizuojama;
2. Normalizuotosios matricos to paties varianto kiekvienas narys dauginamas iš jo reikšmingumo ir sudedamas su kitais alternatyvos (eilutės) nariais.

Metodo pagrindiniai uždaviniai – sudaryti galimų sprendinių matricą, normalizuoti šios matricos narių vertes ir pritaikius kiekvieno rodiklio reikšmingumą apskaičiuoti, kuri alternatyva yra efektyviausia. Racionaliausias laikomas tas sprendinys, kurio normalizuotų rodiklių, padaugintų iš atitinkamų rodiklių reikšmingumų, suma yra didžiausia.

Vertinimo rodikliai gali būti minimizuojami (geriausias yra tas pasirinkimas, kurio vertė yra mažiausia) arba maksimizuojami (geriausias yra tas pasirinkimas, kurio vertė yra didžiausia).

Galimų sprendinių matricos minimizuojamieji ir maksimizuojamieji nariai (vertinimo rodikliai) turi tenkinti sąlygą:

$$\sum_{j=1}^n q_j^* = 1 \quad (2.1)$$

Galimų sprendinių matricos maksimizuojamieji nariai (vertinimo rodikliai) normalizuojami atitinkamai pagal:

$$\bar{x}_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_j^{max}} \quad (2.2)$$

Galimų sprendinių matricos minimizuojamieji nariai (vertinimo rodikliai) normalizuojami atitinkamai pagal:

$$\bar{x}_{ij} = \frac{x_j^{min}}{x_{ij}} \quad (2.3)$$

Nustatant varianto racionalumą, atitinkami normalizuotosios matricos nariai dauginami iš efektyvumo rodiklių reikšmingumo reikšmių ir gautos sandaugos susumuojamos. Racionalaus varianto sandaugų suma bus maksimali:

$$A = \left\{ \frac{A_i}{\max_i * \sum_{j=1}^n q^* \bar{x}_{ij}} \right\} \quad (2.4)$$

Išvada. SAW metodologija iširta.

3. Sijinio tilto sijų daugiakriteris vertinimas

3.1. Ekspertų nuomonių suderinamumo tyrimas

Visi šiuo metu žinomi ir taikomi daugiakriterinio vertinimo veiksnio svorio nustatymo būdai pagrįsti eksperto nuomone. Vienais atvejais šie svoriai nurodomi tiesiogiai vieneto dalimis, kitais atvejais, vėlgi remiantis ekspertais, nustatomi atliekant sudėtingus skaičiavimus. Bet kuriuo atveju tai yra subjektyvus procesas, todėl tyrimo rezultatai priklauso nuo daugybės sąlygų, tokių kaip ekspertų kvalifikacija, vertinimo skalės diapazonas ir kt.

Kai atliekant daugiakriterinius vertinimus modeliuojami ir perspektyviniai (gaunami optimizavimo metu) pokyčiai, tai visiems pirminiams rodikliams ir gautiems daliniams kriterijams suteikiamas vienodas veiksmingumas. Tokiu atveju nereikalinga šių rodiklių ar dalinių kriterijų įtakos potencialo dydžiui reikšmingumų ekspertinio vertinimo procedūra. Bendruoju atveju ekspertų įtakos reikšmingumai skirtingi, tad jie turi būti vertinami ekspertiniu būdu pagal atitinkamą metodiką. Svarbu, kad ekspertų grupė būtų formuojama išimtinai pagal kompetenciją. Siekiant numatyto ekspertų vertinimų suderinamumo skaičiuojamas Kendall konkordancijos koeficientą. Kendall konkordancijos koeficientas. Skaičiuojant šį konkordancijos koeficientą ekspertų vertinimai ranguojami. Tarkime, turime r ekspertų, kurie įvertino m alternatyvų (rodiklių). Pirmiausia kiekviename stulpelyje esančios reikšmės keičiamos rangais. [34]

Tyrimo metu ekspertams buvo pateikta apklausos anketa, kurioje jie turėjo atsakyti į bendrą informaciją apie save. Ekspertų buvo paklausta, koks yra jų amžius, iš kokio miesto jie yra, koks jų akademinis laipsnis, statybos sritis, užimamos pareigos, darbo patirtis metais, kvalifikacijos atestatų skaičiu ir atstovaujanti įstaiga. Apklausa buvo išsiųsta kelių ir tiltų statybos įmonės AB „Panevėžio keliai“ darbuotojams. Atsakė į bendruosius klausimus darbuotojai turėjo pagal reikšmingumą sunumeruoti vertinimo kriterijus nuo 1 iki 6, kurių efektyvumas parodytas 4 lentelėje.

4 lentelė. Vertinimo kriterijų balų reikšmė

Reikšmingumo paaiškinimas	Balas
Labai nereikšmingas	1
Nereikšmingas	2
Labiau nereikšmingas nei reikšmingas	3
Labiau reikšmingas nei nereikšmingas	4
Reikšmingas	5
Labai reikšmingas	6

Ekspertams buvo pateikti 6 sijų vertinimo kriterijai, tai:

1. Sijos medžiagų kaina;
2. Įrengimo kaina;
3. Konstrukcijos masė;
4. Įrengimo darbų laikas;
5. Sijos laikomoji galia;
6. Garantinis laikotarpis.

Ekspertam buvo palikta vietos interpretuoti su pasiūlymais ir komentarais, tačiau norinčių interpretuoti neatsirado. Ekspertų nuomonių rezultatai pavaizduoti 5 lentelėje.

Vidutinis rangas nustatomas pagal formulę:

$$\bar{t}_j = \left(\sum_{k=1}^r t_{jk} \right) / r; \quad (3.1)$$

čia: t_{jk} – k eksperto j -ojo rodiklio įvertinimas (kur “6” – aukščiausias, “1” – žemiausias įvertinimo balas); r – ekspertų skaičius

5 lentelė. Ekspertų nuomonių rezultatai

Ekspertas	Pareigos	Efektyvumo rodiklis (įvertinimo balais)					
		Sijos medžiagų kaina q_1	Įrengimo kaina q_2	Konstrukcijos masė q_3	Įrengimo darbų laikas q_4	Sijos laikomosios galios išnaudojimas q_5	Garantinis laikotarpis q_6
Ekspertas 1	SV	4	3	1	2	6	5
Ekspertas 2	DV	3	2	1	5	4	6
Ekspertas 3	PV	4	3	1	2	6	5
Ekspertas 4	SV	5	3	1	4	2	6
Ekspertas 5	SV	6	5	4	3	2	1
Ekspertas 6	DV	3	4	2	5	6	1
Ekspertas 7	PV	3	4	1	5	2	6
Ekspertas 8	PV	3	4	2	6	1	5
Ekspertas 9	DV	4	5	1	6	3	2
Ekspertas 10	SV	5	6	1	4	2	3
Ekspertas 11	SV	5	6	2	4	1	3
Ekspertas 12	DV	4	5	1	6	2	3
Ekspertas 13	PV	2	6	1	4	5	3
Ekspertas 14	DV	5	6	2	4	3	1
Ekspertas 15	PV	2	6	1	4	5	3
Rangų suma		58	68	22	64	50	53
Vidutinis rangas		3,87	4,53	1,47	4,27	3,33	3,53
Prioritetas		3	1	6	2	5	4
Rodiklio subjektyvus reikšmingumas (Santykinis svoris)		0,184	0,216	0,070	0,203	0,159	0,168

Pareigų sutrumpinimai: DV – darbų vadovas, SV – statybos vadovas, PV – projekto vadovas

Ekspertų patikimumas išreiškiamas anksčiau minėtu Kendall konkordacijos koeficientu, nusakančiu skirtingų nuomonių artimumo laipsnį.

Atskiro efektyvumo rodiklio netolygumo kvadratų bendros sumos nustatymas:

$$S = \sum_{j=1}^n \left[\sum_{k=1}^r t_{jk} - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^r t_{jk} \right]^2; \quad (3.2)$$

Čia n – efektyvumo rodiklių skaičius

$$S = \left(58 - \frac{1}{6} * 315\right)^2 + \left(68 - \frac{1}{6} * 315\right)^2 + \left(22 - \frac{1}{6} * 315\right)^2 + \left(64 - \frac{1}{6} * 315\right)^2 + \left(50 - \frac{1}{6} * 315\right)^2 + \left(53 - \frac{1}{6} * 315\right)^2 = 30,25 + 240,25 + 930,25 + 132,25 + 6,25 + 0,25 = 1339,50.$$

Konkordacijos koeficiento nustatymas:

$$\bar{W} = \frac{12S}{r^2 * (n^3 - n)}; \quad (3.3)$$

Gauname:

$$\bar{W} = \frac{12 * 1339,50}{15^2 * (6^3 - 6)} = 0,3402$$

Koeficientas yra atsitiktinis dydis. Kendall konkordacijos koeficientui nustatyti reikia žinoti ekspertų skaičių r ir lyginamų objektų n skirtingų reikšmių pasiskirstymo dažnį. Kendall konkordacijos koeficiento reikšmės nustatymas:

$$x^2 = \frac{12S}{r * n * (n + 1)}; \quad (3.4)$$

Gauname:

$$x^2 = \frac{12S}{15 * 6 * (6 + 1)} = 25,514$$

Jeigu gauta x^2 reikšmė didesnė negu norminė x_{lent}^2 reikšmė, priklausanti nuo laisvumo laipsnio ($\nu = n - 1 = 6 - 1 = 5$) ir reikšmingumo lygio (0,01), laikoma, kad ekspertų nuomonės suderintos.

$$x^2 > x_{lent}^2; \quad (3.5)$$

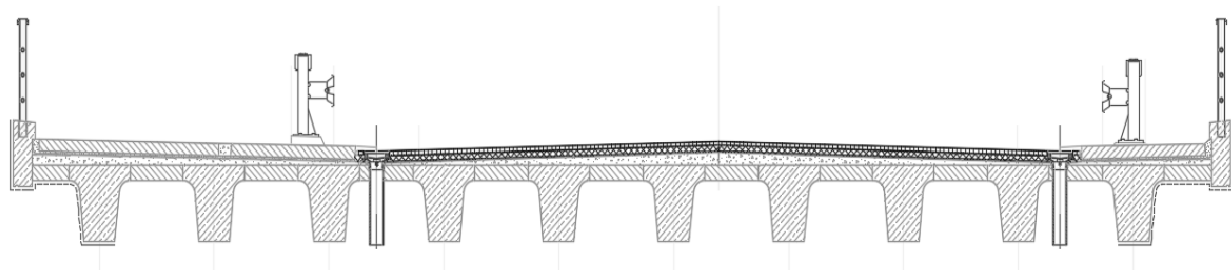
Norminė x_{lent}^2 reikšmė paimama iš 2 priedo lentelės lygi 15,09.

$$25,514 > 15,09$$

Išvada. Nuomonės suderintos

3.2. Sijinio tilto sijų efektyvumo tyrimas

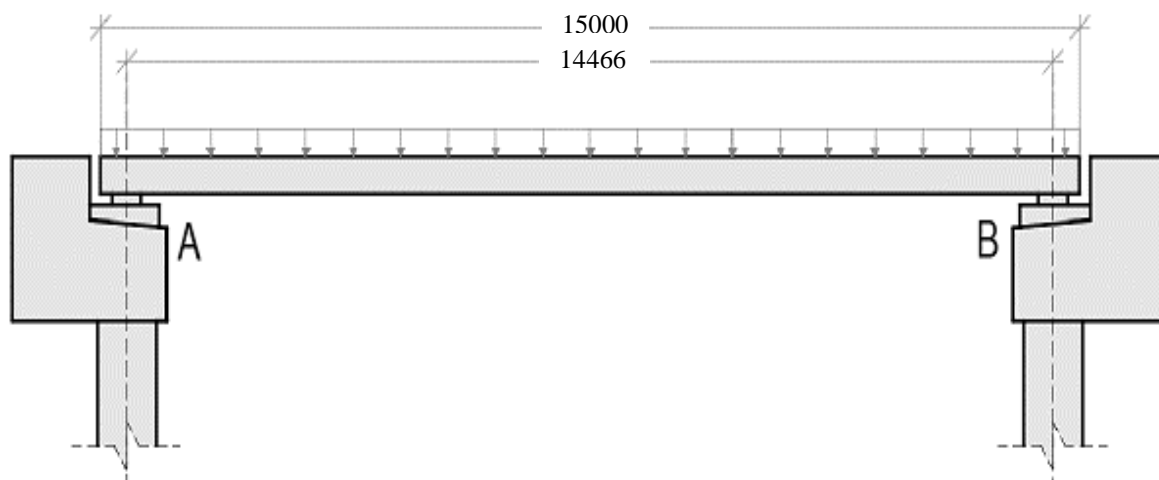
Atlikus ekspertų nuomonių suderinamumo tyrimą ir pereinant prie skaičiuojamosios dalies, reikia susikurti skaičiuojamąją schemą, pagal kurią vertinsime kokias apkrovas priimti ir kokius sijų profilius pasirinkti. Norint atlikti kuo tikslesnį vertinimą, visiems nagrinėjamiems elementams sukuriama tokia pati sąlyga. Pasirinkta nagrinėjama tilto pjūvio schema pavaizduota 36 ir 37 paveikslėlyje.



36 pav. Skaičiuojamojo tilto schema [autoriaus nuotrauka]

Atliekant skaičiavimus daroma prielaida, kad:

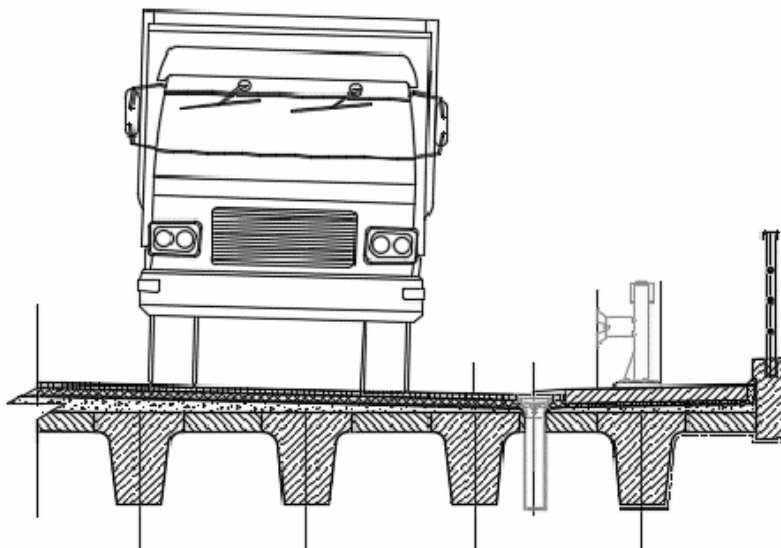
- Tiltas yra krašto kelio reikšmės;
- Tiltų sijų ilgis 15 metrų;
- Vienos važiuojamosios dalies plotis 4 metrai;
- Tiltų perdangai naudojama 10 vienodų sijų, kurių žingsnis yra 1,345 m.;
- Konstrukcija skaičiuojama kaip dviratė sija;
- Sija A atramoje įtvirtinta tiek horizontaliai, tiek vertikaliai kryptimis varžančiais guoliais, o B atramoje poslinkiai suvaržyti tik vertikaliai kryptimi; sijų skaičiavimo schema pateikta 37 paveikslėlyje;
- konstrukcija yra veikiamas atmosferos kritulių (lietaus);
- Skaičiuojamojoje schemoje vilkiko plotis priimamas 2,3 metro.



37 pav. Sijinio tilto sijų skaičiuojamoji schema [autoriaus nuotrauka]

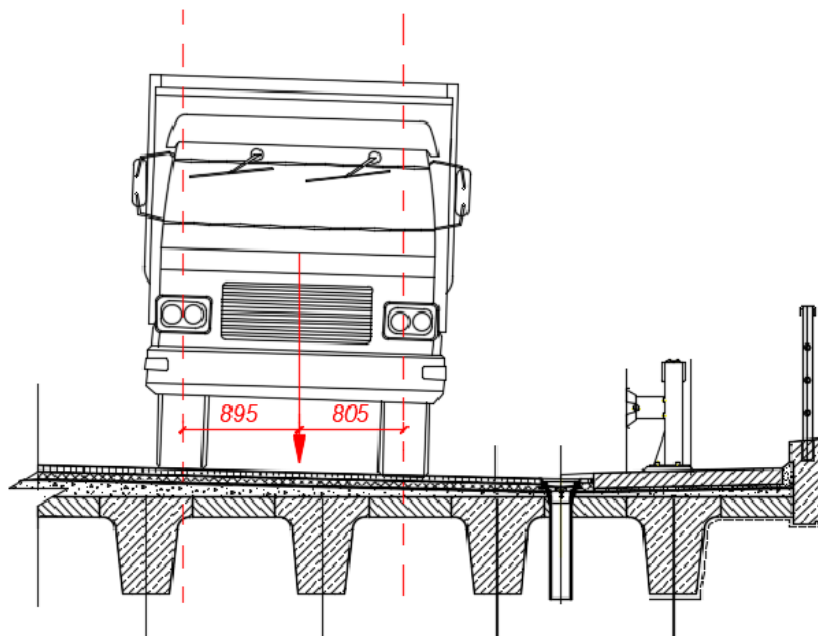
Norint įvertinti racionalius profilius, kuriuos galime lyginti darbe, pirmiausia reikia apsiskaičiuoti sijų veikiančias apkrovas. Pasinaudoję [35] šaltiniu žinome, kad sunkiausia galima transporto

priemonė eksploatuojama keliuose yra triašis vilkikas su dviaše arba triaše puspriekabe, kurio maksimali leistina masė su kroviniu, pilnu baku kuro, įrankių komplektais ir visais galimais keleiviais yra 40t. Sukuriant tokias skaičiuojamasias prielaidas, privalu apsiskaičiuoti, kurias sijas sunkiasvoris vilkikas važiuodamas per tiltą paveiks labiausiai. Schema pavaizduota 38 paveikslėlyje.



38 pav. Skersinės kaičiujamosios schemos vizualizacija [autoriaus nuotrauka]

Vadovaujantis 38 paveikslėlio vizualizacija, sukuriama skaičiuojamoji schema, kurioje kiekviena pavaizduota sija priimama kaip atrama. Sudarant skaičiuojamąją schema įvertinamas kelio posvyris 2,5%, kuris paskirsto bendrą vilkiko svorį į 2 jo puses, kur posvyrio pusė bus labiau apkrauta negu priešinga kaip pavaizduota 39 paveikslėlyje.



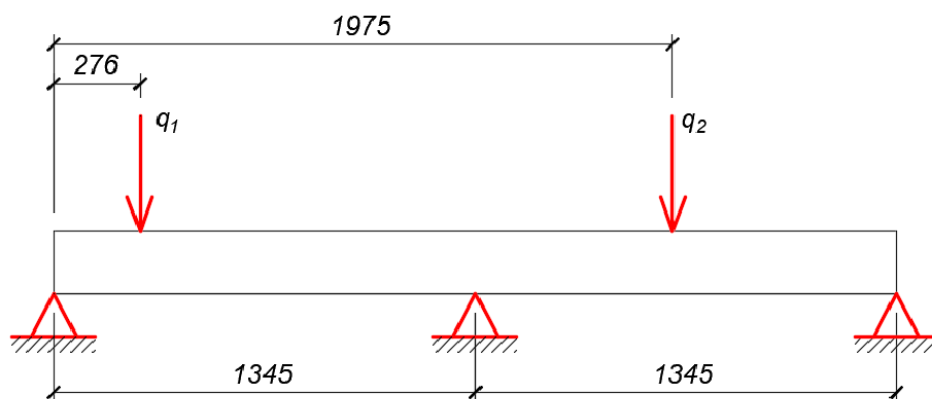
39 pav. Vilkiko svorių pasiskirstymas važiuojant tiltu [autoriaus nuotrauka]

Pagal svorių pasiskirstymo shemą matome, kad vilkiko masės centras pasislinkęs į nuolydžio puse per 90 mm, kas reiškia, kad:

$$G_{s,nuol} = \frac{895}{805} = 1,112; \quad (3.6)$$

Apskaičiavime matome, kad dėl kelio nuolydžio susidariusioje situacijoje dešinoji vilkiko pusė bus apkrauta 11,2% labiau, negu važiuojant lygiu keliu.

Pagal 40 paveikslėlyje pavaizduotą situaciją susikuriame statikos uždavinį ir apskaičiuojame kurias sijas vilkikas apkrauna labiausiai. Susikuriame statinio uždavinio schemą, kuri pavaizduota 40 paveikslėlyje.



40 pav. Statinio uždavinio schema [autoriaus nuotrauka]

Apskaičiuojame G kai žinome, kad:

$$G = m_v * g; \quad (3.7)$$

čia: m_v – vilkiko masė, uždavinyje priimta 40 tonų,

g – laisvo kritimo pagreitis 9,81, priimamas 10.

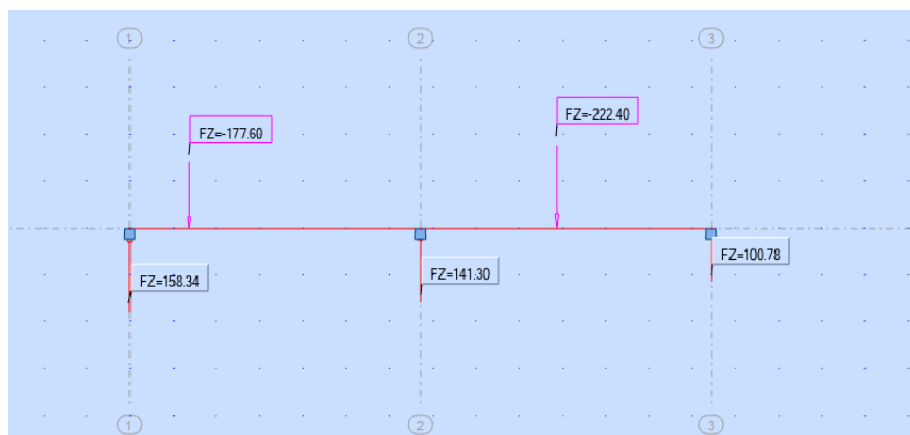
$$G = m_v * g = 40 * 10 = 400 \text{ kN}$$

Apskaičiuojame q_1 ir q_2 kai žinome, kad:

$$q_1 = G * 0,5 * (2 - 1,112) = 400 \text{ kN} * 0,5 * (2 - 1,112) = 177,6 \text{ kN}$$

$$q_2 = G * 0,5 * 1,112 = 400 \text{ kN} * 0,5 * 1,112 = 222,4 \text{ kN}$$

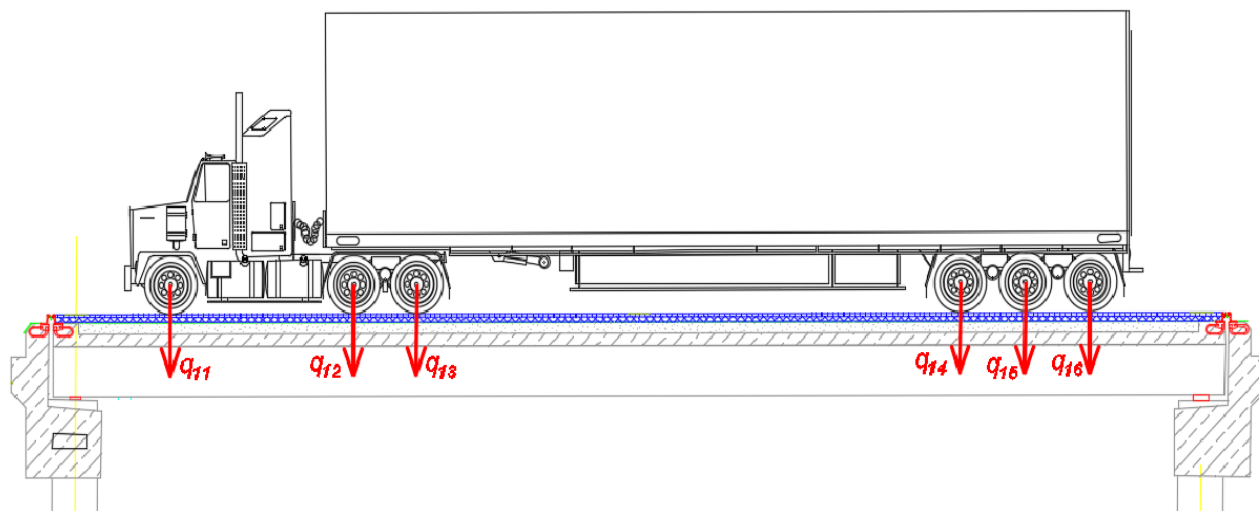
Skaičiavimai atlikti su „Robot Structural Analysis Professional 2019“ ir pavaizduoti 41 paveikslėlyje.



41 pav. Skaičiavimų rezultatai [autoriaus nuotrauka]

Iš gautų rezultatų matome, kad pirmoji sija laiko 158,34 kN (39,54%), antroji sija laiko 141,30 kN (35,29%), trečioji sija laiko 100,78 kN (25,17%).

Kadangi didžiausia skaičiuotinė apkrova tenka pirmajai sijai, reiškia skaičiavimai bus atliekami būtent jai. Didžiausia apkrova sijai teks kai visas vilkikas bus užvažiuavęs ant tilto perdangos kaip pavaizduota 42 paveikslėlyje.



42 pav. Vilkiko jėgų pasiskirstymas išilgai sijos [autoriaus nuotrauka]

Pagal 42 paveikslėlio vilkiko jėgų pasiskirstymo chemą sukuriame statinio uždavinio skaičiuojamąją schemą naudodami „Robot Structural Analysis Professional 2019“. Skaičiuojamoji schema pavaizduota 43 paveikslėlyje.



43 pav. Išilginio skerspjūvio skaičiuojamoji schema [autoriaus nuotrauka]

Labiausiai apkrautos sijos jėgas daliname į lygias dalis, tai reiškia, kad priimame prielaidą, jog kiekvienas vilkiko ratas apkrovą į siją paskirstys vienodai.

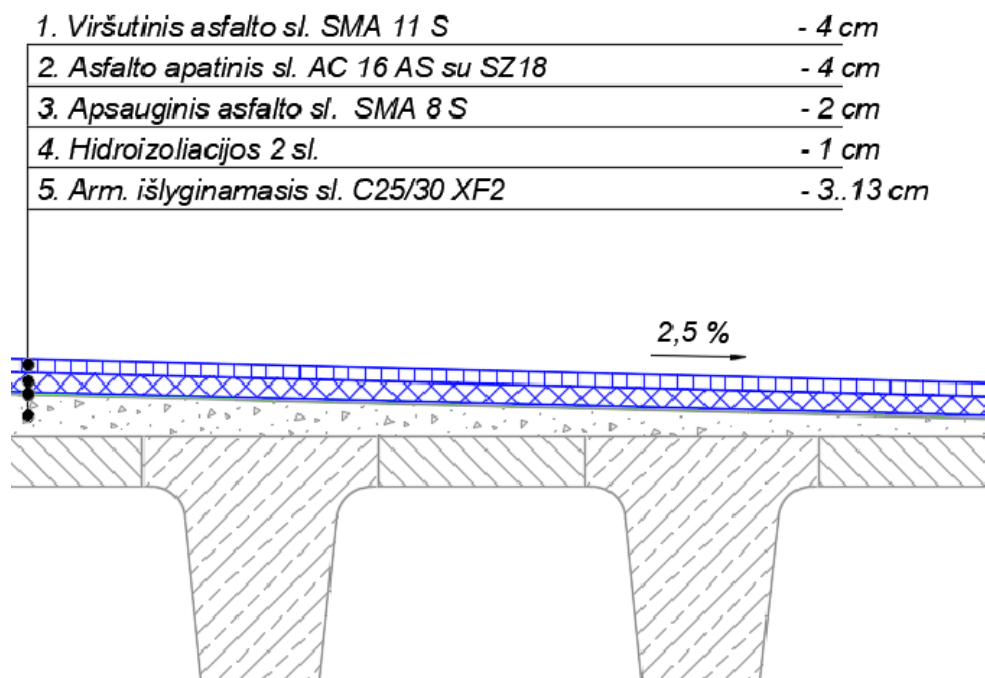
$$q_{1-1,2,3,4,5,6} = \frac{Fz_1}{6}; \quad (3.7)$$

čia: Fz_1 – 30 paveikslėlyje apskaičiuota apkrova į pirmąją siją

$$q_{1-1,2,3,4,5,6} = \frac{Fz_1}{6} = \frac{158,34}{6} = 26,39 \text{ kN}$$

Kiekviena q jėga sija spaus 26,39 kN jėga.

Sudarinėjant išilginio pjūvio apkrovų schemą pirmajai sijai, papildomai įvertiname ir sijos savąjį svorį bei tilto pakloto (betono išlyginamojo sluoksnio, epoksidinio grunto, hidroizoliacijos bei asfaltbetonio dangos) svorį. Skaičiuotinio denginio konstrukcija pavaizduota 44 paveikslėlyje.



44 pav. Denginio konstrukcija [autoriaus nuotrauka]

Iš 44 paveikslėlio duomenų matome, kad tilto paklotui įrengti naudojamas SMA, AC ir SZ tipų asfaltai.

Asfaltbetonis (AC, angl. – Asphalt Concrete, vok. – Asphaltbeton) – asfalto mišinys, kuris turi tolydžią mineralinių medžiagų mišinio granulimetrinę sudėtį. Pagal LST EN 13108-1 apibrėžtas asfaltbetonis skirstomas į šias mišinių rūšis:

- Asfalto pagrindo sluoksnio mišinys;
- Asfalto apatinio sluoksnio mišinys;
- Asfalto viršutinio sluoksnio mišinys;
- Asfalto pagrindo-dangos sluoksnio mišinys[35].

Skaldos ir mastikos asfaltas (SMA, angl. *Stone Mastic Asphalt*, vok. *Splittmastixasphalt*) – asfalto mišinys, kuris turi netolydžią mineralinių medžiagų mišinio granulimetrinę sudėtį ir rišiklį stabilizuojančių priedų [35]. Šiuo atveju, konstrukcijoje naudojame 2 tipų SMA asfaltbetonį:

- Viršutinei, važiuojamajai dangai pasirenkame SMA 11 S - skaldos ir mastikos asfaltas, skirtas sluoksniams, veikiamiems sunkiaja apkrova, kurio mineralinių medžiagų viršutinio sieto akutės dydis yra 11 mm., ir apsauginiam sluoksniui SMA 8 S - skaldos ir mastikos asfaltas, skirtas sluoksniams, veikiamiems sunkiaja apkrova, kurio mineralinių medžiagų viršutinio sieto akutės dydis yra 8 mm[35].
- Apatiniam asfalto sluoksniui naudojame AC 16 AS ir SZ18 tipo asfaltus.
 - AC 16 – asfaltbetonis, skirtas asfalto viršutiniams sluoksniams, veikiamiems normaliaja apkrova, kurio mineralinių medžiagų viršutinio sieto akutės dydis yra 16 mm.

- A - žymi kad tai yra asfalto apatinio sluoksnio mišinys;
 - S - sunkioji (ypatingoji) apkrova.
- b) SZ 18 žymi, kad naudojamos skaldytos smulkiosios mineralinės medžiagos, kurių akutės dydis yra ne didesnis nei 18mm[35].

Skaičiuotinės medžiagų apkrovos pavaizduotos 6 lentelėje.

6 lentelė. Tilto skaičiuotinės apkrovos

Charakteristinės apkrovos	Charakteristinių apkrovų vertės, kN/m ²	Poveikio patikimumo koeficientas		Skaičiuotinės poveikio reikšmės, kN/m ²		Apkrova sijai, kai žingsnis 1,345m., kN/m
		Tinkamumo ribiniams būviams	Saugos ribiniams būviams	Tinkamumo ribiniams būviams	Saugos ribiniams būviams	
Nuolatinės						
Viršutinio asfalto sl. SMA 11 S 0,04*2385kg=95,4kg/m ²	0,959	$\gamma_{G1} = 1$	$\gamma_{G1} = 1,3$	0,959	1,247	1,677511
Asfalto apatinis sl. AC 16 AS su SZ18 0,04*2450kg=98kg/m ²	0,980	$\gamma_{G2} = 1$	$\gamma_{G2} = 1,3$	0,980	1,274	1,71353
Aspsauginis asfalto sl. SMA 8S 0,02*2343kg=46,9kg/m ²	0,469	$\gamma_{G3} = 1$	$\gamma_{G3} = 1,3$	0,469	0,610	0,820047
Hidroizoliacijos 2 sl. 2*4kg= 8kg/m ²	0,080	$\gamma_{G4} = 1$	$\gamma_{G4} = 1,3$	0,080	0,104	0,13988
Armuotas išlyginamasis sl. C25/30 XF2 0,08*2500kg=200kg	2,000	$\gamma_{G5} = 1$	$\gamma_{G5} = 1,3$	2,000	2,600	3,497
Kintamosios						
Dinaminės/naudojimo apkrovos	5,00			5,00	5,00	6,725
Iš viso:				9,488	10,835	14,573

Taigi, pagal apskaičiuotas vilkiko ir pakloto apkrovas susikuriame galutinę skaičiuojamąją schema ir parenkame racionalius profilius. Skaičiavimai atliekami naudojantis „Robot Structural Analysis Professional 2019“

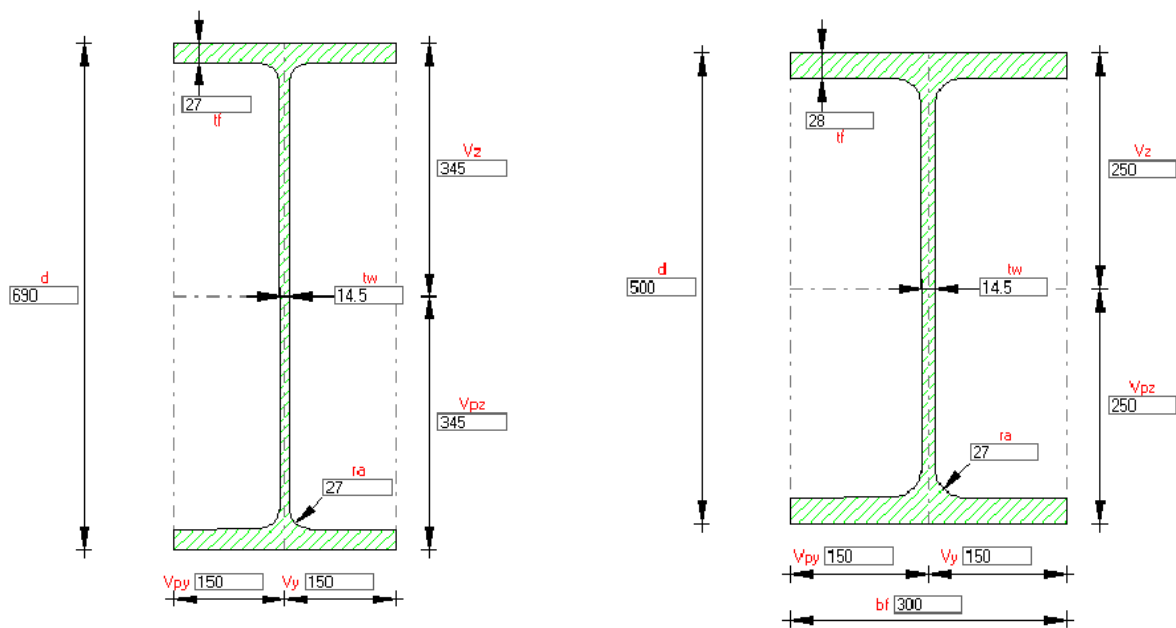
Atlikus skaičiavimus su nusistatytomis apkrovomis, gavome, kad sija, kad atlaikytų apkrovas privalo laikyti 497,69 kN * m apkrovą, todėl pasirenkame raconalius profilius, kurie turėtų didesnę nei 20 procentų laikymo rezervą.

Atliekant daugiakriterį vertinimą vertinsime 4 sijų profilius. Pirmi 2 - HEA700 ir HEB500, profilių charakteristikos 7 lentelėje.

7 lentelė. HEA700 ir HEB500 charakteristikos

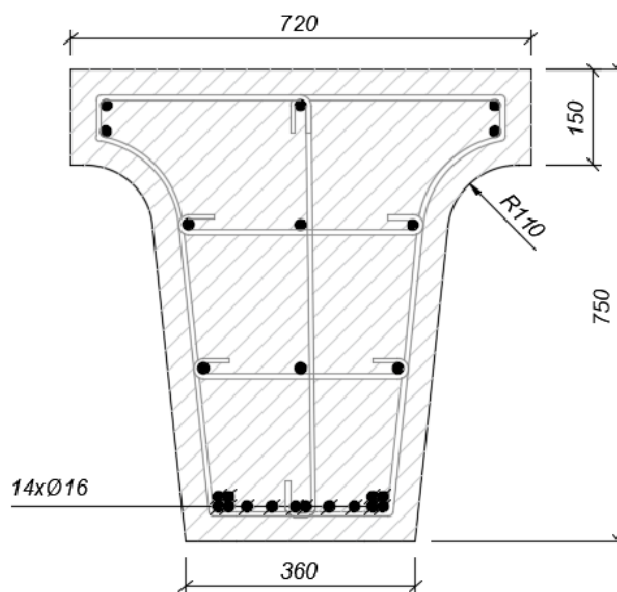
Profilis	HEA700	HEB500
Plieno markė	S355	S355
Sekcijos aukštis, mm	690	500
Sekcijos plotis, mm	300	300
Laikančiųjų flančų skerspjūvio storis, mm	27	28
Masė, kg/m	204	187
Kaina, €/m	320,3	267,4

Profiliai pavaizduoti 45 paveikslyje.



45 pav. Plieninis profilis HEA700 (kairėje) ir plieninis profilis HEB500 (dešinėje)

3 - čias – Gelžbetoninė T formos sija, kurios tempamojo zona armuota 14 vienetų $\phi 16$ plienine B400a armatūra.



46 pav. G/b sijos išarmavimo schema [autoriaus nuotrauka]

Sija išarmuota ir tempiamųjų zonų skerspjūviai parinkti apskaičiuavus pagal STR 2.05.05:2005 „Betoninių ir gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas“, ir minimalus sijos tempamosios zonos armatūros skerspjūvio plotas, kad atitektų keliamus reikalvims, privalo būti $22,24 \text{ cm}^2$. Pasirinktuojų atvėju sija yra išarmuota 14x $\phi 16$ B400a plieninėmis armatūromis, kurių bendras skerspjūvio plotas yra $28,14 \text{ cm}^2$. Pagalbinės armatūros pasirinktos 10 mm skerspjūvio. Reiškia, kad sijos laikomosios galios išnaudojimas yra paskaičiuojamas pagal formulę:

$$K_{Steel} = \frac{A_{S_{1,S}}}{A_{S_{2,S}}} = \frac{22,24}{28,14} = 0,79; \quad (3.8)$$

čia: $A_{S_{1,S}}$ – minimalus sijos armavimo skerspjūvio plotas armuojant plieniu;

$AS_{S2,S}$ – sijos armatūros skerspjūvio plotas pasirinktuoju atvėju.

Gavome rezultata, kuris atitinka ankščiau išsiskeltą sąlygą, kad sijai privalo būti palikta bent 20% apsauga.

Pagal lygiai tokio pačio T sijos skerspjūvio schemą apskaičiuojame ir sijos, kuri buvo išarmuota FRP armatūra, laikomosios galios išnaudojimas, tik šiuo atveju, kadangi FRP armatūra turi dvigubai didesnį charakteristinį stiprį pagal takumo ribą (priimame 800 MPa (N/mm^2), kai plieno armatūra tik 400 MPa (N/mm^2)), tempiamosios zonos armatūros reikės ženkliai mažiau. Šiuo atveju dvigubai – 11,12 cm^2 . Reiškia, kad sijos laikomosios galios išnaudojimas yra paskaičiuojamas pagal tokią pačią formulę:

$$K_{O_{FRP}} = \frac{AS_{S1,FRP}}{AS_{S2,FRP}} = \frac{11,12}{28,14} = 0,395; \quad (3.9)$$

čia: $AS_{S1,FRP}$ – minimalus sijos armavimo skerspjūvio plotas armuojant stiklo pluošto armatūra;

$AS_{S2,FRP}$ – sijos armatūros skerspjūvio plotas pasirinktuoju atveju.

Sijos metro masės apskaičiuojami pagal 36 paveikslėlio pjūvio schemą iš kurios matome, kad sijai išarmuoti naudojama 25 m. $\varnothing 16$ armatūros strypų ir 17,25 m. $\varnothing 10$ armatūros strypų. Taigi sijos masės apskaičiuojami pagal formules:

$$M_{S,steel} = a_b * \rho_b + (a_{16} * l_{16} + a_{10} * l_{10}) * \rho_{steel}; \quad (3.10)$$

čia: a_b – sijos skerspjūvio plotas be armatūrų, priimamas 0,323 m^2 ;

ρ_b – C30/37 betono charakteristinė masė, priimama 2400 kg/m^3 ;

a_{16} - $\varnothing 16$ armatūros strypų skerspjūvio plotas, priimamas 2,01 $cm^2 = 0,000201 m^2$;

l_{16} - $\varnothing 16$ armatūros strypų kiekis viename metre sijos, iš 36 pav. priimamas 25 m.

a_{10} - $\varnothing 10$ armatūros strypų skerspjūvio plotas, priimamas 0,785 $cm^2 = 0,0000785 m^2$;

l_{10} - $\varnothing 10$ armatūros strypų kiekis viename metre sijos, iš 36 pav priimamas 17,25 m.;

ρ_{steel} – B400a plieno tankis, priimamas 7900 kg .

$$M_{S,steel} = 0,323 * 2400 + (0,000201 * 25 + 0,0000785 * 17,25) * 7900 = 825,60 kg.$$

Norint apskaičiuoti sijos, armuotos FRP armatūra masę, iš prieš tai naudotos formulės pakeičiame vieną narį – armatūros tankį.

$$M_{S,FRP} = a_b * \rho_b + (a_{16} * l_{16} + a_{10} * l_{10}) * \rho_{FRP}; \quad (3.11)$$

čia: Čia: ρ_{FRP} – B400a plieno tankis, priimamas 1900 kg .

$$M_{S,FRP} = 0,323 * 2400 + (0,000201 * 25 + 0,0000785 * 17,25) * 1900 = 787,32 kg.$$

Taigi iš gautų duomenų matome, kad:

$$M_{skirtumas} = M_{S,steel} - M_{S,FRP} = 825,60 kg - 787,32 kg = 38,28 kg.; \quad (3.12)$$

Sijų metro medžagų kaina apskaičiuojama pagal tuos pačius 36 paveikslėlio duomenis. Sijos, armuotos plienu kaina:

$$K_{S,steel} = a_b * k_b + (l_{16} * k_{16,steel} + l_{10} * k_{10,steel}); \quad (3.13)$$

čia: k_b – betono vieno kubo kaina, priimama 110 eur.[39];

$k_{16,steel}$ - $\varnothing 16$ armatūros vieno metro kaina, 2,29 eur[40].;

$k_{10,steel}$ - $\varnothing 10$ armatūros vieno metro kaina, 1,04 eur[40].;

$$K_{S,steel} = 0,323 * 110 + (25 * 2,29 + 17,25 * 1,04) = 110,75 \text{ eur.}$$

Sijos, armuotos FRP kaina skaičiuojama:

$$K_{S,FRP} = a_b * k_b + (l_{16} * k_{16,FRP} + l_{10} * k_{10,FRP}); \quad (3.13)$$

Čia: $k_{16,FRP}$ - $\varnothing 16$ armatūros vieno metro kaina, 2,01 eur[41].

$k_{10,FRP}$ - $\varnothing 10$ armatūros vieno metro kaina, 0,66 eur[41].

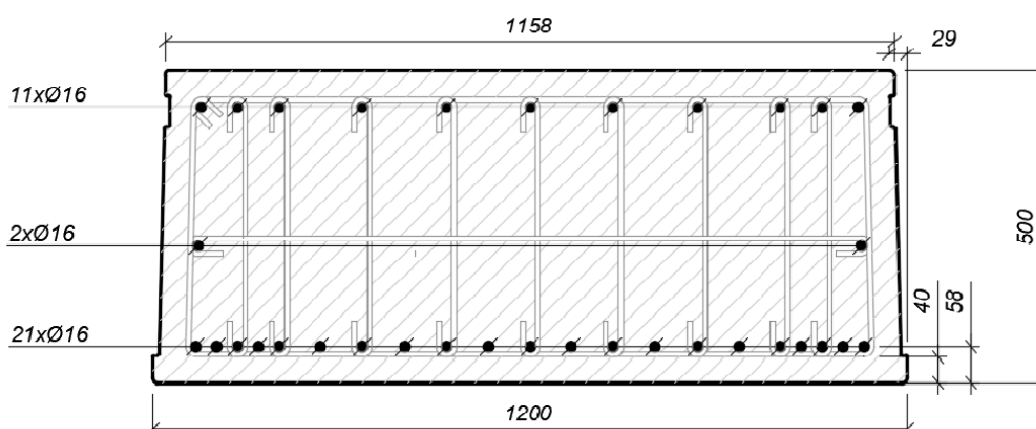
$$K_{S,FRP} = 0,323 * 110 + (25 * 2,01 + 17,25 * 0,66) = 97,17 \text{ eur.}$$

Galutinės sijų charakteristinės savybės pateiktos 8 lentelėje.

8 lentelė. T formos sijų charakteristikos

Profilis	T_{steel}	T_{FRP}
Plieno markė	Plienas B400a	Stiklo-bazalto pluošto
Sekcijos aukštis, mm	750	750
Sekcijos plotis, mm	360	360
Laikančiųjų armatūrų skerspjūvio storis, mm	16	16
Masė, kg/m	825,60	787,32
Medžiagų kaina, €/m	110,75	97,17

Kad tyrimas būtų platesnis, tilto perdangos tyrimą atliekame ir dar dviems profiliams, tik šiuo atveju ne sijoms, o perdangos plokštėms. Perdangos plokštės armavimo schema pavaizduota 47 paveikslėlyje.



47 pav. Perdangos plokštės armavimo schema [autorius nuotrauka]

Plokštė išarmuota ir tempiamųjų zonų skerspjūviai parinkti apskaičiuavus pagal STR 2.05.05:2005 „Betoninių ir gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas“, ir minimalus sijos tempiamosios zonos armatūros skerspjūvio plotas, kad atitiktų keliamus reikalvumus, privalo būti $34,06 \text{ cm}^2$. Pasirinktuojų atvėju, kaip ir prieš tai skaičiuotos sijos, perdangos plokštė yra išarmuota $21 \times \varnothing 16$ B400a plieninėmis armatūromis, kurių bendras skerspjūvio plotas yra $42,21 \text{ cm}^2$. Pagalbinės armatūros pasirinktos 10 mm skerspjūvio. Reiškia, kad sijos laikomosios galios išnaudojimas yra paskaičiuojamas pagal formulę:

$$Kp_{steel} = \frac{Ap_{s1,s}}{Ap_{s2,s}} = \frac{33,56}{42,21} = 0,795; \quad (3.15)$$

čia: $Ap_{s1,s}$ – minimalus perdangos plokštės armavimo skerspjūvio plotas armuojant plienu;

$Ap_{s2,s}$ – perdangos plokštės armatūros skerspjūvio plotas pasirinktuojų atvėju.

Rezultatas tenkina sąlygą, kad laikomosios galios išnaudojimo likutis būtų bent 20 procentų.

Pagal lygiai tokio pačio perdangos plokštės skerspjūvio schemą apskaičiuojame ir plokštės, kuri buvo išarmuota FRP armatūra, laikomosios galios išnaudojimą. Kadangi anksčiau minėtos FRP armatūrų tempiamosios charakteristiko yra dvigubai geresnės, apskaičiuavus pagal STR 2.05.05:2005 „Betoninių ir gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas“ algoritmą, tempamoji zona privalo būti išarmuota bent $16,78 \text{ cm}^2$ ploto armatūra. Reiškia, kad sijos laikomosios galios išnaudojimas yra paskaičiuojamas pagal formulę:

$$Kp_{FRP} = \frac{Ap_{s1,FRP}}{Ap_{s2,FRP}} = \frac{16,78}{42,21} = 0,397; \quad (3.16)$$

čia: $Ap_{s1,FRP}$ – minimalus perdangos plokštės armavimo skerspjūvio plotas armuojant plienu;

$Ap_{s2,FRP}$ – perdangos plokštės armatūros skerspjūvio plotas pasirinktuojų atvėju.

Rezultatas taip pat tenkina sąlygą, kad laikomosios galios išnaudojimo likutis būtų bent 20 procentų.

Perdangos plokštės metro masės apskaičiuojamos pagal 37 paveikslėlio pjūvio schemą iš kurios matome, kad sijai išarmuoti naudojama 34 m. $\varnothing 16$ plieno armatūros strypų ir 39,94 m. $\varnothing 10$ armatūros strypų. Taigi sijos masės apskaičiuojami pagal formules:

$$M_{P,steel} = a_b * \rho_b + (a_{16} * l_{16} + a_{10} * l_{10}) * \rho_{steel}; \quad (3.17)$$

čia: a_b – perdangos plokštės skerspjūvio plotas be armatūrų, priimamas $0,574 \text{ m}^2$;

ρ_b – C30/37 betono charakteristinė masė, priimama 2400 kg/m^3 ;

a_{16} - $\varnothing 16$ armatūros strypų skerspjūvio plotas, priimamas $2,01 \text{ cm}^2 = 0,000201 \text{ m}^2$;

l_{16} - $\varnothing 16$ armatūros strypų kiekis viename metre perdangos plokštės, iš 36 pav. priimamas 34 m.

a_{10} - $\varnothing 10$ armatūros strypų skerspjūvio plotas, priimamas $0,785 \text{ cm}^2 = 0,0000785 \text{ m}^2$;

l_{10} - $\varnothing 10$ armatūros strypų kiekis viename metre perdangos plokštės, iš 36 pav. priimamas 39,94 m.;

ρ_{steel} – B400a plieno tankis, priimamas 7900 kg .

$$M_{P,steel} = 0,574 * 2400 + (0,000201 * 34 + 0,0000785 * 39,94) * 7900 = 1456,36 \text{ kg.}$$

Norint apskaičiuoti perdangos plokštės, armuotos FRP armatūra masę, iš prieš tai naudotos formulės pakeičiame vieną narį – armatūros tankį.

$$M_{P,FRP} = a_b * \rho_b + (a_{16} * l_{16} + a_{10} * l_{10}) * \rho_{FRP}; \quad (3.18)$$

čia: ρ_{FRP} – stiklo pluošto armatūros tankis, priimamas 1900 kg.

$$M_{P,FRP} = 0,574 * 2400 + (0,000201 * 34 + 0,0000785 * 39,94) * 1900 = 1396,54 \text{ kg.}$$

Taigi iš gautų duomenų matome, kad:

$$M_{skirtumas} = M_{P,steel} - M_{P,FRP} = 1456,36 \text{ kg} - 1396,54 \text{ kg} = 59,82 \text{ kg.}; \quad (3.19)$$

Perdangos plokštės metro medžagų kaina apskaičiuojama pagal tuos pačius 36 paveikslėlio duomenis. Plokštės, armuotos plienu kaina:

$$M_{P,steel} = a_b * k_b + (l_{16} * k_{16,steel} + l_{10} * k_{10,steel}); \quad (3.20)$$

čia: k_b – betono vieno kubo kaina, priimama 110 eur.[39];

$k_{16,steel}$ - $\varnothing 16$ armatūros vieno metro kaina, 2,29 eur[40].;

$k_{10,steel}$ - $\varnothing 10$ armatūros vieno metro kaina, 1,04 eur[40].;

$$M_{S,steel} = 0,574 * 110 + (34 * 2,29 + 39,94 * 1,04) = 182,54 \text{ eur.}$$

Perdangos plokštės, armuotos FRP, kaina skaičiuojama:

$$M_{P,FRP} = a_b * k_b + (l_{16} * k_{16,FRP} + l_{10} * k_{10,FRP}); \quad (3.21)$$

čia: $k_{16,FRP}$ - $\varnothing 16$ armatūros vieno metro kaina, 2,01 eur[41].

$k_{10,FRP}$ - $\varnothing 10$ armatūros vieno metro kaina, 0,66 eur[41].

$$M_{P,FRP} = 0,574 * 110 + (34 * 2,01 + 39,94 * 0,66) = 157,84 \text{ eur.}$$

Galutinės perdangos plokščių charakteristinės savybės pateiktos 9 lentelėje.

9 lentelė. Perdangos plokščių charakteristikos

Profilis	PP_{steel}	PP_{FRP}
Plieno markė	Plienas B400a	Stiklo-bazalto pluošto
Sekcijos aukštis, mm	500	500
Sekcijos plotis, mm	1200	1200
Laikančiųjų armatūrų skerspjūvio storis, mm	16	16
Masė, kg/m	1456,36	1396,54
Medžiagų kaina, €/m	182,54	157,84

Taigi, atliekant tyrimą bus tyriami 6 tipų elementai, 2 iš jų – plieniniai, tai – HEA700 ir HEB500 dvitėjiniai profiliai iš S355 plieno markės. Kiti 2 – T formos sijos, iš kurių viena yra armuota B400a

plieno armatūra, kita – stiklo-bazalto pluošto armatūra. Ir paskutiniai – betoninės perdangos plokštės, iš kurių viena yra armuota B400a plieno armatūra, kita – stiklo-bazalto pluošto armatūra. Atsižvelgiant į tai, kad lyginamos skirtingų tipų medžiagos, šiuo atveju plieninės ir gelžbetoninės, tyrimo eigoje bus lyginami ir vertinami privalumai/trūkumai ir dviem, į vieną kategoriją priskiriamų perdangos elementų, pavyzdžiui HEB500 ir HEA700 arba Perdangos plokštė armuota FRP ir T formos sija armuota plienine armatūra. Atliekant tyrimą bus vertinamos ankščiau apskaičiuotos ir priimtos salygos:

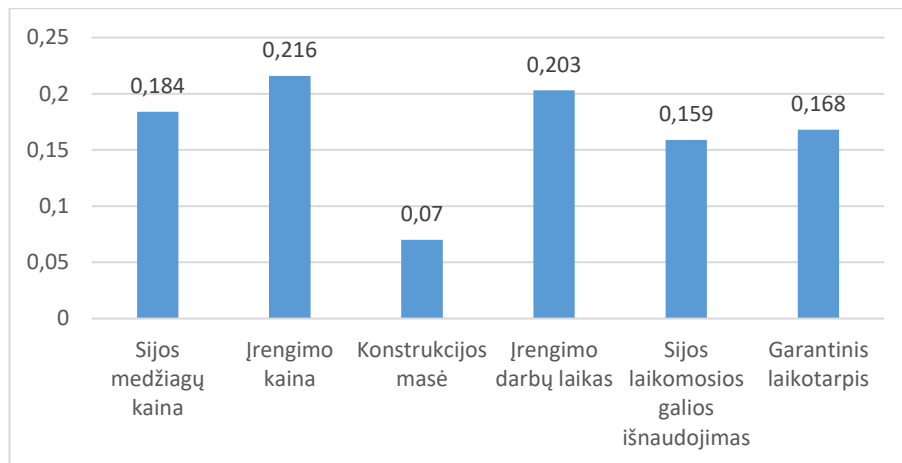
1. Vertinimo kriterijai ir jų reikšmingumai nustatyti 5 lentelėje;
2. Konstrukcija yra veikiama atmosferos poveikio;
3. Tyrimui bus naudojami ankščiau darbe apskaičiuotos medžiagų charakteristikos ir kainos;
4. Tyrime naudojami tik pagal pasirinktą skaičiuojamąją schemą standartus atitinkantys profiliai.

Sudarome pradinę sprendinių priemimo matricą ir nusistatome maksimizuojamus ir minimizuojamus rodiklius.

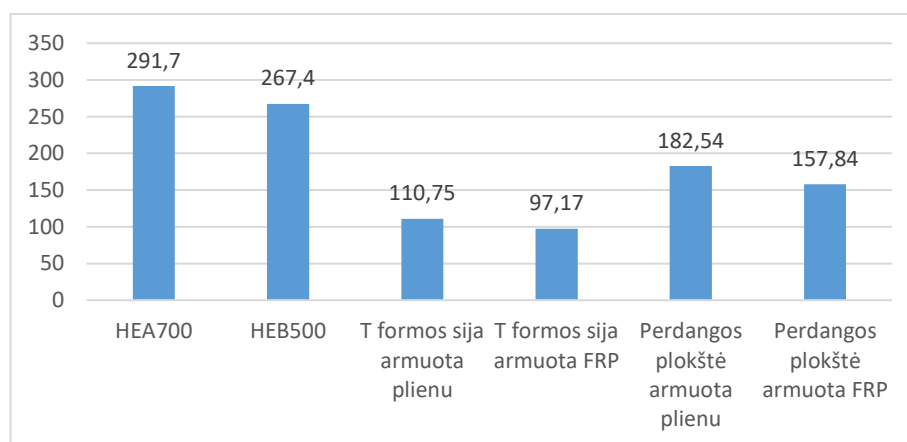
10 lentelė. Pradinė sprendinių priemimo matrica

Sijų tipai	Vertinimo rodikliai					
	Sijos medžiagų kaina, eur/m q_1	Įrengimo kaina, eur q_2	Konstruktijos masė, kg/m q_3	Įrengimo darbų laikas, h q_4	Sijos laikomosios galios išnaudojimas q_5	Garantinis laikotarpis, m q_6
HEA700	291,70	280	204	6,4	0,800	5
HEB500	267,4	280	187	6,4	0,730	5
T formos sija armuota plieniu	110,75	470	825,60	20	0,790	10
T formos sija armuota FRP	97,17	470	787,32	20	0,395	10
Perdangos plokštė armuota plieniu	182,54	520	1456,36	26	0,795	10
Perdangos plokštė armuota FRP	157,84	520	1396,54	26	0,397	10
Min ar max rodiklis	Min.	Min.	Min.	Min.	Min.	Max.
Rodiklio geriausia reikšmė	97,17	280	187	6,4	0,395	10

Sijų vertinimo reikšmingumo rodiklių grafikas pagal 5 lentelės duomenis pavaizduotas 48 paveikslėlyje.



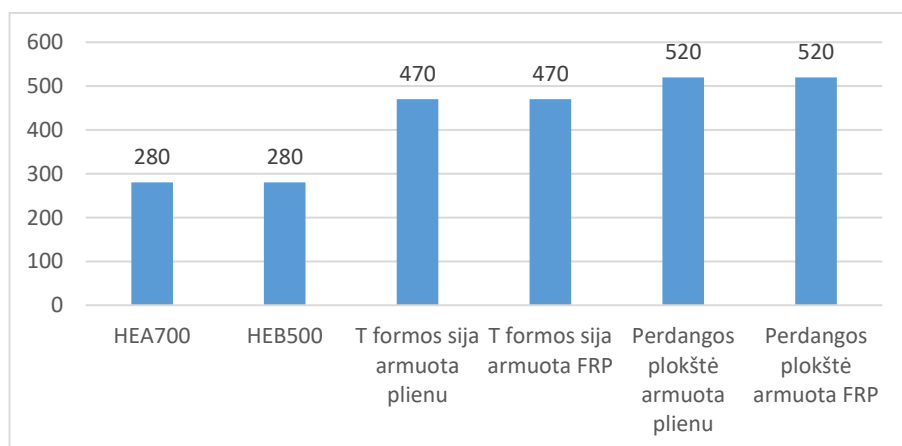
48 pav. Rodiklio subjektyvus reikšmingumas (Santykinis svoris) [autoriaus nuotrauka]
Siju palyginimas pagal medžiagų kainą pavaizduotas 49 paveikslėlyje.



49 pav. Sijų medžiagų kainos palyginimas, Eur/m [autoriaus nuotrauka]

Lyginant pagal kainą, kadangi visi nariai yra minimizuojami, čia pranašumą turi betoniniai gaminiai, iš kurių pigiausi yra T formos profilio sijos.

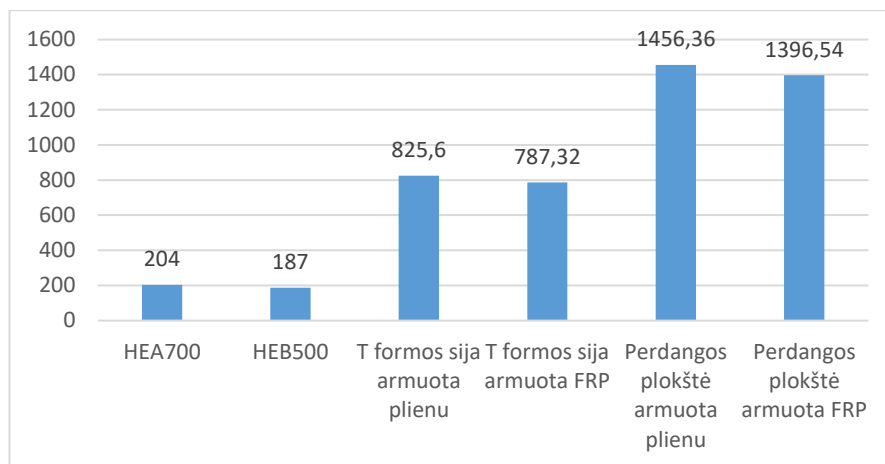
Siju palyginimas pagal įrengimo kainą pavaizduotas 50 paveikslėlyje



50 pav. Sijų įrengimo kainos palyginimas, Eur/m [autoriaus nuotrauka]

Lyginant pagal įrengimo kainą, kadangi visi nariai yra minimizuojami, čia pranašumą turi plieniniai gaminiai. Gelžbetoniniai gaminiai atitinkamai brangesni dėl savo masės.

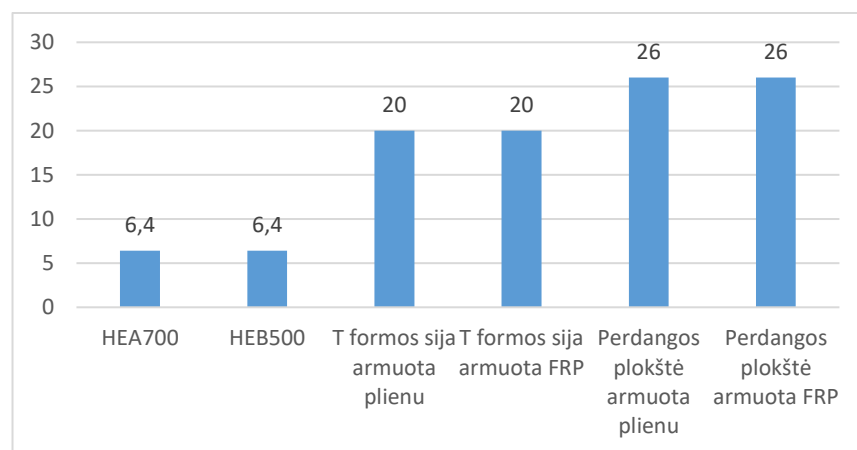
Sijų palyginimas nuosavą masę pavaizduotas 51 paveikslėlyje.



51 pav. Sijų nuosavosios masės palyginimas, kg/m [autorius nuotrauka]

Lyginant pagal konstrukcijos nuosavą masę, kadangi visi nariai yra minimizuojami, čia pranašumą vel turi plieniniai gaminiai. Gelžbetoniniai gaminiai sunkesni dėl savo skerspjūvio ploto.

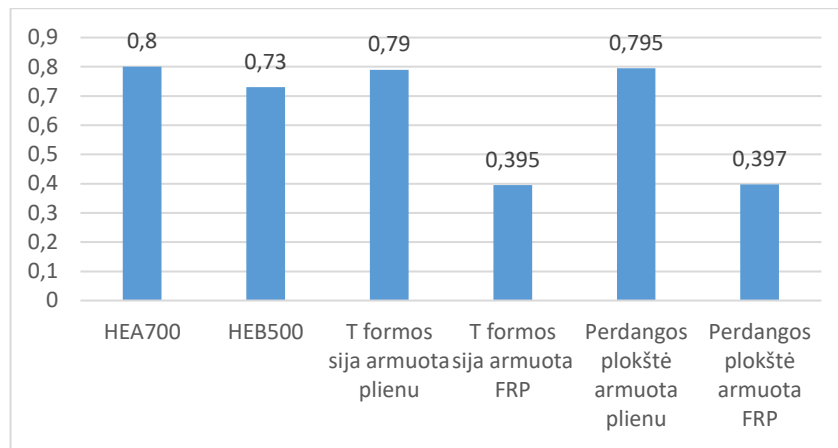
Sijų palyginimas įrengimo darbų laiką pavaizduotas 52 paveikslėlyje.



52 pav. Sijų įrengimo darbų laiko palyginimas, h [autorius nuotrauka]

Lyginant pagal įrengimo darbų laiką, kadangi visi nariai yra minimizuojami, čia pranašumą vel turi plieniniai gaminiai. Gelžbetoninių įrengimas užtrunka ilgiau dėl betonavimo darbų laiko ir didesnės konstrukcijos masės.

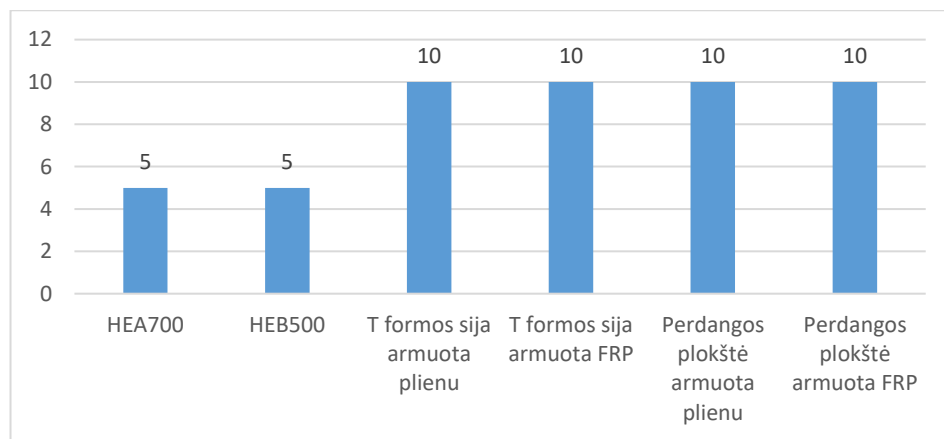
Sijų palyginimas laikomosios galios išnaudojimą pavaizduotas 53 paveikslėlyje.



53 pav. Sijų laikomosios galios išnaudojimo palyginimas [autorius nuotrauka]

Lyginant pagal laikomosios galios išnaudojimą, kadangi visi nariai vėl yra minimizuojami, čia pranašumą turi betoniniai gaminiai, armuoti FRP armatūra. Taip atsitinka dėl dvigubai didesnio FRP armatūros tempiamojo stiprio.

Sijų palyginimas garantinį laikotarpį pavaizduotas 54 paveikslėlyje.



54 pav. Sijų garantinio laikotarpio palyginimas, m [autorius nuotrauka]

Galimų sprendinių matricos maksimizuojamieji nariai (vertinimo rodikliai) normalizuojami atitinkamai pagal:

$$\bar{x}_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_j^{max}}; \quad (2.2)$$

čia: x_{ij} - sprendimų priėmimo matricos nariai;
 x_j^{max} - maksimali rodiklio reikšmė;

Galimų sprendinių matricos minimizuojamieji nariai (vertinimo rodikliai) normalizuojami atitinkamai pagal:

$$\bar{x}_{ij} = \frac{x_j^{min}}{x_{ij}}; \quad (2.3)$$

čia: x_j^{min} - minimali rodiklio reikšmė;

Normalizuotos matricos rezultatai pateikti 11 lentelėje.

11 lentelė. Normalizuota matrica

Sijų tipai	Vertinimo rodikliai					
	Sijos medžiagų kaina, eur/m q_1	Įrengimo kaina, eur q_2	Konstruktijos masė, kg/m q_3	Įrengimo darbų laikas, h q_4	Sijos laikomosios galios išnaudojimas q_5	Garantinis laikotarpis, m q_6
HEA700	0,333	1,000	0,917	1,000	0,494	0,500
HEB500	0,363	1,000	1,000	1,000	0,541	0,500
T formos sija armuota plienu	0,877	0,596	0,227	0,320	0,500	1,000
T formos sija armuota FRP	1,000	0,596	0,238	0,320	1,000	1,000
Perdangos plokštė armuota plienu	0,532	0,538	0,128	0,246	0,497	1,000
Perdangos plokštė armuota FRP	0,616	0,538	0,134	0,246	0,995	1,000
Min ar max rodiklis	Min.	Min.	Min.	Min.	Min.	Max.
Rodiklių reikšmingumai	0,184	0,216	0,070	0,203	0,159	0,168

Nustatant varianto racionalumą, atitinkami normalizuotosios matricos nariai dauginami iš efektyvumo rodiklių reikšmingumo reikšmių ir gautos sandaugos susumuojamos. Racionalaus varianto sandaugų suma bus maksimali:

$$A = \left\{ \frac{\frac{A_i}{\max_i \sum_{j=1}^n q_j x_{ij}}}{\sum_{j=1}^n q_j} \right\}; \quad (2.4)$$

Čia: A_i – skaičiuojamoji alternatyva;

x_{ij} - normalizuotos matricos nariai;

q_j - integruotasis reikšmingumas;

j – rodiklis;

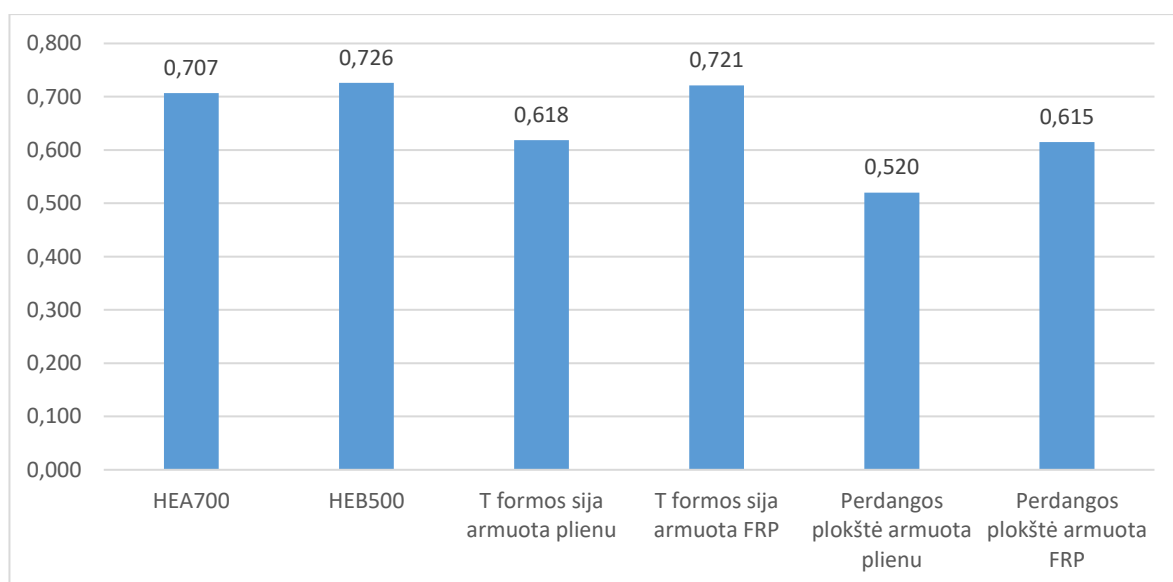
n – rodiklių skaičius.

Taigi naudojantis formule ir 11 lentelėje apskaičiuotais duomenimis sudarome galutinę reikšmių matricą, kuri pavaizduota 12 lentelėje.

12 lentelė. Galutinė reikšmių ir prioritetų matrica

Sijų tipai	Vertinimo rodikliai						Rodiklių verčių suma	Prioritetų eilutė
	Sijos medžiagų kaina, eur/m q_1	Įrengimo kaina, eur q_2	Konstruktijos masė, kg/m q_3	Įrengimo darbų laikas, h q_4	Sijos laikomosios galios išnaudojimas q_5	Garantinis laikotarpis, m q_6		
HEA700	0,333	1,000	0,917	1,000	0,494	0,500	0,707	3
HEB500	0,363	1,000	1,000	1,000	0,541	0,500	0,726	1
T formos sija armuota plieniu	0,877	0,596	0,227	0,320	0,500	1,000	0,618	4
T formos sija armuota FRP	1,000	0,596	0,238	0,320	1,000	1,000	0,721	2
Perdangos plokštė armuota plieniu	0,532	0,538	0,128	0,246	0,497	1,000	0,520	6
Perdangos plokštė armuota FRP	0,616	0,538	0,134	0,246	0,995	1,000	0,615	5
Min ar max rodiklis	Min.	Min.	Min.	Min.	Min.	Max.		
Rodiklių reikšmingumai	0,184	0,216	0,070	0,203	0,159	0,168		

Taigi, atlikus daugiakriterį vertinimą SAW metodu gavome, kad didžiausią rodiklių verčių sumą surenka HEB500 dvitėjinė plieninė sija. Labai nedaug nuo jos atsiliko T formos sija armuota FRP armatūra. Trečia pagal naudingumą – HEA700 sija. Rezultatų analizė pavaizduota 55 paveikslėlyje.



55 pav. SAW tyrimo rezultatai [autorius nuotrauka]

Atlikus daugiakriterį vertinimą SAW metodu gauta, kad racionaliausias sijos parinkimo sprendimas yra plieninis profilis HEB500, kurio rodiklis siekia 0,726 (žr. 11 lentelę ir 44 pav.). Didžiausią įtaką plieninio profilio HEB500 pasirinkimui sudarė didžiausią rodiklių reikšmingumą turintys sijos

medžiagų kainą, įrengimo kaina ir įrengimo darbų laikas. Antras racionaliausias pasirinkimas – T formos sija armuota FRP, kurios rodiklis siekia 0,721. Didžiausią svorį šiai sijai sudarė mažas jos laikomosios galios išnaudojimas ir dvigubai ilgesnis garantinis laikotarpis, lyginiant su plieniniai profiliais. Trečia – plieninis profilis HEA700, kuris, kuri trečia pagal dydį vertinimo rodiklį 0,707. Sijos privalumai – tokie patys kaip HEB500 profilio, tačiau mažesnę verčių rezultata sudarė didesnė medžiagų kainą, masė ir laikomosios galios išnaudojimas. Ketvirtas efektyviausias pasirinkimas – T formos sija armuota plieniu, ji surinko 0,618 verčių sumos. Sijos rodikliai neturėjo didelių išskirtinumų, todėl ir vertinimo rezultatas vidutinis – 4 vieta. Prasčiausiai iš visų lyginamųjų profilių atrodė perdengimo plokštės. Nors ir FRP armuotos perdangos plokštės rodikliai geresni nei armuotos plieniu, tačiau to neužteko. Atitinkamai plokštės pasiskirstė 5-ąją ir 6-ąją vietas.

Išvados

1. Atlikus mokslinių šaltinių analizę buvo ištirta, kad pasaulyje vyrauja keletas pagrindinių tiltų statymo technologijų, tai – sijinio, arkinio, vantinio, kabamojo, santvarinio bei medinio tilto technologijos. Pagrindinis visų technologijų tiltų skirtumas – perdangos (denio) laikomoji schema.
2. Atlikus mokslinių šaltinių analizę išaiškinta sijinio tilto konstrukcinė schema, kuri visais atvejais yra daugiau ar mažiau vienoda. Tiltų statyba prasideda gręžtiniais CFA poliais, toliau viš polių kyla rostverkas, liemui, rygeliai, inkaruojasi guoliai, montuojamos perdangos sijos arba plokštės, betonuojasi išlyginamieji sluoksniai, klijuojasi hidroizoliacija ir klojasi asfaltbetonio danga. Tiltų prieigų formavimas prasideda nuo gulekšnių, toliau ant jų gulasi pereinamos plokštės. Tolimesnis prieigų įrengimas nesiskiria nuo perdangos įrengimo – išlyginamųjų sluoksnių betonavimas, izoliacijos klijavimas, asfaltbetonio klojimas.
3. Atlikus statybos ekspertų suderinamumo apklausą išsiaiškinta, kad kelių ir tiltų inžinieriai vienu svarbiausiu sėkmingo projekto įgyvendinimo kriterijumi laiko įrengimo kainą, kuri surinko 68 rango sumo taškus ir gavo didžiausią – 0,216 santykinį svorio balą. Antru svarbiausiu projekto kriterijumi ekspertų įvertintas įrengimo darbų laikas su 64 rango sumo taškais ir 0,203 santykinio svorio balo. Trečias – sijos medžiagų kaina su 58 rangų sumos taškais ir 0,184 santykinio svorio balo. Kiti 2 mažiau reikšmingi vertinimo kriterijai, tokie kaip garantinis laikotarpis ir sijos laikomosios galios išnaudojimas, atitinkamai pasiskirtė 4-5 vietas su 50 ir 53 rangų sumos taškais bei 0,168-0,159 santykinio svorio balais. Nereikšmingiausiu pagal ekspertų nuomonių suderinamumo tyrimą liko konstrukcijos masė, ji surinko tik 22 rangų sumos taškus ir atitinkamai mažiausią santykinį svorio balą – 0,070.
4. Atlikus daugiakriterį vertinimą SAW metodu pagal ekspertų apklausos kriterijų reikšmingumus gavome, kad racionaliausias sijos parinkimo sprendimas yra plieninis profilis HEB500, kurio rodiklis siekia 0,726 (žr. 11 lentelę ir 44 pav.). Didžiausią įtaką plieninio profilio HEB500 pasirinkimui sudarė didžiausią rodiklių reikšmingumą turintys sijos medžiagų kaina, įrengimo kaina ir įrengimo darbų laikas. Antras racionaliausias pasirinkimas – T formos sija armuota FRP, kurios rodiklis siekia 0,721. Didžiausią svorį šiai sijai sudarė mažas jos laikomosios galios išnaudojimas ir dvigubai ilgesnis garantinis laikotarpis, lyginiant su plieniniais profiliais. Trečia – plieninis profilis HEA700, kuris, kuri trečia pagal dydį vertinimo rodiklį 0,707. Sijos privalumai – tokie patys kaip HEB500 profilio, tačiau mažesni verčių rezultatai sudarė didesnę medžiagų kainą, masę ir laikomosios galios išnaudojimą. Ketvirtas efektyviausias pasirinkimas – T formos sija armuota plieniu, ji surinko 0,618 verčių sumos. Sijos rodikliai neturėjo didelių išskirtinumų, todėl ir vertinimo rezultatas vidutinis – 4 vieta. Prasčiausiai iš visų lyginamųjų profilių atrodė perdangos plokštės. Nors ir FRP armuotos perdangos plokštės rodikliai geresni nei armuotos plieniu, tačiau to neužteko. Atitinkamai plokštės pasiskirstė 5-ąją ir 6-ąją vietas. Racionaliausias sprendimas nuo neracionaliausio skiriasi 39,61 %.

Literatūros šaltiniai

1. NOTKUS, Jonas. *Tiltų projektavimo pagrindai*. Vilnius: Technika, 2010. ISBN 978-9955-286-70-7
2. ALANI, Amir M., TOSTI, Fabio, CIAMPOLI, Luca Bianchini, BENEDETTO, Ciampoli, GAGLIARDI, Valerio. An integrated investigative approach in health monitoring of masonry arch bridges using GPR and InSAR technologies. *NTD&E International* [interaktyvus]. 2020. [žiūrėta 2021-09-15]. DOI: [10.1016/j.ndteint.2020.102288](https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2020.102288)
3. ALI, Khawaja, KATSUCHI, Hiroshi, YAMADA, Hitoshi. Comparative study on structural redundancy of cable-stayed and extradosed bridges through safety assessment of their stay cable. *Engineering* [interaktyvus]. 2021. 111-123, [žiūrėta 2021-09-15]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eng.2020.07.021>
4. BAKHTIARI-NEJAD, Firooz, SAFFARI, Ramin. Modified finite elements method to investigate vibrations of the main cables in suspended bridges. *Engineering structures* [interaktyvus]. 2020, [žiūrėta 2021-09-15]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110701>
5. KIM, Donggun, KWAK, Younghak, SOHN, Hoon. Accelerated cable-stayed bridge construction using terrestrial laser scanning. *Automation in construction* [interaktyvus]. 2020, [žiūrėta 2021-09-15]. DOI: [10.1016/j.autcon.2020.103269](https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103269)
6. TIAN, Zhijuan, LIU, Yongjian, JIANG, Lei, ZHU, Weiqing, MA, Yiping. A review on application of composite truss bridges composed of hollow structural section members. *Journal of traffic and transportation engineering* [interaktyvus]. 2019, 94-108, [žiūrėta 2021-09-17]. DOI: [10.1016/j.jtte.2018.12.001](https://doi.org/10.1016/j.jtte.2018.12.001)
7. ZHANG, Dongdong, LV, Yaru, ZHAO, Qilin, LI, Feng. Development of lightweight emergency bridge using GFRP–metal composite plate-truss girder. *Engineering structures* [interaktyvus]. 2018, vol. 196. [žiūrėta 2021-09-15]. DOI: [10.1016/j.engstruct.2019.109291](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109291)
8. MAHAMID, Mustafa, GAYLORD, Jr Edwin H., GAYLORD Charles N., *Structural engineering handbook, Fifth edition*, McGraw-Hill Education, 2020, ISBN 978-1-260-11598-7
9. FU, Meizhen, LIU, Yongjian, LI, Na, ZHANG, Zhiwei, SIVIERO, Enzo. Application of modern timber structure in short and medium span bridges in China. *Journal of traffic and transportation engineering* [interaktyvus]. 2014, 72-80, [žiūrėta 2021-09-17]. DOI: [10.1016/S2095-7564\(15\)30091-X](https://doi.org/10.1016/S2095-7564(15)30091-X)
10. RASHIDIA, Maria, HOSHYARB, Azadeh Noori, SMITHC, Liam, SAMALIA, Bijan, SIDDIQU, Rafat. A comprehensive taxonomy for structure and material deficiencies, preventions and remedies of timber bridges. *Journal of building engineering* [interaktyvus]. 2020, [žiūrėta 2021-09-17]. DOI: [10.1016/j.jobbe.2020.101624](https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101624)
11. JIM J. Zhao and DEMETRIOs E. Tonias., *Bridge Engineering: Design, Rehabilitation, and Maintenance of Modern Highway Bridges, Fourth Edition*, McGraw-Hill Education, 2017, ISBN 978-1-25-964310-1
12. SAJED, Mohsen, TEHRANI, Payam. Effects of column and superstructure irregularity on the seismic response of four-span RC bridges. *Structures* [interaktyvus]. 2020, 1400-1412, [žiūrėta 2021-09-17]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.09.057>
13. GONG, Mingyang, SUN, Yiren, CHEN, Jingyun. Mechanical response analysis of asphalt pavement on curved concrete bridge deck using a mesostructure-based multi-scale method. *Construction and building materials* [interaktyvus]. 2021, [žiūrėta 2021-09-17]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122858>

14. HE, Zhi-Qi, MA, Zeng, ZHANG, Shixiang, LIU, Zhao, MA, Zhongguo. Temperature gradients and stress distributions in concrete box-girder bridges during hot-mix asphalt paving. *Structures* [interaktyvus]. 2021, 1954-1966, [žiūrėta 2021-09-17]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.05.078>
15. SENGSRİ, Pasakorn, KAEWUNRUEN, Sakdirat. Additive manufacturing meta-functional composites for engineered bridge bearings: A review. *Construction and building materials* [interaktyvus]. 2020, [žiūrėta 2021-09-17]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120535>
16. WANG, Bo, GUAN, Shaoyu, ZHANG, Yi, BAI, Yongtao. Experimental behavior and failure modes of hybrid beam-to-column connections with RC wing-walls in industrial construction. *Construction and building materials* [interaktyvus]. 2019, 628-643, [žiūrėta 2021-09-17]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.154>
17. MITOULIS, S.A., TITIRLA, M.D., TEGOS, I.A. Design of bridges utilizing a novel earthquake resistant abutment with high capacity wing walls. *Engineering Structures* [interaktyvus]. 2014, 35-44, [žiūrėta 2021-09-17]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.01.049>
18. DOLATI, Seyed Saman Khedmatgozar, MEHRABI, Armin. Review of available systems and materials for splicing prestressed-precast concrete piles. *Structures* [interaktyvus]. 2021, 850-865, [žiūrėta 2021-09-17]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.01.029>
19. AKIYAMA, Mitsuyoshi, ABE, Satochi, AOKI, Nao, SUZUKI, Motoyuki. Flexural test of precast high-strength reinforced concrete pile prestressed with unbonded bars arranged at the center of the cross-section. *Engineering Structures* [interaktyvus]. 2012, vol. 34, 259-270, [žiūrėta 2021-09-18]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.09.007>
20. FARHANGDOUST, Saman, MEHRABI, Armin, NOLAN, Steven. Design of prestressed precast pile splice using glass fiber reinforced polymer (GFRP) dowels. *Engineering Structures* [interaktyvus]. 2021, vol. 244, [žiūrėta 2021-09-18]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112806>
21. ZHANG, Pu, LV, Xinlei, ZOU, Xingxing, LI, Yaozong, WANG, Jingquan, SHEIKH, Shamim Ahmed. Novel fiber reinforced polymers (FRP)-ultrahigh performance concrete (UHPC) hybrid beams with improved shear performance. *Construction and building materials* [interaktyvus]. 2021, vol. 286, [žiūrėta 2021-09-18]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122720>
22. MAHAMID, Mustafa, *Structural Engineering Handbook, Fifth Edition*, McGraw-Hill Education, 2020, ISBN 9781260115987
23. SUN, Zeyang, FENG, De-Cheng, SUN, Yunlou, Yuan, Jie, LI, Xinghua, WEI, Yang. Bond-slip behavior of bundled steel/FRP bars and its implementation in high-fidelity FE modeling of reinforced concrete beams. *Construction and building materials* [interaktyvus]. 2021, vol. 286, [žiūrėta 2021-09-18]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122887>
24. SUN, Zeyang, FU, Linchen, FENG, De-cheng, VATULOKA, Apete, WEI, Yang, WU, Gang. Experimental study on the flexural behavior of concrete beams reinforced with bundled hybrid steel/FRP bars. *Engineering Structures* [interaktyvus]. 2019, vol. 197, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109443>
25. PANAHI, Minoos, ZAREEI, Seyed, IZADI, Ardavan. Flexural strengthening of reinforced concrete beams through externally bonded FRP sheets and near surface mounted FRP bars. *Case Studies in Construction Materials* [interaktyvus]. 2021, [žiūrėta 2021-09-18]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00601>
26. KUMAR, Venkatesh, NASER, M.Z., *Structural Fire Engineering*, McGraw-Hill Education, 2020, ISBN 9781260128581
27. ALEMI-ARDAKANI M., MILANI A., YANNAKOPOULOS S., SHOKOUHI G. A multicriteria experimental analysis of impact on fiber reinforced polymer composite laminates. *Materials today communication* [interaktyvus]. 2015, 4, 6-15. [žiūrėta 2021-09-18]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2015.02.001>
28. MB, „Greenmaterials LT“. *Stiklo pluošto kompozicinė armatūra* [interaktyvus]. 2021, [žiūrėta 2021-09-25]. Prieiga per: <https://www.greenmaterials.lt/sba-kainos.html>

29. UAB „Serfas“. *Armatūra ir jos gaminiai* [interaktyvus]. 2021, [žiūrėta 2021-09-26]. Prieiga per: <https://serfas.lt/katalogas/armatura-ir-jos-gaminiai/armatura/armatura-plieno-markes-bst500-k500c-t-b500nca500hw.html>.
30. HAN, Shiwen, ZHOU, Ao, OU, Jinping. Relationships between interfacial behavior and flexural performance of hybrid steel-FRP composite bars reinforced seawater sea-sand concrete beams. *Composite structures* [interaktyvus]. 2021, [žiūrėta 2021-10-18]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114672>
31. CHEN, Yianqiang, QIAN, Chunxiang, HAO, Zhixin, ZHOU, Hengyi. Effect of bio-mineralization on concrete performance: Carbonation, microhardness, gas permeability and Cl-migration. *Biochemical Engineering Journal* [interaktyvus]. 2021, [žiūrėta 2021-10-18]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bej.2021.108024>
32. SIMAVIČIENĖ R. Kiekybinių daugiatislių sprendimo priėmimo metodų jautrumo analizė. *Informatikos inžinerija*. – Vilnius: „Technika“, 2011, p. 21. Prieiga per: <http://dspace.vgtu.lt/handle/1/926>
33. AVIŽA, D. Pastato atitvarų racionalaus termoizoliacinio sluoksnio daugiatislė selektonovacija. *Statybos inžinerija*. – Vilnius, „Technika“, 2016. p. 68. Prieiga per: http://dspace.vgtu.lt/bitstream/1/2496/6/2361-M_Disertacija_D_AVIZA_04%2006%20leidykla.pdf
34. SĖRIKOVIENĖ, S. Mokomųjų objektų daugkartinio panaudojimo kokybės bertinimo metodų taikymo tyrimas. *Informatikos inžinerija*. – Vilnius, 2013 p. 44-55, Prieiga per: https://www.mii.lt/files/doc/lt/doktorantura/apgintos_disertacijos/mii_dis_2013_serikoviene.pdf
35. Lietuvos automobilių kelių direkcijos prie susisiekimo ministerijos įsakymas. „Dėl automobilių kelių asfalto mišinių techninių reikalavimų aprašo TRA asfaltas 08 patvirtinimo“ 2009 m. sausio 12 d. Nr. V-15 (2009). [žiūrėta 2021-12-05]. Prieiga per: https://e-seimas.lrs.lt/rs/legalact/TAD/TAIS.335942/format/ISO_PDF/
36. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [LST EN 13108-1]. Bituminiai mišiniai. Medžiagos techniniai reikalavimai. 1 dalis. Asfaltbetonis. = Bituminous mixtures. Material technical requirements. Part 1. Asphalt concrete [EN 13108-1]. Turi Lietuvos standarto statusą. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas.
37. UAB „Metalai ir ko“. *H formos sijos HEB* [interaktyvus]. 2021, [žiūrėta 2021-12-0+]. Prieiga per: <http://www.metalaiirko.lt/metalai/h-formos-sijos-heb-33/lt/>
38. STR 2.05.05:2005 *Betoninių ir gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas, Nr. D1-44* (2005) [žiūrėta 2021-12-06]. Prieiga per: <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/TAIS.249853?jfwid=rivwzvpg>
39. UAB „HC betonas“. *Stiprus ir Jūsų poreikiams pritaikytas betonas* [interaktyvus]. 2021, [žiūrėta 2021-12-07]. Prieiga per: <https://betonasplus.lt/betono-kaina/>
40. UAB „Lankava“. *Armatūra* [interaktyvus]. 2021, [žiūrėta 2021-12-07]. Prieiga per: <https://www.lankava.lt/armatura-375>
41. UAB „Ugira LT“. *Stiklo pluošto armatūra* [interaktyvus]. 2021, [žiūrėta 2021-12-07]. Prieiga per: <https://ugira.com/collections/visi-gaminiai/products/stiklo-pluosto-armatura?variant=39375165587569>

Priedai

Ekspertų apklausos forma

Gerb. Eksperte,

Kauno technologijos universiteto Panevėžio technologijų ir verslo fakulteto magistrantas Rokas Stankevičius atlieka tyrimą „Sijinio tilto sijų efektyvumo daugiakriteris vertinimas“, kurio tikslas – parengti sijinio tilto sijų vertinimo modelį, kuriuo pasirenkamas racionaliausias technologijos panaudojimas.

Vienas uždavinių minėtam tikslui pasiekti – sijų vertinimo rodiklių suformavimas ir šių rodiklių reikšmingumų nustatymas. Jūsų sugaištas laikas ir atsakymai padės atlikti išsamų tyrimą ir atsakyti į klausimą: kokiomis sijomis statomas tiltas bus pastatytas greičiausiai, jo kaina bus mažiausia, o kokybė atitiks visus STR reikalavimus.

Būsiu dėkingas už Jūsų išreikštą nuomonę. Apibendrintus apklausos rezultatus atsiųsiu užbaigęs magistrinį darbą.

I. BENDRA INFORMACIJA APIE EKSPERTĄ

1. Amžius: _____
2. Valstybė, miestas: _____
3. Akademinis laipsnis: _____
4. Statybos sritis: _____
5. Pareigos: _____
6. Darbo patirtis: _____
7. Kvalifikacijos atestatų skaičius: _____
8. Atstovaujama įstaiga: _____

II. INFORMACIJA APIE SIJŲ VERTINIMO KRITERIJUS

Magistrantas, atlikęs mokslinės literatūros analizę, sijinio tilto sijų rodiklius suskirstė į 6 vertinimo kriterijus: sijos medžiagų kaina, įrengimo kaina, konstrukcijos masė, įrengimo darbų laikas, sijos laikomoji galia, garantinis laikotarpis. Kiekvieną subindeksą suskirstė į rodiklius, padedančius įvertinti subindekso kiekybinę vertę.

9. Prašau įvertinkite Jūsų nuomone svarbiausius pateikiamus sijų kriterijus (visi subindeksai numeruojami eilės tvarka, kai 1 - mažiausiai reikšmingas, 6 – reikšmingiausias):

Sijinio tilto sijų vertinimo kriterijai	Reikšmingumas
Sijos medžiagų kaina	
Įrengimo kaina	
Konstrukcijos masė	
Įrengimo darbų laikas	
Sijos laikomsios galios išnaudojimas	
Garantinis laikotarpis	

Komentarai ir/arba pasiūlymai _____