

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS  
PANEVĖŽIO TECHNOLOGIJŲ IR VERSLO FAKULTETAS  
TECHNOLOGIJŲ KATEDRA**

**Robertas Labanauskas**

**EKSCENTRIŠKAI KLUPDOMŲ SPRAGOTINIŲ KOLONŲ  
ATSPARUMO TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

**Vadovas**  
Doc. Dainius Vaičiulis

**PANEVĖŽYS, 2016**

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**  
**PANEVĖŽIO TECHNOLOGIJŲ IR VERSLO FAKULTETAS**  
**TECHNOLOGIJŲ KATEDRA**

TVIRTINU  
Katedros vedėjas  
Doc. dr. Arūnas Tautkus

**EKSCENTRIŠKAI KLUPDOMŲ SPRAGOTINIŲ KOLONŲ**  
**ATSPARUMO TYRIMAS**

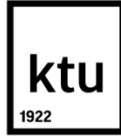
Baigiamasis magistro projektas  
**Statyba (kodas 621J80001)**

**Vadovas**  
Doc. Dainius Vaičiulis

**Recenzentas**  
Lekt. dr. Danas Garuckas

**Projektą atliko**  
Robertas Labanauskas

**PANEVĖŽYS, 2016**



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

(Fakultetas)

Robertas Labanauskas

(Studento vardas,pavardė)

Statyba (kodas 621J80001)

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Ekscentriškai klupdomų spragotinių kolonų atsparumo tyrimas“

**AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA**

2015 m. gruodžio 14 d.  
\_\_\_\_\_ Panevėžys \_\_\_\_\_

Patvirtinu, kad mano Roberto Labanausko baigiamasis projektas tema „Ekscentriškai klupdomų spragotinių kolonų atsparumo tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

\_\_\_\_\_  
(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

\_\_\_\_\_  
(parašas)

## BAIGIAMOJO PROJEKTO UŽDUOTIS

**Išduota studentui:** Robertui Labanauskui, grupė PMS-4

### 1. Darbo tema

Lietuvių kalba: *Ekscentriškai klupdomų spragotinių kolonų atsparumo tyrimas*

Anglų kalba: *Analyses of resistance of eccentrically compressed built-up columns*

Patvirtinta 2015 m. 10 mėn. 21d. dekanų potvarkiu Nr. ST17-F-13-41.

### 2. Darbo tikslas

*ištirti spragotinių kolonų atsparumą klupumui.*

### 3. Reikalavimai ir sąlygos

*ištirti spragotinių kolonų su bent trimis skirtingais tinkelių tipais atsparumą klupdymui; nustatyti kokią įtaką klupumui turi spragotinės kolonos geometrija bei skirtingomis kryptimis (išilgai, skersai ir įstrižai kolonos skerspjūvio) pridėta ekscentriška apkrova.*

**4. Projekto struktūra.** Turinys konkretizuojamas kartu su vadovu, atsižvelgiant į BBP pobūdį.

*Įvadas*

*Literatūros apžvalga*

*Apkrovos nesimetriškumo įtaka spragotinėms kolonomis*

*Klupumo priklausomybė nuo kolonos aukščio*

*Klupumo priklausomybė nuo spragotinės kolonos dvitėjinio profilio geometrijos*

*Išvados*

*Literatūros sąrašas*

**5. Ši užduotis yra neatskiriama baigiamojo projekto dalis.**

**6. Projekto pateikimo gynimui kvalifikacinėje komisijoje terminas** 2016-01-04  
(data)

Užduotį gavau: Robertas Labanauskas 2014 m. spalio mėn.  
(studento vardas, pavardė, parašas) (data)

Vadovas: doc. Dainius Vaičiulis 2014 m. spalio mėn.  
(pareigos, vardas, pavardė, parašas) (data)

# Turinys

SANTRAUKA .....	6
SUMMARY .....	7
Įvadas.....	8
1. Literatūros apžvalga.....	9
1.1. Bendros žinios .....	9
1.2. Mokslinės literatūros apžvalga .....	11
2. Apkrovos nesimetriškumo įtaka spragotinėms kolonomis .....	17
3. Klupumo priklausomybė nuo kolonos aukščio .....	22
4. Klupumo priklausomybė nuo spragotinės kolonos dvitėjinio profilio ilgio.....	31
Išvados .....	43
Literatūros šaltiniai .....	44

Labanauskas R.. Ekscentriškai klupdomų spragotinių kolonų atsparumo tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. Dainius Vaičiulis; Kauno technologijos universitetas, Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas, Technologijų katedra.

Panevėžys, 2016. 45 p.

## SANTRAUKA

Baigiamajame magistro projekte nagrinėjama ekscentriškai klupdoma spragoto skerspjūvio kolona. Kolonų kritinė kludymo jėga nustatyta naudojant baigtinių elementų metodą (BEM). Projektą sudaro keturi skyriai bei išvados. Pirmajame skyriuje pateiktas bendras spragoto skerspjūvio kolonos apibūdinimas, bei su šia konstrukcija susijusių mokslinių tyrimų apžvalga. Antrajame skyriuje pateikiama apkrovos nesimetriškumo įtaka spragotinėms kolonomis. Sumodeliuoti keturi tipai tinkelių parenkant profilius, medžiagą ir apkrovą. Trečiame ir ketvirtame skyriuose pateikiama geometrinių parametrų įtaka spragotinių kolonų atsparumui kludymui. Pagrindiniais geometriniais parametrais laikyti kolonos profilių aukštis ir ilgis. Tyrimų metu nustatyta, jog visų tinkelių kritinė jėga mažėja neatsižvelgiant į išorinės apkrovos ekscentriciteto kryptį. Nustatyta, kad Z tipo tinkelio spragotinė kolona yra atspariausia kludymui. Tokio tipo tinkelis turėjo didžiausia kritinę jėgą nesvarbu, kokia kryptimi buvo keičiamas ekscentriciteto dydis. Tačiau N tipo tinkelis yra mažiausiai „jautrus“ apkrovos ekscentriškumui.

Labanauskas R. Analyses of resistance of eccentrically compressed built-up columns. Final project of the Master's degree / supervisor doc. Dainius Vaičiulis; Cathedral of Technologies, Panevezys Faculty of Technologies and Business, Kaunas University of Technologies.

Panevezys, 2016. 45 p.

## SUMMARY

Eccentrically compressed cross-section of a built-up column is analysed in the final project of the Master's degree. Critical power of compressing columns is defined using the finite element method (FEM). The project consists of four parts and conclusions. In the first part a general definition of a cross-section built-up column is given and the survey of scientific research connected with this structure is presented. In the second part the influence of non-symmetry of loading on the built-up columns is presented. Four types of nets choosing profiles, materials and loading are modelled. In the third and fourth parts the influence of geometric parameters on the resistance of compressing of built-up columns is given. The height and length of profiles are considered to be the main parameters of built-up columns. During the investigation it was found out that the critical power of all nets is getting less irrespectively of the direction of eccentricity of external loading. It was determined that the Z type built-up column is the most resistant. The net of this type had the biggest critical power despite the direction of changing the quantity of eccentricity. However the N type net is the least „sensitive“ considering the eccentricity of loading.

## Įvadas

Kolonomis vadinami vertikalūs konstrukcijų elementai, kuriomis paremiamos stogų santvaros, tarpaukštinių perdangų sijos ir kitokios aukščiau esančios konstrukcijos. Kolonos sudarytos iš trijų dalių: kolonos liemens – pagrindinio laikančiojo elemento, kolonos viršūnės, kuri aukščiau esančių konstrukcijų atramines reakcijas paskirsto liemens skerspjūviui, ir kolonos bazės, kuri liemens įrašą paskirsto didesniame pamato plote. Pagal konstrukciją kolonas galima skirstyti į ištisines ir spragotines.

Apskritai, kolonos suprojektuotos taip, kad ašinė jėga būtų lygiagreti kolonai. Tačiau būna situacijų, kad jėga veikia ne centre. Tokia jėga vadinama ekscentriška.

**Temos aktualumas.** Dažniausiai konstrukcijos elementai yra gniuždomi. Konstrukcijos savaime nesulūžta, išskyrus tuos atvejus kai viršijama jų kritinė apkrova. Tai pat gniuždant nepasireiškia konstrukcijų nuovargis. Tačiau jeigu konstrukcija yra kolona, šiuo atveju spragota kolona, gali atsirasti klupumas. Literatūroje dažnai sutinkamas terminas klupumas. Tam tikrais atvejais jis griežtai siejamas su bifurkacija, kitais pažymi staigius geometrinius pokyčius, veikiančiai apkrovai pasiekus kritinę reikšmę. Klupdymas yra ypač pavojingas, nes konstrukcijos elementai geometriškai pasikeičia. Elementai neatsistato į savo pradinę padėtį, ir tokiu atveju konstrukcija dažniausiai sugriūna.

**Baigiamojo projekto objektas:** klupdomos spragotinės kolonos.

**Baigiamojo projekto tikslas:** ištirti spragotinių kolonų atsparumą klupumui.

**Baigiamojo projekto uždaviniai:**

1. Nustatyti, kokią įtaką spragotinių kolonų atsparumui turi apkrovos nesimetriškumas.
2. Nustatyti, kokią įtaką klupdymui turi tinklelio elementų išsidėstymas kolonos skerspjūvyje.
3. Nustatyti, kokią įtaką atsparumui turi kolonos geometriniai parametrai.

**Darbo aprobavimas** – baigiamojo projekto tematika yra paskelbtas mosklinis straipsnis: „Analyses of depending of resistance of buckling built-up columns on the non-symmetric bias“ 2015 m.

**Baigiamojo projekto apimtis ir struktūra** – baigiamąjį projektą sudaro aiškinamasis raštas, įvadas, pagrindiniai trys skyriai kuriuose yra 49 paveikslėliai, 1 lentelė, išvados, informaciniai šaltiniai. Baigiamojo projekto apimtis yra 45 p.



# 1. Literatūros apžvalga

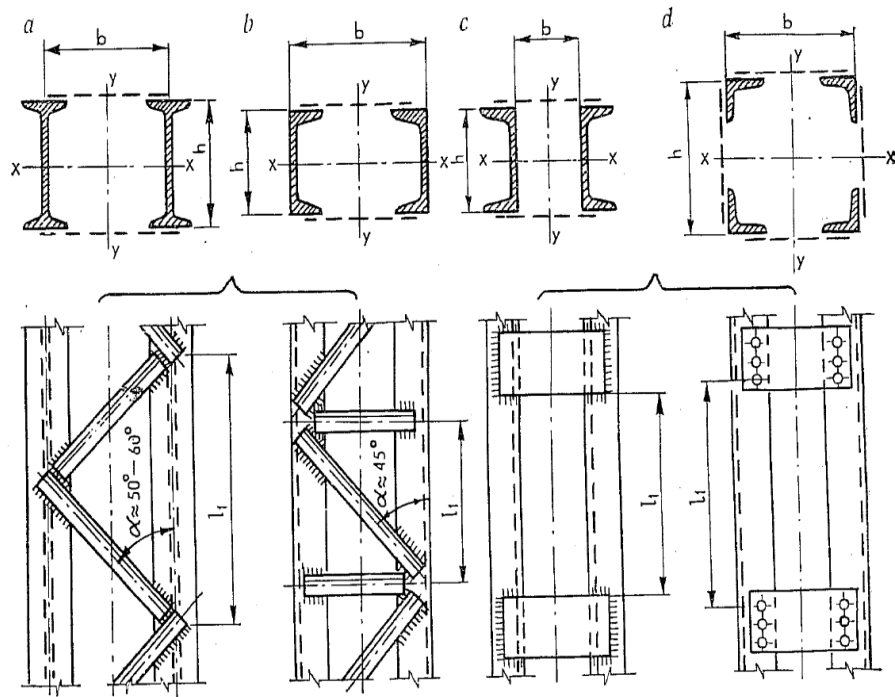
## 1.1. Bendros žinios

Spragoto skerspjūvio kolonos įprastai naudojamos pramoniniuose pastatuose perdangoms paremti, kai reikalingas didelis aukštis, arba pokraninių sijų atramoms. Pramoniniuose pastatuose spragotos kolonos teoriškai yra lengviausios plieninės tokio aukščio konstrukcijos. Šios sudėtinio skerspjūvio konstrukcijos konstruojamos iš dviejų ar daugiau konstrukcinių profiliuotųjų, sujungtų skersiniais elementais, kurie gali būti spyriniai strypai arba plokštelės (antdeklai). Skersiniai elementai užtikrina, kad sudėtinio skerspjūvio elementas dirba kaip vienas vientisas darinys, turintis reikiamą inercijos momentą.

Spragotinių kolonų skerspjūvis dažniausiai sudarytas iš dviejų lovių arba dviejų dvitėjinių profilių (žr. a, b, c 1.1 pav.). Kolonos būna dviejų tipų: su tinkleliu arba su antdeklais. Skirtumas tarp jų – tinklelio elementai. Pirmu atveju tinklelį sudaro įstriži ir horizontalūs strypai (gali būti kampuočiai, lygiašoniai kampuočiai, strypai ir t.t.), o antruoju atveju – metalinės plokštelės, standžiai pritvirtintos prie juostų [10].

Aukštesnės kolonos, kai veikia didesni krūviai ir dviejų lovių neužtenka, daromos iš dviejų valcuotųjų dvitėjinių profilių (žr. a 1.1 pav.) [10].

Spragotinės kolonos iš keturių kampuočių labai standžios, todėl tokį skerspjūvį rekomenduojama naudoti tada, kai strypas turi būti labai standus, o jį veikia palyginti nedidelės gniuždymo jėgos (žr. d 1.1 pav.). Šis skerspjūvis visose keturiose plokštumose surišamas antdeklais arba tinkleliu iš kampuočių [10].



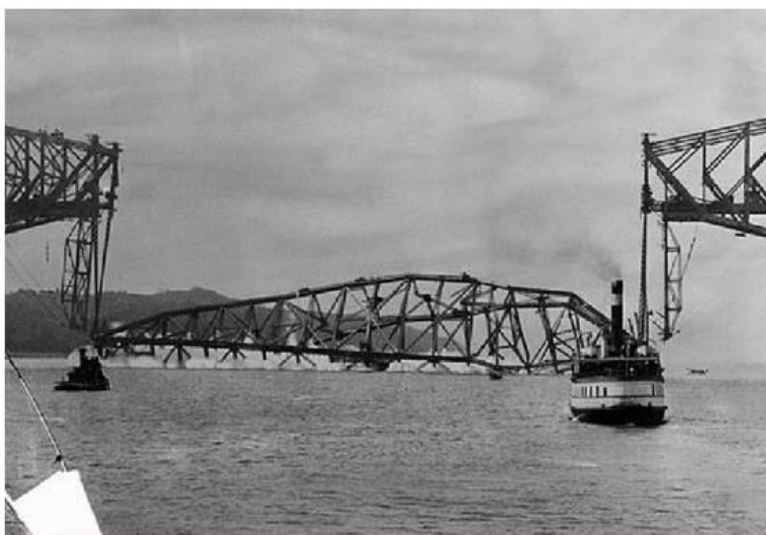
**1.1 pav.** Spragotinių kolonų skerspjūvių ir ryšių tipai [10]

Yra du pagrindiniai veiksniai, kurie išskiria spragotų kolonų projektavimą iš kitų konstrukcijų, į kuriuos reikia atsižvelgti. Pirmas veiksnys – tai reikšminga šlyties deformacijų taka, dėl kurių sumažėja konstrukcijos standumas šlyčiai ir klupamoji galia. 1907 m. sugriuvo Kvebeko tiltas Kanadoje, žuvo 75 žmonės [4].



**1.2 pav.** Kvebeko tilto griūtis 1907 m. [4]

Tiltas buvo atstatytas, tačiau 1916 m. jis vėl sugriuvo nusinešdamas 13 darbuotojų gyvybes.



**1.3 pav.**Kvebeko tilto griūtis 1916 m. [4]

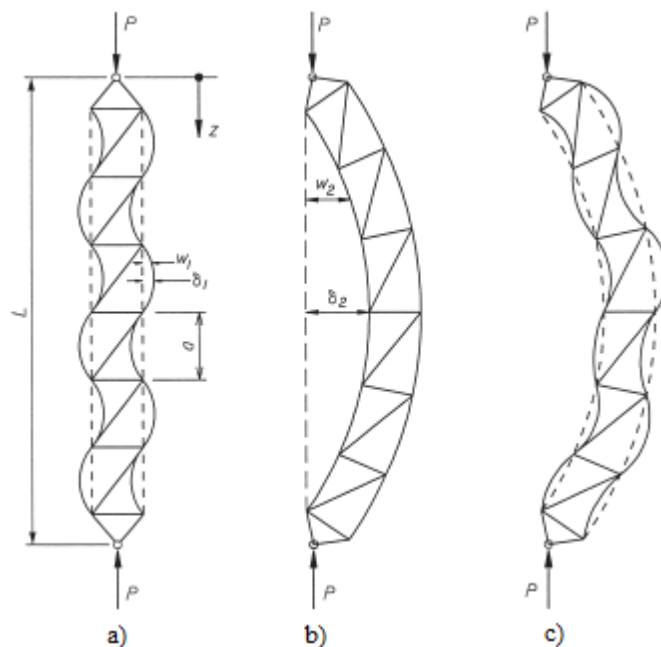
Griūties priežastis buvo aiškinama tuo, kad išklupo spragotų kolonų įstrižieji elementai. Įvykusi nelaimė pabrėžė šlyties deformacijų svarbą, kurią pirmasis pastebėjo ir tyrė Engesseris [8].

Antras veiksnys – sudėtinis klupumas, kurį sukelia vietinis ir globalus klupumas. Bendru atveju spragotos kolonos, kaip statiškai neišsprendžiamos sistemos, klupimo formos yra netaisyklingų kreivių, susidedančių iš keleto sinusoidės pusbangių su nelygiomis amplitudėmis, visuma. Globalaus klupimo forma susijusi su visu sudėtinio elementu, o lokali – su jungčių vietiniu klupumu tose vietose, kur elementai tvirtinami. Dėl šio efekto taip pat mažėja spragotos kolonos gniuždomasis stipris. Šie veiksniai turi būti įvertinti tiek skaitiniu, tiek ir analitiniu požiūriu.

## **1.2. Mokslinės literatūros apžvalga**

K. E. Kalochairitis ir Ch. J. Gantas tyrinėjo spragotų kolonų su tinkleliu ardančiąsias apkrovas. Kolonos buvo modeliuojamos iš strypinių bei plokštelių elementų su baigtinių elementų programa ADINA. Buvo tiriamas santykis tarp vietinių ir globalųjų klupumą sukeliančių apkrovų taikant geometriškai ir fiziškai netiesines analizes. Taip pat pagal tiesinę klupimo analizę nustatytos kolonų klupimo formos ir patvirtintos skaitiniu būdu. Atliktas eksperimentas, kurio skaitinės apkrovų reikšmės lygintos su gautomis pagal EC 3 metodiką, ir prieita prie išvados, kad šiose normose pateikta metodika yra nesaugi, ypač liauniems elementams. Dėl šios priežasties praktiniam pritaikymui pateikiamas supaprastintas analitinis metodas, duodantis pakankamai tikslias reikšmes [8].

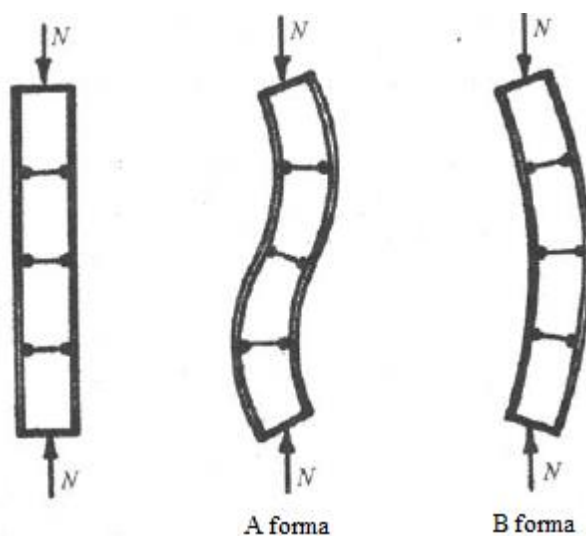
L. Duanas, M. Reno ir Ch. M. Uangas tyrė sudėtinio klupumo įtaką gniuždomajam spragotų kolonų stipriui. Sudėtinį klupumą, kuris mažina spragotos kolonos gniuždomąjį stiprį, sukelia vietinis ir globalus klupumas (žr 1.4 pav.) [3].



**1.4 pav.** Spragotų kolonų vietinio (a), globalaus (b) ir sudėtinio (c) klupumo formos [3]

Sudėtinį klupumą tyrė Koiteris ir Kuilkeris, Thompsonas ir Huntas, Bazantas ir Cedolinas. Spragoto tipo kolonomis šlyties jėgų poveikis pasireiškia juostų ir tinklelio elementų deformacijomis. Sudėtinis klupumo efektas įvertinamas koeficientu  $\beta$ , kuris priklauso nuo globalaus liaunio, vietinio liaunio, netiesiškumo ir atskirties koeficientų. Tyrėjai pateikė pasiūlymą, kad plokšti strypai, kampuočiai, loviai ar kitokio skerspjūvio formos elementai, kurie naudojami kolonos tinkleliui ar antdeklams, turi būti išdėstomi taip, kad kolonos juostos klupamojo ilgio ir skerspjūvio inercijos spindulio santykis neviršytų 0,75 pagrindinio tinklelio elemento liaunio.

Spragotų kolonų iš šaltai formuotų sudėtinio skerspjūvio elementų stabilumą studijavo R. Zaharia ir D. Dubina. Jie analizavo spragotų su antdeklais kolonų, sukonstruotų iš sienutėmis sujungtų ir varžtais sutvirtintų C formos skerspjūvio šaltai formuotų elementų, klupumą. Buvo lyginami rezultatai, gauti panaudojant baigtinių elementų programą ANSYS, su EC 3 bei Rondalio ir Niazzi metodikomis ir eksperimento metu gautais rezultatais. ANSYS bei Rondalio ir Niazzi metodu gautos kritinės apkrovų vertės sutapo geriausiai. Išbandyti 4 bandiniai: pirmieji du skyrėsi tik atstumu tarp skersinių elementų, o likę du – tik skersinių elementų skaičiumi. Visiems bandiniams gauta klupumo forma B (žr. 1.5pav.) [14].



**1.5 pav.** Spragotų kolonų klupumo formos [14]

A. G. Razdolsky (2010) tyrė spragotų kolonų su trikampiū bei kryžminiū tinkleliais liaunio koeficientų skaičiavimą. Kolonos, kaip statiškai neišsprendžiamos sistemos, stabilumo analizė rodo, kad Eulerio kritinė jėga yra tinklelio specialaus standumo parametro ir skaičiaus ruožų, į kuriuos tinklelio jungtys dalija kolonos juostas, funkcija. Ekvivalentinis liaunio koeficientas spragotoms kolonomis su tinkleliu buvo nustatomas taip pat kaip vientiso skerspjūvio strypo. Galuose lanksčiai įtvirtintas vientiso skerspjūvio strypas yra analogiškas spragotai kolonai sutinkleliu, jei Eulerio kritinė jėga strypui yra lygi Eulerio kritinei jėgai kolonai. Dėl to ekvivalentinis spragotos kolonos su tinkleliu liaunio koeficientas taip pat apibūdinamas, kaip tinklelio parametro ir ruožų skaičiaus funkcija. Įrodyta, kad grafikai, vaizduojantys priklausomybę tarp kolonos liaunio koeficiento ir kolonos juostos ruožo liaunio koeficiento, skiriasi nedaug, todėl galima išvesti difikuotą liaunio koeficientą, atsižvelgiant į ruožų skaičių. Autorius nustatė, kad kolonos liaunio koeficientas mažėja, didėjant tinklelio standumo parametrui, tačiau kolonų su kryžminiū tinkleliu liaunio koeficientas išlieka nepakitęs, kai pasiekia dydį, lygų atskiro juostos ruožo liaunio koeficientui [11].

Spragotų kolonų su plonasieneis antdėklais elgsena buvo nagrinėjama Salemo su kolegomis baigtinių elementų programa, taikant netiesinę analizę. Šiame darbe taip pat aiškinami spragotų kolonų netobulumai. Analizėje pritaikyta modifikuota formulė, įvertinanti pradinį klupumo koeficientą ir pradinius kolonos elementų netobulumus. Ekvivalentinis liaunio koeficientas buvo panaudotas dviem atvejais. Pirmuoju naudojamas apskaičiuoti stiprumą. Antruoju naudojamas išvesti efektyviojo kolonos juostų ilgio tarp gretimų antdėklų koeficiento išraiška. Šios išraiškos paaiškino pirminių klupumo formų schemas. Darbe nustatyta, kad spragotų su antdėklais kolonų stiprumui, įvertinant visuminį klupumą, didžiausią poveikį turi santykis tarp antdėklų pločio ir atstumo tarp juostų. Kai šio santykio reikšmė viršija 0,9 kolonos stipriui minėtojo santykio įtaka tampa nereikšminga. Sąlyginai trumpoms kolonomis, kurių ekvivalentinis liaunio koeficientas lygus

80, didžiausia laikomoji galia buvo nustatyta tais atvejais, kai atstumas tarp gretimų antdėklų yra nuo dešimtadalio iki ketvirtadalio viso kolonos ilgio [12].

Spragotas kolonas su antdėklais palčiai eksperimentiškai tyrinėjo M. A. El Aghoury su kolegomis. Kolonų juostos buvo konstruojamos iš keturių vienodų kampuočių, o pastarieji – iš sulenktų plieno lakštų. Buvo pagaminta 20 bandinių su skirtingais elementų pločio ir storio santykiais tam, kad būtų išbandyti mažo ir vidutinio liaunio elementai. Kampuočiai buvo sujungti antdėklais varžtinėmis jungtimis. Atlikti liekamųjų įtempių ir geometrinių netobulumų skaičiavimai. Be to, bandiniai buvo sumodeliuoti baigtinių elementų programa iš plokštelių tipo elementų, kurie įvertino geometrinį ir fizinį netiesiškumą. Gauti rezultatai parodė, kad pagrindiniai parametrai, kurie lėmė kolonos stiprį ir elgseną, buvo plieno lakštų pločio ir storio santykis, bendras kolonos liaunis ir bendras kampuočių liaunis. Baigtinių elementų modeliu ir eksperimentu gauti rezultatai vidutiniškai skyrėsi 8 % visų tipų bandiniams bei artimi apskaičiuotiems pagal AISI-LRFD metodikas mažo liaunio kolonomis su antdėklais. Vidutinio liaunio kolonų suirimo pobūdį lemia sukamasis ir lenkiamasis klupumas, kuris sumažina kolonos stiprumą. Kolonos su antdėklais iš keturių kampuočių yra labiau jautrios geometriniams netobulumams, dėl to į tai turi būti atsižvelgta šalto formavimo procese ir modifikuotas liaunio koeficientas turi būti apibrėžtas tokio tipo kolonomis. AISI-LRFD metodika gauti rezultatai tokioms kolonomis nėra patikimi [1].

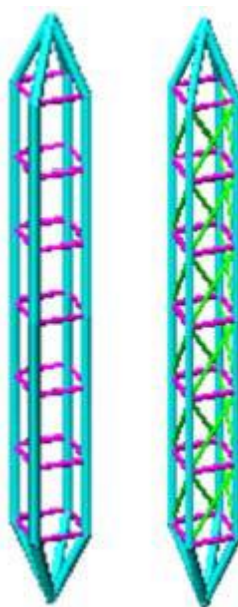
Spragotas su antdėklais kolonas, kurių juostos buvo sukonstruotos iš lovinio skerspjuvio profiliuotų, tyrė ir analizavo B. H. Hashemi ir M. A. Jafari. Tamprioji kritinė jėga spragotoms su antdėklais kolonomis nustatyta eksperimentu. Bandiniai pagaminti su įvairių matmenų antdėklais bei su skirtingais atstumais tarp juostų. Eksperimentu gautos kritinių jėgų vertės buvo lyginamos su gautomis Paul būdu ir SSRC metodika, taip pat su keturiais teoriniais ekvivalentinio liaunio apskaičiavimo metodais [7]:

- Engesserio lygtis: 
$$\left(\frac{Kl}{r}\right)_{eq} = \sqrt{\left(\frac{Kl}{r}\right)_0^2 + \frac{\pi^2}{12} \cdot \left[ \frac{A}{A_b} \cdot \frac{ah}{r_b^2} + \left(\frac{a}{rf}\right)^2 \right]}$$
;
- Temple lygtis: 
$$\left(\frac{Kl}{r}\right)_{eq} = \sqrt{\left(\frac{Kl}{r}\right)_0^2 + \left(\frac{a}{rf}\right)^2}$$
;
- Aslani lygtis: 
$$\left(\frac{Kl}{r}\right)_{eq} = \sqrt{\left(\frac{Kl}{r}\right)_0^2 + \frac{\pi^2}{12} \frac{\alpha^2}{1+\alpha^2} \left(\frac{a}{rf}\right)^2}$$
;
- Timoshenko lygtis: 
$$\left(\frac{Kl}{r}\right)_{eq} = \sqrt{\left(\frac{Kl}{r}\right)_0^2 + \frac{\pi^2}{12} \left(\frac{a}{rf}\right)^2}$$
.

Taikant Paulo metodą gauti tiksliausi, o taikant ekvivalentinio liaunio, naudojant Engesserio lygtis, metodą gauti mažiausiai tikslūs rezultatus. SSRC tikslumas šiek tiek mažesnis už Paulo metodo [7].

Spragotos kolonos su tinkleliu iš vamzdinio skerspjūvio elementų esti dviejų rūšių – be įstrižų vamzdinių elementų ir su jais (žr. 1.6 pav). Y. Guo ir J. Wangas nagrinėjo tokių kolonų nestabilumą. Problemai spręsti dėmesys buvo sutelktas į kolonų šlyties standumą. Klupumo apkrovos ir modifikuotas liaunio koeficientas, kuriuo įvertinamos šlyties deformacijos, buvo išreikšti formulėmis. Gniuždymo laikomajai galiai nustatyti buvo pasirinkta baigtinių elementų programa ANSYS, o rezultatai lyginami su įvairių projektavimo normų teorinių metodų rezultatais [6].

Nustatyta, kad skirtingai nuo vientiso skerspjūvio kolonų, vamzdinių spragotų kolonų laikomoji galia labai priklauso nuo šlyties deformacijų. Šlyties kampas ir standumas nepriklauso nuo šlyties jėgos krypties. Šlyties deformacijos įvertinamos formulėmis modifikuotam liaunio koeficientui nustatyti.



**1.6 pav.** Spragotos su tinkleliu kolonos be įstrižų elementų (kairėje) ir su jais (dešinėje) [6]

Plieninių spragotųjų kolonų bendrojo pastovumo skaičiavimą, modeliuojant uždavinį baigtiniais elementais, tyrinėjo V. Šapalas, G. Šaučiuvėnas, A. Komka. Straipsnyje nagrinėjami plieninių spragotųjų kolonų elgsenos ypatumai, atsižvelgiant į skirtingas STR 2.05.08:2005 ir EC3-1-1 metodikas. Didžiausią susidomėjimą kelia faktas, kad, taikant EC3 metodiką, nėra nagrinėjama spragotosios kolonos kluptis apie didesnio standumo  $x-x$  ašį. Apžvelgta spragotosios centriškai gniuždomos kolonos elgsena, siekiant nustatyti jos klumpamąją galią, kai kolonos liauniai yra

didesnio standumo, o mažesnio standumo plokštumoje yra skirtingi. Nagrinėtos trys skaičiuotinės situacijos [13]:

1) spragotoji kolona idealiai tiesi, o abi kolonos juostos perima vienodas ašines jėgas (STR2.05.08:2005 prielaida);

2) spragotoji kolona tiesi, bet kolonos juostos ašinės jėgos padidintos dėl pradinio kolonos nuokrypio nuo tiesiosios ašies ir papildomo lenkiamojo momento (EC 3-1-1 prielaida);

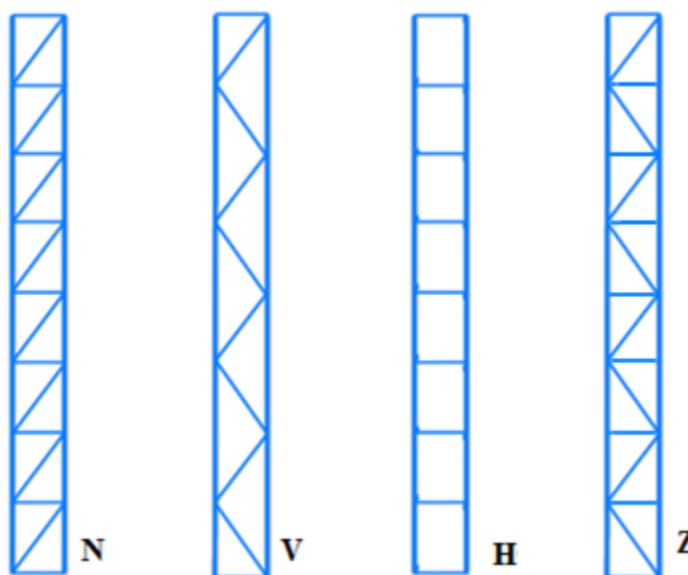
3) kolona su pradiniu nuokrypiu, o ašinės juostų apkrovos yra vienodos (EC3-1-1 prielaida). Kolonos juostos modeliuotos plokštelės tipo baigtiniais elementais, o tinklelio strypai – strypiniais.

Atlikus skaitinius modeliavimus nustatyta, kad abu metodai STR ir EC3 yra saugūs (pataisos koeficientai visada didesni už vienetą) duotomis kolonos galų įtvirtinimo sąlygomis. Tik mažo liaunio kolonų  $\lambda_x \leq 80$  didesnė atsarga gauta STR metodu, o liaunų kolonų, kai  $\lambda_x > 80$  didesnė atsarga gauta taikant EC3 metodą [13].

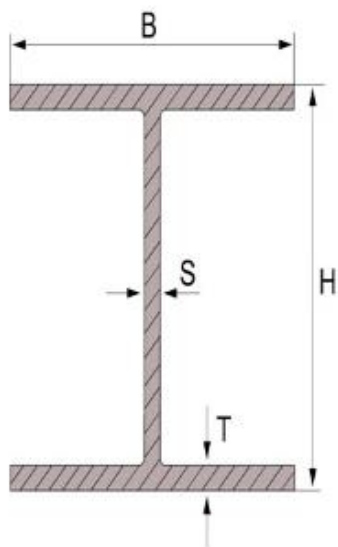


## 2. Apkrovos nesimetriškumo įtaka spragotinėms kolonoms

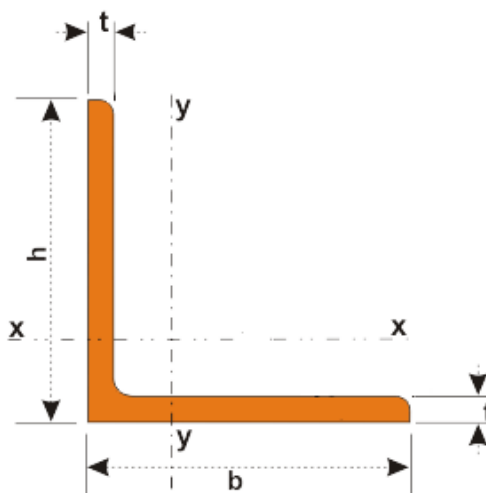
Tyrimo objektu pasirinkta spragotinė kolona sutinkleliu. Sumodeliuoti keturi tinklelių tipai N, V, H ir Z (žr. 2.1 pav.). Tokiose kolonose medžiaga naudojama ekonomiškai, nes sustatant kolonos šakas tam tikru atstumu, kolona abiejų ašių atžvilgiu esti vienodai pastovi. Sudarant kolonas iš dviejų lovių ar dvitėjinių profilių lentynos nukreipiamos į vidų, nes esant tam pačiam išoriniam gabaritiniam matmeniui, gaunamas didesnis kolonos standumas.



2.1 pav. Modeliuojamų spragotinių kolonų tinklelių tipai



2.2 pav. HEB profilio skerspjūvis



2.3 pav. L formos kampuočio skerspjūvis

Kolonos juostoms buvo naudojami dvitėjinio skerspjūvio HEBprofiliai (žr. 2.2 pav.), o tinkleliui lygiašoniai „L“ formos kampuočiai (žr. 2.3 pav.). Skerspjūvių charakteristikos pateiktos 1 lentelėje.

Skaičiuojamų elementų skerspjūvių duomenys [9]

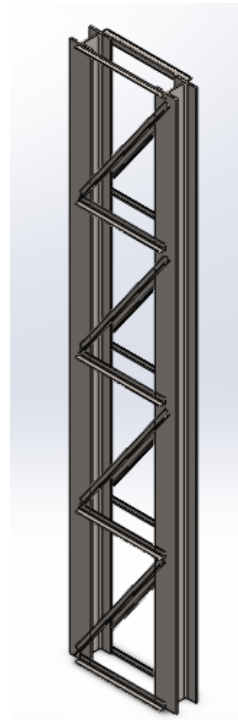
Skerspjūvis	$H, cm$	$B, cm$	$T, cm$	$S, cm$	$A, cm^2$	$I_y, cm^4$	$I_x, cm^4$	$i_y, cm$	$i_x, cm$
HE200B „EN 10034“	20	20	0,9	1,5	78,1	2000	5700	5,07	8,54
L50×50×5 „EN10024“	5	5	0,5	–	4,8	10,96	10,96	1,51	1,51

Kiti pasirinkti dydžiai:

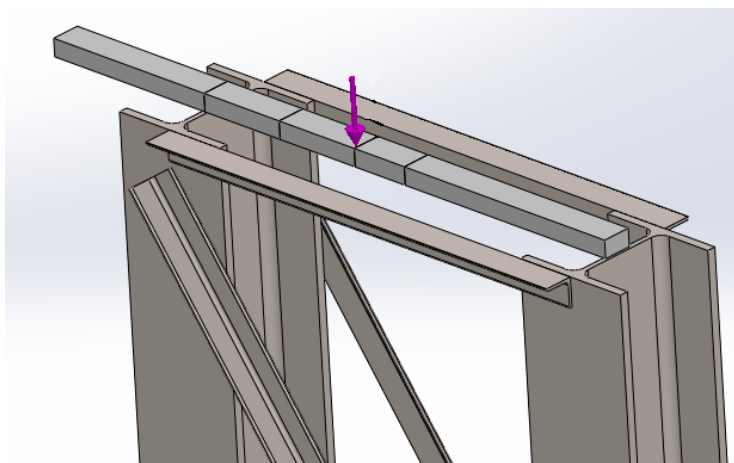
- tinklelio spyrio posvyrio kampas  $45^\circ$ ;
- visų profilių medžiaga – plienas S355 „EN 10025-2:2004“, kurio tamprumo modulis  $E = 2,1 \cdot 10^5$  MPa, o Puasono koeficientas  $\nu = 0,29$ ;
- kolonos aukštis 10 m;
- kolonos plotis (imamas tinklelio plotis) 0,8 m;
- kolonos storis 0,2 m;
- veikiančios jėgos ekscentricitetas  $e$  kinta nuo 0 m iki 0,7 m.

Skaitiniam eksperimentui atlikti pasirinkta SolidWorks Simulation programa.

Kompiuterine programa SolidWorks sukurti keturi kolonos modeliai, parenkant profilius ir medžiagą.

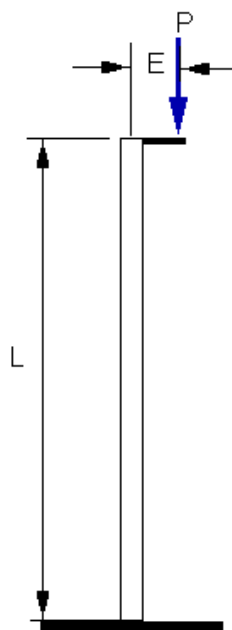


**2.4 pav.** Sumodeliuota N tipo kolona



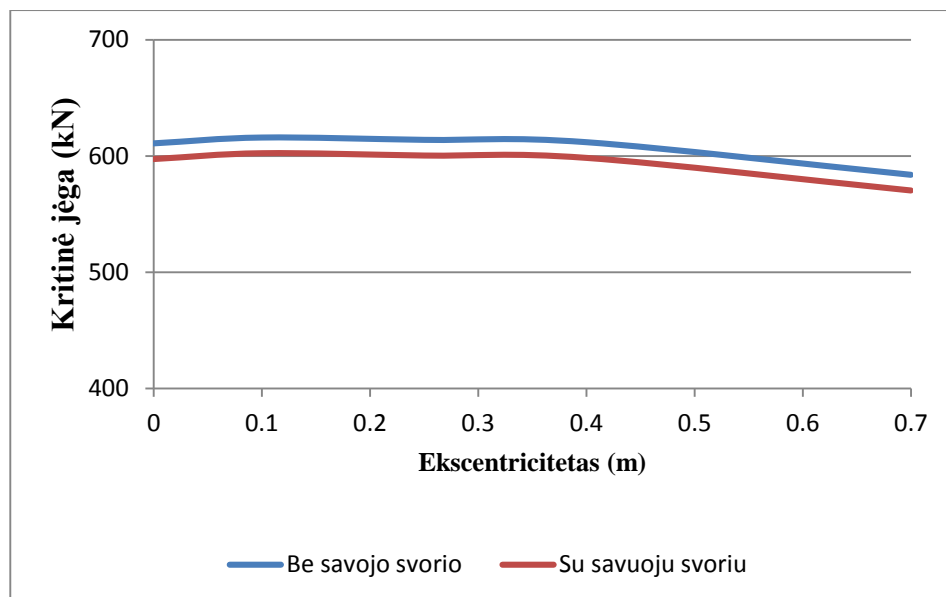
**2.5 pav.** Ekscentriškos apkrovos pridėjimas

Po to kolona įtvirtinta. Visi modeliai tvirtinami vienodai t.y. apatinė kolonos dalis standžiai. Apkrova buvo dedama tam tikru atstumu nuo centro (žr 2.5 pav.). Taip pat profilio, kuriame pridėta apkrova, medžiagos standumas parinktas ženkliai didesnis už kolonos medžiagos standumą.



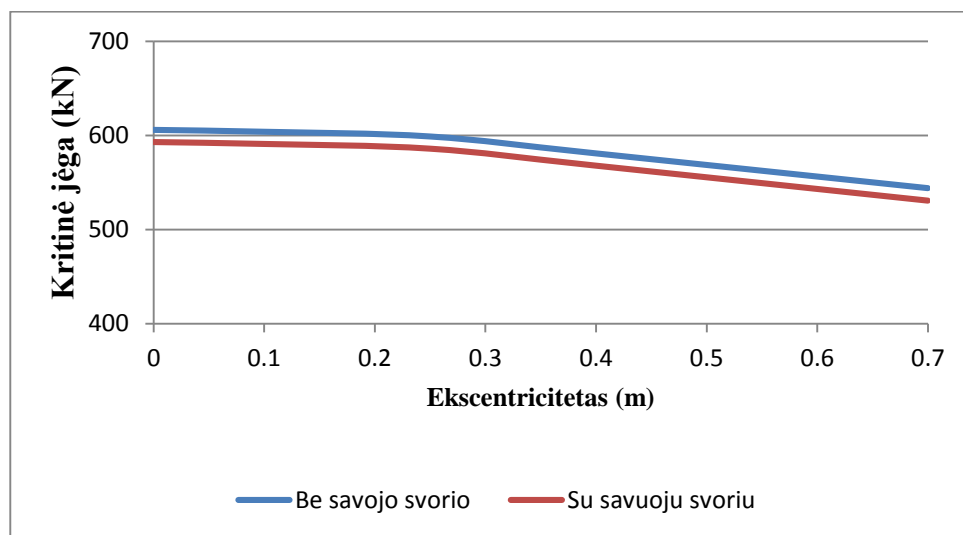
**2.6 pav.** Veikiančios jėgos ekscentricitetas

Ekscentricitetas nuo 0 iki 0,4m. yra kolonos profilio ribose, o 0,4 - 0,7m. yra už profilio ribų.



**2.7 pav.** N tipo spragotinės kolonos kritinės jėgos rezultatas

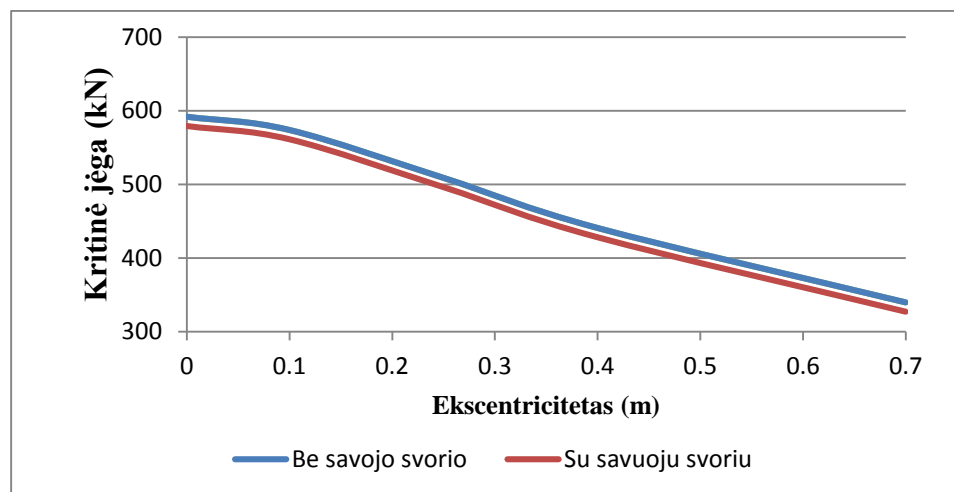
Pradžioje nustatyta kokią įtaką kritinei apkrovai turi savasis kolonos svoris. 2.7 pav. pateikta N tipo spragotinės kolonos kritinės jėgos priklausomybė nuo ekscentriciteto. Matome, kad kuo didesnė ekscentricitetas tuo mažesnė kritinė jėga. Ekscentricitetą padidinus nuo 0 iki 0,7 m kolonos kludymo kritinė jėga sumažėja apie 4,5%. Lyginant kritinę jėgą su savoju svoriu ir be savojo skirtumas yra tik apie 2%.



**2.8 pav.** V tipo spragotinės kolonos kritinės jėgos rezultatas

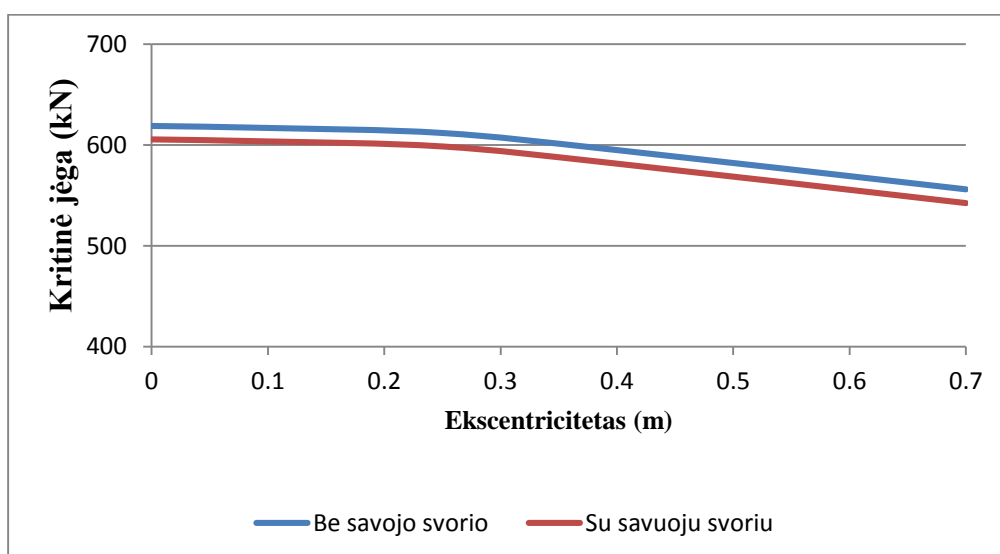
2.8 pav. pateikta V tipo spragotinės kolonos kritinės jėgos priklausomybė nuo ekscentriciteto, įvertinant ir nevertinant savojo svorio. Kritinė jėga sumažėja 10%, kai apkrova iš

geometrinio kolonos profilio centro perkeliama atstumu 0,7 m. Savasis svoris kritinę jėgą sumažina tik apie 2%.



**2.9 pav.** H tipo spragotinės kolonos kritinės jėgos rezultatas

2.9 pav. pateikta H tipo spragotinės kolonos kritinės jėgos priklausomybė nuo ekscentriciteto. Ekscentricitetą padidinus nuo 0 iki 0,7 m kolonos klūpdyimo kritinė jėga sumažėja apie 42 %. . Lyginant kritinę jėgą su savoju svoriu ir be savojo skirtumas yra tik apie 2%.



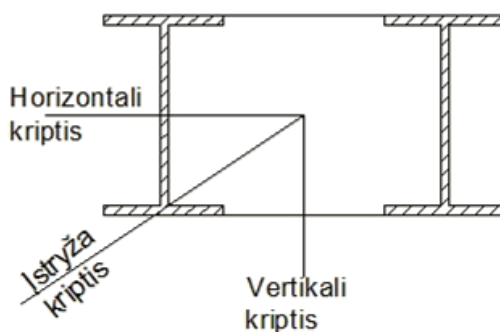
**2.10 pav.** Z tipo spragotinės kolonos kritinės jėgos rezultatas

2.10 pav. pateikta Z tipo spragotinės kolonos kritinės jėgos priklausomybė nuo ekscentriciteto. Kritinė jėga sumažėja 10%, kai apkrova iš geometrinio kolonos profilio centro perkeliama atstumu 0,7 m. Savasis svoris kritinę jėgą sumažina tik apie 2%.

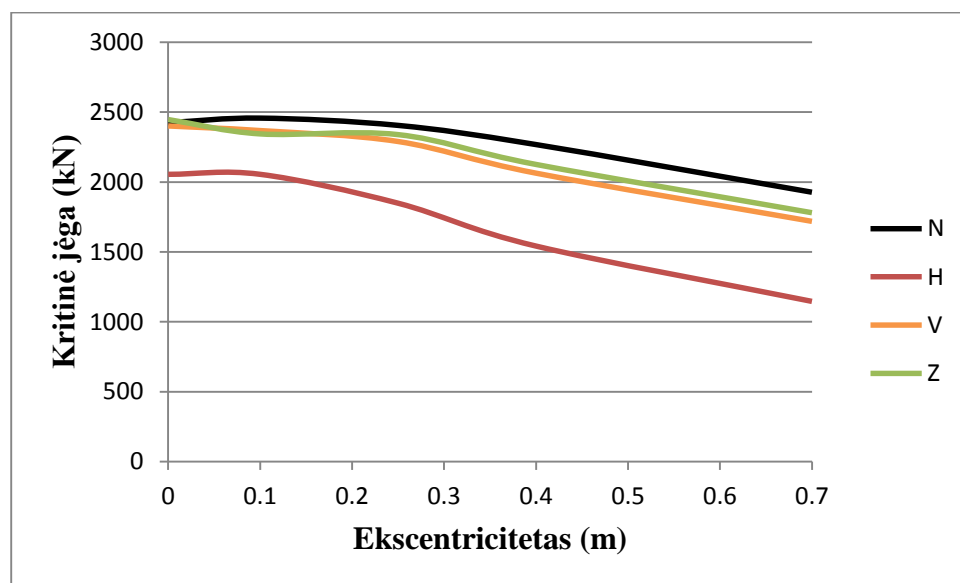
Taigi gavome, kad nepriklausomai nuo spragotinės kolonos tinklelio tipo savasis svoris kritinės jėgos vertei turi labai nedidelę įtaką (kritinė jėga sumažėja tik apie 2%). Todėl tolimesniuose tyrimuose savojo svorio nevertinsime.

### 3. Klupumo priklausomybė nuo kolonos aukščio

Kaip ir pirmuoju atveju pasirinkti keturi kolonų tinklelių tipai. Kolonose tinklelio elementų ilgai, atstumas tarp elementų ir posvyrio kampas, išlaikomi pastovūs, keičiamas tik kolonos aukštis. Kolonos aukštis imamas 5 m, 7,5 m, 10 m, 15 m, 20 m. Šiuo atveju jėga išdėstoma trimis skirtingomis kryptimis tam tikru atstumu (3.1 pav.).

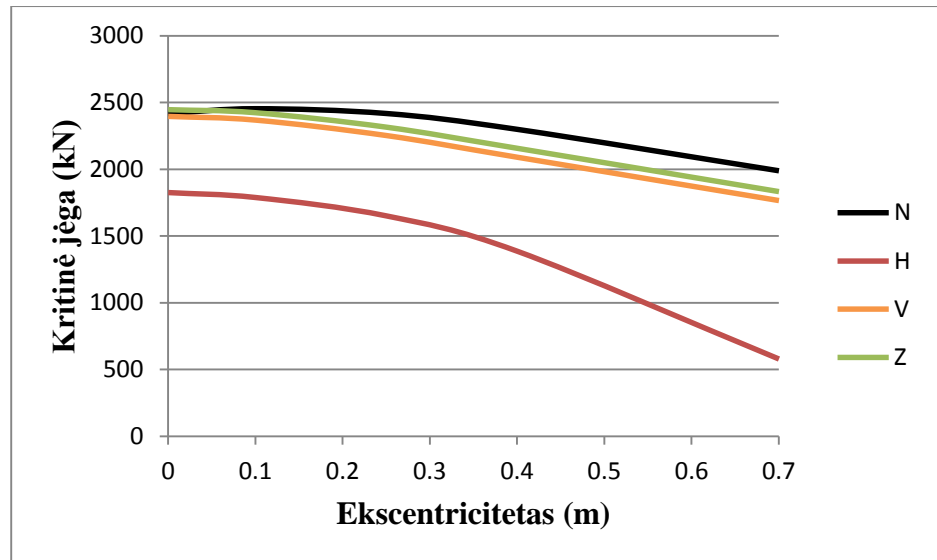


3.1 pav. Išorinės apkrovos ekscentriciteto kryptys, žiūrint iš viršaus



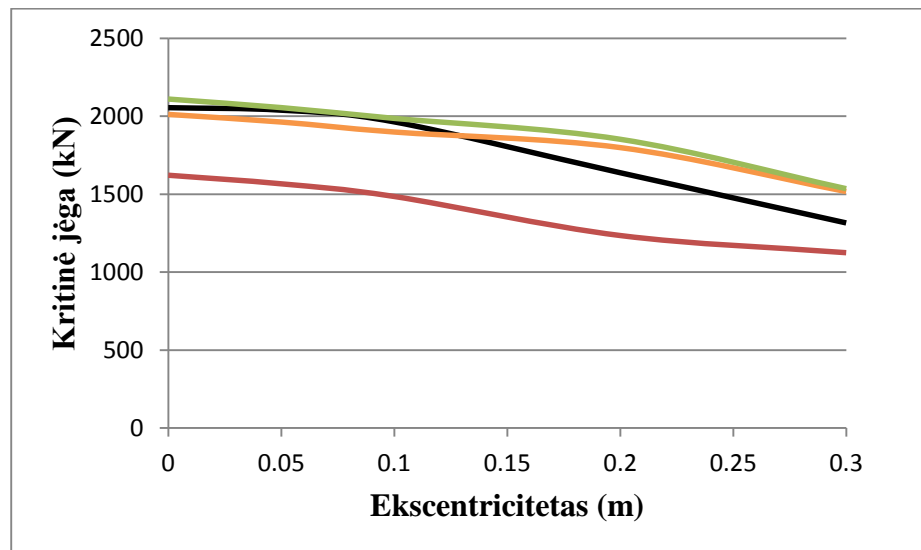
3.2 pav. Kritinės jėgos priklausomybė nuo išorinės apkrovos ekscentriciteto, kuris kinta horizontalia kryptimi (žr. 3.1 pav.), N, H, V ir Z tipo tinkleliams, kai kolonos aukštis yra 5 m

3.2 pav. pateikiama 5 m aukščio spragotinės kolonos kritinės jėgos priklausomybė nuo ekscentriciteto, kai ekscentriciteto dydis buvo keičiamas horizontalia kryptimi. Didžiausia kritinė jėga, kai klupdymo apkrova pridėta centriškai, pasižymi Z profilis, mažiausia – H profilis. Visų keturių profilių kritinė jėga mažėjo didėjant ekscentricitetui. Daugiausia sumažėjo H tipo profilyje, net apie 44%, o mažiausiai N tipo profilyje – 20%.



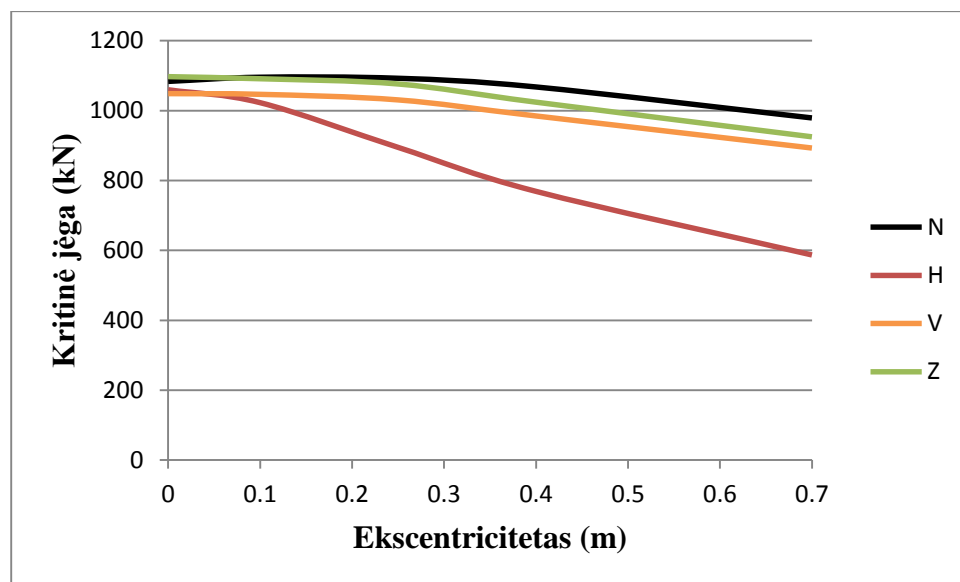
**3.3 pav.** Kritinės jėgos priklausomybė nuo išorinės apkrovos ekscentriciteto, kuris kinta įstrižą kryptimi (žr. 3.1 pav.), N, H, V ir Z tipo tinkleliams, kai kolonos aukštis yra 5 m

3.3 pav. pavaizduota 5 m aukščio kolonų kritinės jėgos priklausomybė nuo ekscentriciteto, kai ekscentriciteto dydis buvo keičiamas įstrižą kryptimi. Kaip ir prieš tai buvusiame grafike mes matome, kad N, H, V ir Z profiliuose kritinė apkrova mažėjo didėjant išorinės apkrovos pridėjimo vietasatstumui nuo kolonos centro. Didžiausias kritinės jėgos pokytis gautas H profilyje apie 68%, o mažiausias N profilyje – 17%. Šiuo atveju kolonų su N, V ir Z tinkleliu kritinės kludymo jėgos labai panašios (skiriasi tik apie 0,1 karto), o kolonos su H tinkleliu kritinė jėga ženkliai mažesnė (apie 0,4 karto).



**3.4 pav.** Kritinės jėgos priklausomybė nuo išorinės apkrovos ekscentriciteto, kuris kinta vertikalia kryptimi (žr. 3.1 pav.), N, H, V ir Z tipo tinkleliams, kai kolonos aukštis yra 5 m

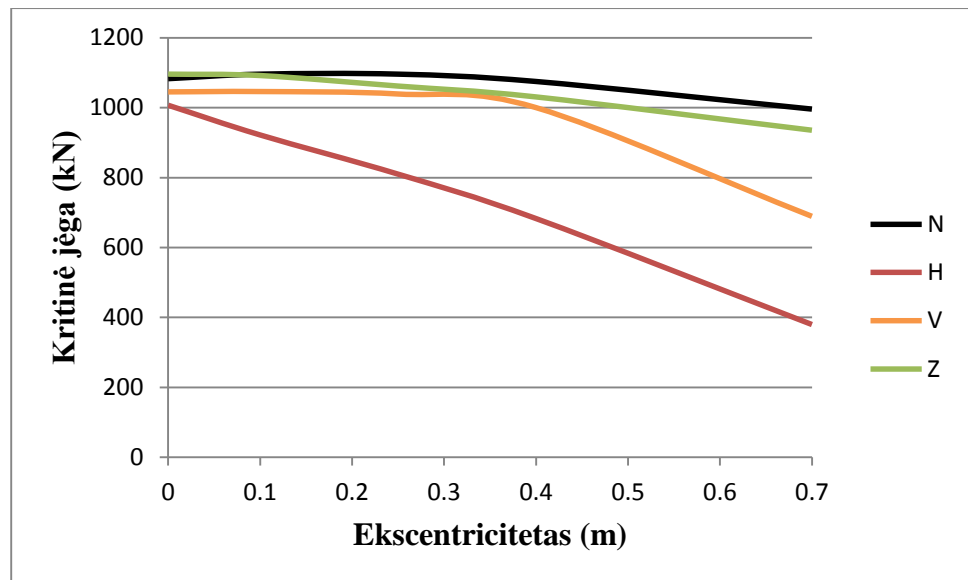
3.4 pav. pateikiama 5 m aukščio spragotinės kolonos kritinės jėgos priklausomybė nuo ekscentriciteto, kai ekscentriciteto dydis buvo keičiamas vertikalia kryptimi. Šiuo atveju visų kolonų centriškos kritinės kludymo jėgos labai panašios. Kai apkrova iš geometrinio kolonos profilio centro perkeliama atstumu 0,3 m. didžiausias sumažėjimas pastebimas N tipo profilyje apie 35 %, mažiausias V profilyje 24 %.



**3.5 pav.** Kritinės jėgos priklausomybė nuo išorinės apkrovos ekscentriciteto, kuris kinta horizontalia kryptimi (žr. 3.1 pav.), N, H, V ir Z tipo tinkleliams, kai kolonos aukštis yra 7,5 m

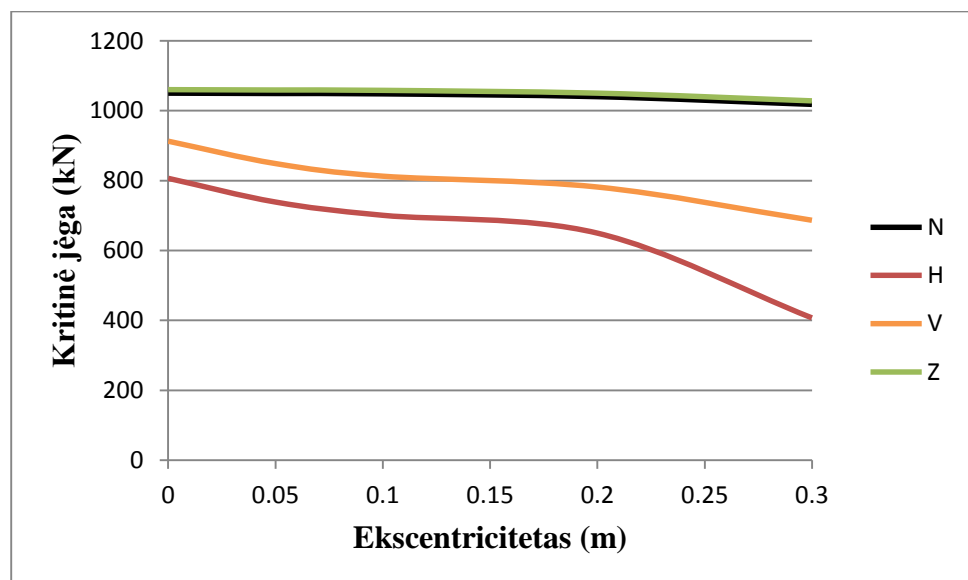
3.5 pav. pateikiama 7,5 m aukščio spragotinės kolonos kritinės jėgos priklausomybė nuo ekscentriciteto, kai ekscentriciteto dydis buvo keičiamas horizontalia kryptimi. Didžiausia kritinė jėga, kai kludymo apkrova pridėta centriškai, pasižymi Z profilis, mažiausia – V profilis. Visų keturių profilių kritinė jėga mažėjo didėjant ekscentricitetui. Daugiausiai sumažėjo H tipo profilyje, net apie 44 %, o mažiausiai N tipo profilyje apie 9,5 %.





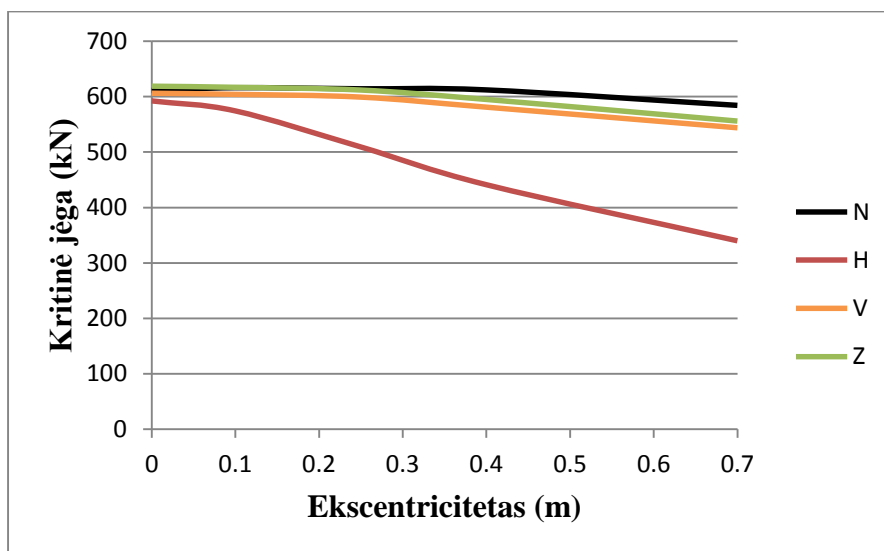
**3.6 pav.** Kritinės jėgos priklausomybė nuo išorinės apkrovos ekscentriciteto, kuris kinta įstrižą kryptimi (žr. 3.1 pav.), N, H, V ir Z tipo tinkleliams, kai kolonos aukštis yra 7,5 m

3.6 pav. pavaizduota 7,5 m aukščio kolonų kritinės jėgos priklausomybė nuo ekscentriciteto, kai ekscentriciteto dydis buvo keičiamas įstrižą kryptimi. Kaip ir prieš tai buvusiam grafike matome, kad N, H, V ir Z profiliuose kritinė apkrova mažėjo didėjant išorinės apkrovos pridėjimo vietasatstumui nuo kolonos centro. Didžiausias kritinės jėgos pokytis gautas H profilyje apie 62 %, o mažiausias N profilyje – 17 %.



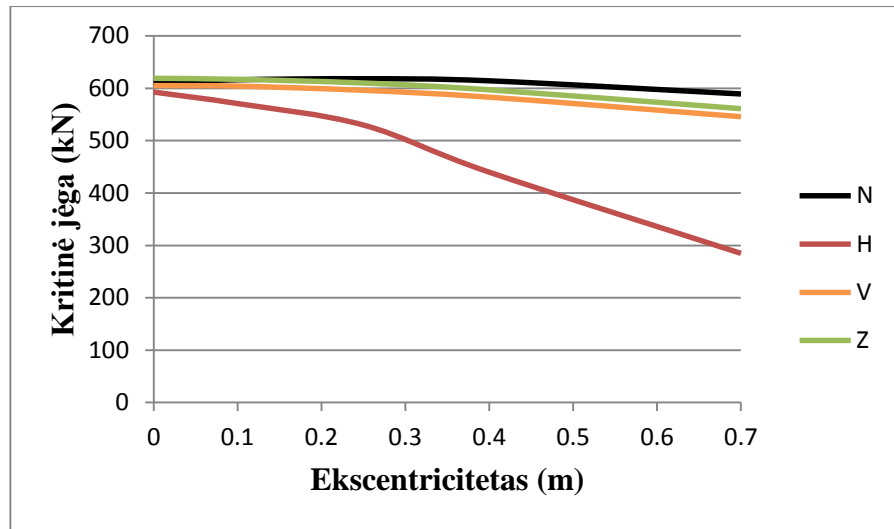
**3.7 pav.** Kritinės jėgos priklausomybė nuo išorinės apkrovos ekscentriciteto, kuris kinta vertikalia kryptimi (žr. 3.1 pav.), N, H, V ir Z tipo tinkleliams, kai kolonos aukštis yra 7,5 m

3.7 pav. pateikiama 7,5 m aukščio spragotinės kolonos kritinės jėgos priklausomybė nuo ekscentriciteto, kai ekscentriciteto dydis buvo keičiamas vertikalia kryptimi. Šiuo atveju visų kolonų centriškos kritinės kludymo jėgos labai panašios. Kai apkrova iš geometrinio kolonos profilio centro perkeliama atstumu 0,3 m. Didžiausias kritinės jėgos pokytis gautas H profilyje apie 49,5 %, o mažiausias N ir Z profiliuose apie 3 %.



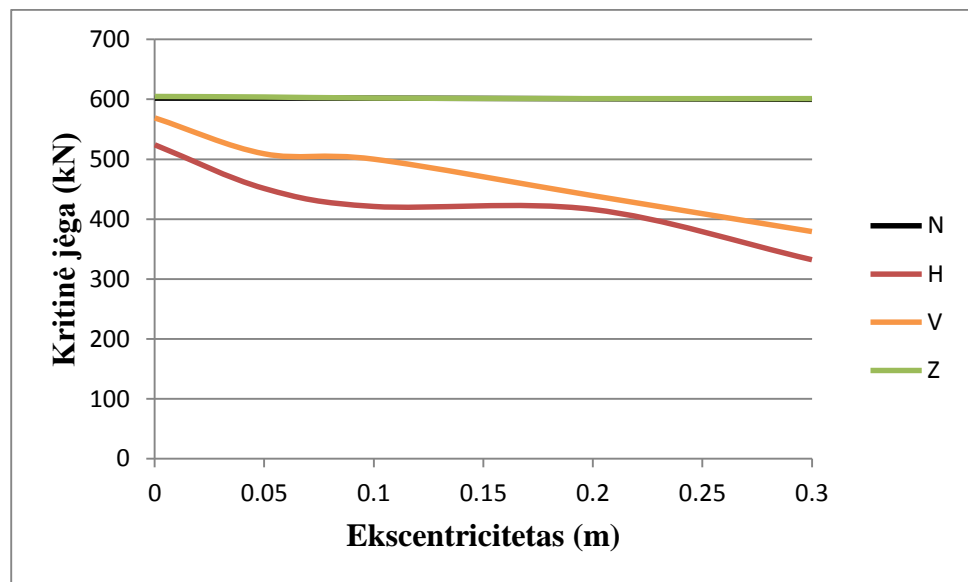
**3.8 pav.** Kritinės jėgos priklausomybė nuo išorinės apkrovos ekscentriciteto, kuris kinta horizontalia kryptimi (žr. 3.1 pav.), N, H, V ir Z tipo tinkleliams, kai kolonos aukštis yra 10 m

3.8 pav. pateikiama 10 m aukščio spragotinės kolonos kritinės jėgos priklausomybė nuo ekscentriciteto, kai ekscentriciteto dydis buvo keičiamas horizontalia kryptimi. Didžiausia kritinė jėga, kai kludymo apkrova pridėta centriškai, pasižymi Z profilis, mažiausia – H profilis. Visų keturių profilių kritinė jėga mažėjo didėjant ekscentricitetui. Daugiausiai sumažėjo H profilyje 42% mažiausiai N profilyje tik 4,5%.



**3.9 pav.** Kritinės jėgos priklausomybė nuo išorinės apkrovos ekscentriciteto, kuris kinta įstryža kryptimi (žr. 3.1 pav.), N, H, V ir Z tipo tinkleliams, kai kolonos aukštis yra 10 m

3.9 pav. pateikiama 10 m aukščio spragotinės kolonos kritinės jėgos priklausomybė nuo ekscentriciteto, kai ekscentriciteto dydis buvo keičiamas įstryža kryptimi. Kai apkrova iš geometrinio kolonos profilio centro perkeliama atstumu 0,7 m didžiausias pokytis pastebimas H profilyje. Jėga sumažėjo apie 52 %. Mažiausiai pakito N profilyje kritinė jėga sumažėjo tik apie 3,5%.

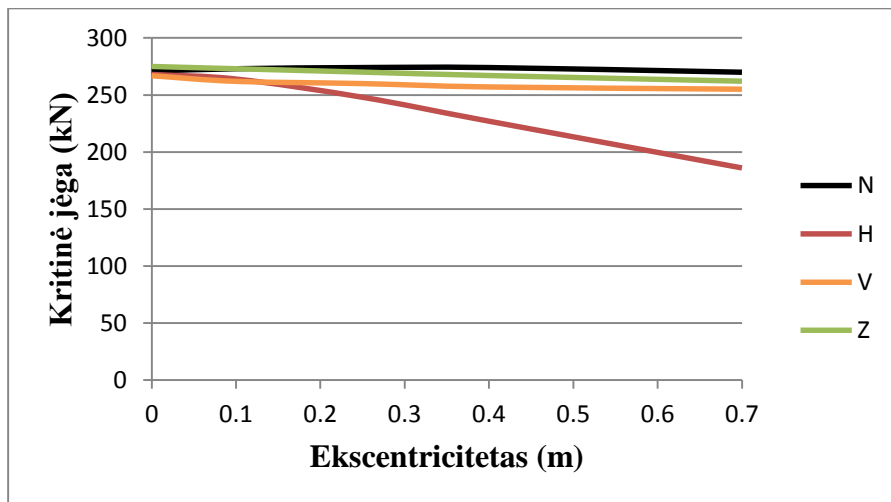


**3.10 pav.** Kritinės jėgos priklausomybė nuo išorinės apkrovos ekscentriciteto, kuris kinta vertikalia kryptimi (žr. 3.1 pav.), N, H, V ir Z tipo tinkleliams, kai kolonos aukštis yra 10 m

3.10 pav. pateikiama 10 m aukščio spragotinės kolonos kritinės jėgos priklausomybė nuo ekscentriciteto, kai ekscentriciteto dydis buvo keičiamas vertikalia kryptimi. Didžiausia kritinė jėga,

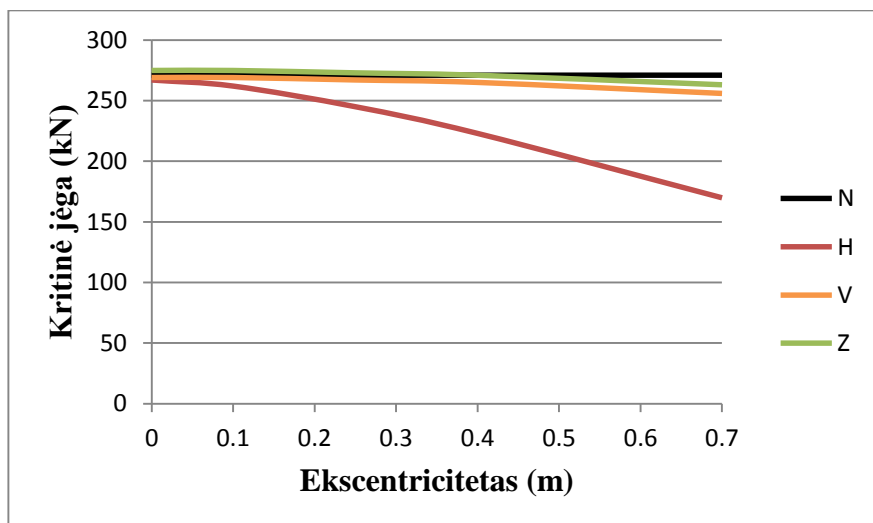
kai kludymo apkrova pridėta centriškai, pasižymi Z profilis, mažiausia – H profilis. Visų keturių profilių kritinė jėga mažėjo didėjant ekscentricitetui. Daugiausiai sumažėjo H tipo profilyje, net apie 36,5 %, o mažiausiai N ir Z profiluose tik apie 0,5%.

Sekančiuose skaičiavimuose 15 m ir 20 m spragotinės kolonos kai ekscentriciteto dydis keičiamas vertikaliakryptimi nevertiname, nes apkrovų pokytis labai mažas arba jo išvis nėra.



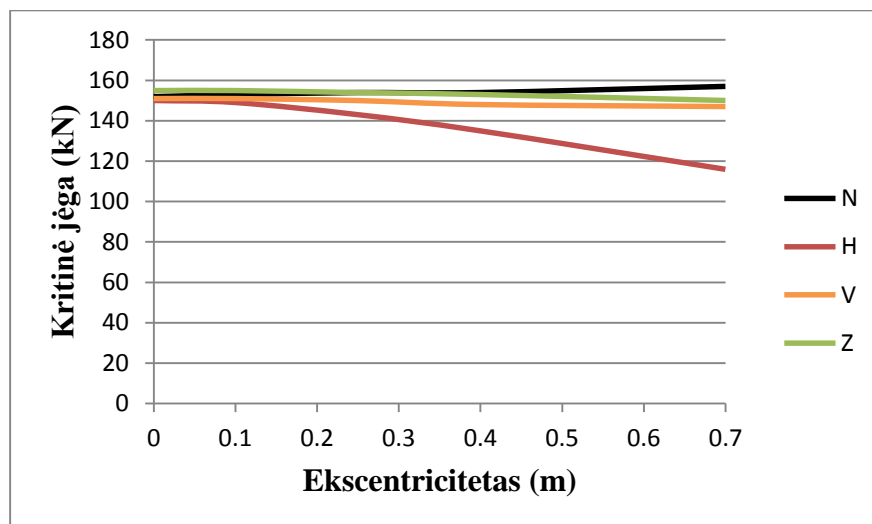
**3.11 pav.** Kritinės jėgos priklausomybė nuo išorinės apkrovos ekscentriciteto, kuris kinta horizontalia kryptimi (žr. 3.1 pav.), N, H, V ir Z tipo tinkleliams, kai kolonos aukštis yra 15 m

3.11 pav. pateikiama 15 m aukščio spragotinės kolonos kritinės jėgos priklausomybė nuo ekscentriciteto, kai ekscentriciteto dydis buvo keičiamas horizontaliai kryptimi. Kai apkrova iš geometrinio kolonos profilio centro perkeliama atstumu 0,7 m didžiausias sumažėjimas pastebimas H profilyje apie 30 %, mažiausias V profilyje apie 4,5%. N tipo profilyje kritinė jėga liko nepakitus.



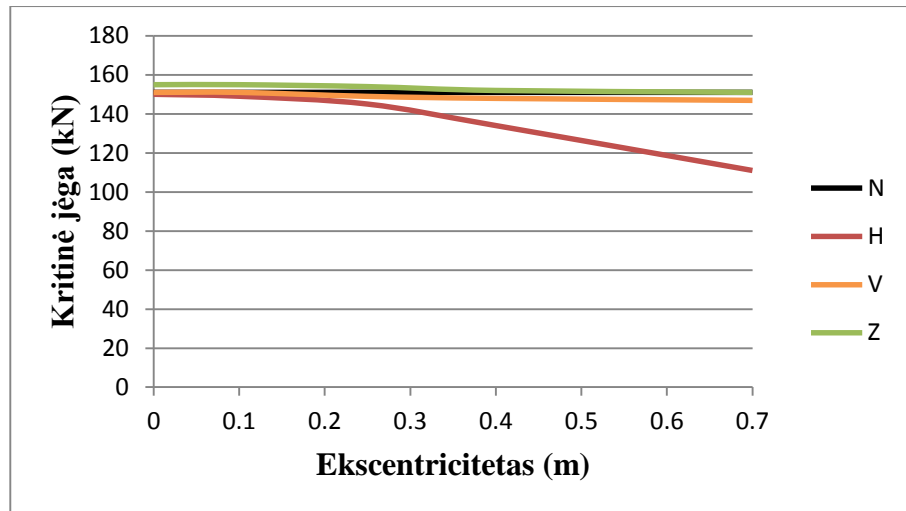
**3.12 pav.** Kritinės jėgos priklausomybė nuo išorinės apkrovos ekscentriciteto, kuris kinta įstriža kryptimi (žr. 3.1 pav.), N, H, V ir Z tipo tinkleliams, kai kolonos aukštis yra 15 m

3.12 pav. pateikiama 15 m aukščio spragotinės kolonos kritinės jėgos priklausomybė nuo ekscentriciteto, kai ekscentriciteto dydis buvo keičiamas įstryža kryptimi. Kai apkrova iš geometrinio kolonos profilio centro perkeliama atstumu 0,7 m didžiausias sumažėjimas pastebimas H profilyje apie 36%, mažiausias Z profilyje tik apie 4,5 %, N profilyje jėga nepakito.



**3.13 pav.** Kritinės jėgos priklausomybė nuo išorinės apkrovos ekscentriciteto, kuris kinta horizontalia kryptimi (žr. 3.1 pav.), N, H, V ir Z tipo tinkleliams, kai kolonos aukštis yra 20 m

3.13 pav. pateikiama 20 m aukščio spragotinės kolonos kritinės jėgos priklausomybė nuo ekscentriciteto, kai ekscentriciteto dydis buvo keičiamas horizontalia kryptimi. Kai apkrova iš geometrinio kolonos profilio centro perkeliama atstumu 0,7 m didžiausias sumažėjimas pastebimas H profilyje apie 22,5 %, mažiausiai V profilyje tik apie 2,6 %. N tipo profilyje kritinė apkrova padidėjo nežymiai tik apie 3%.

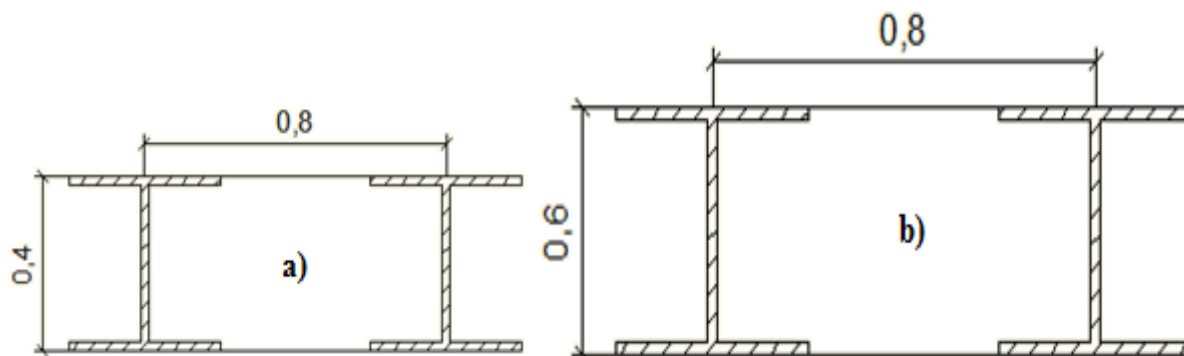


**3.14 pav.** Kritinės jėgos priklausomybė nuo išorinės apkrovos ekscentriciteto, kuris kinta įstryža kryptimi (žr. 3.1 pav.), N, H, V ir Z tipo tinkleliams, kai kolonos aukštis yra 20 m

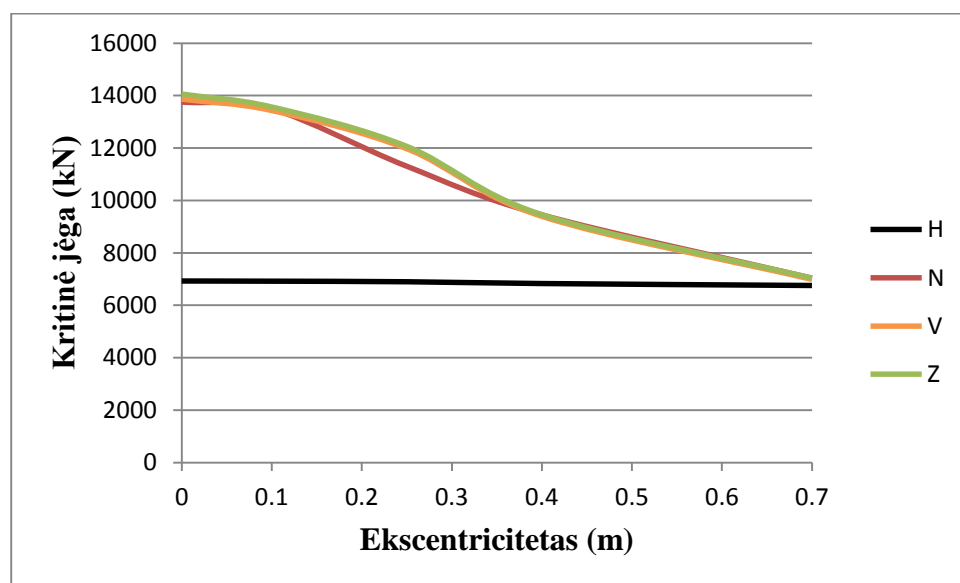
3.14 pav. pateikiama 20 m aukščio spragotinės kolonos kritinės jėgos priklausomybė nuo ekscentriciteto, kai ekscentriciteto dydis buvo keičiamas įstryža kryptimi. Kai apkrova iš geometrinio kolonos profilio centro perkeliama atstumu 0,7 m didžiausias sumažėjimas pastebimas H profilyje 26 %, V ir Z tipo profiluose kritinė jėga sumažėjo po 2,5%. N tipo profilyje jėga liko nepakitusi.

#### 4. Klupumo priklausomybė nuo spragotinės kolonos dvitėjinio profilio ilgio

Pasirinkti keturi kolonų tinklelių tipai. Kolonose tinklelio elementų ilgis, tinklelio plotis, atstumas tarp elementų ir posvyrio kampas išlaikomi pastovūs keičiamas, tik spragotinės kolonos dvitėjo profilio ilgis. Dvitėjo profilio ilgis imamas 0,4 m ir 0,6 m. Šiuo atveju jėga išdėstoma trimis skirtingomis kryptimis tam tikru atstumu (žr 3.1 pav.).

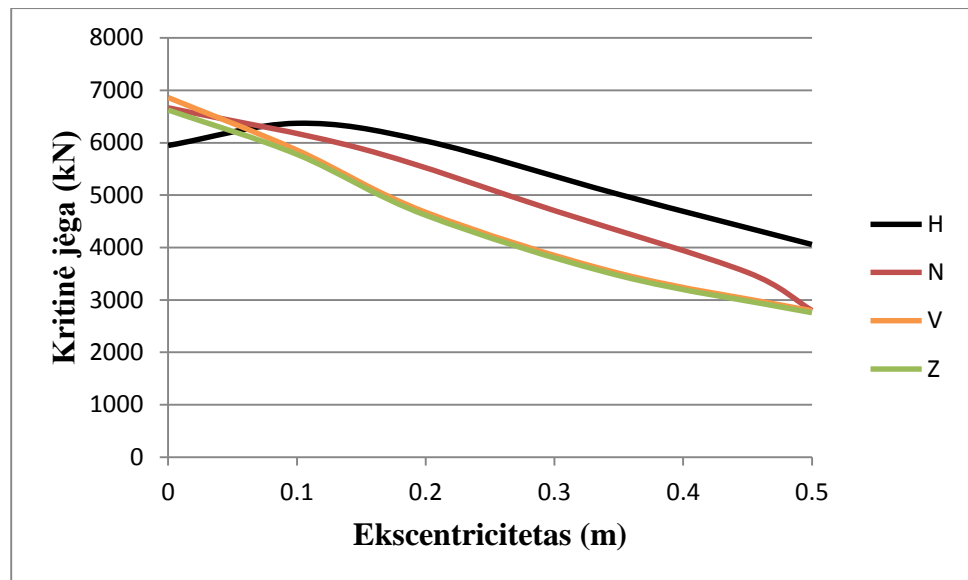


4.1 pav. Kolonos skerspjūviai: (a) 0,8 × 0,4; (b) 0,8 × 0,6



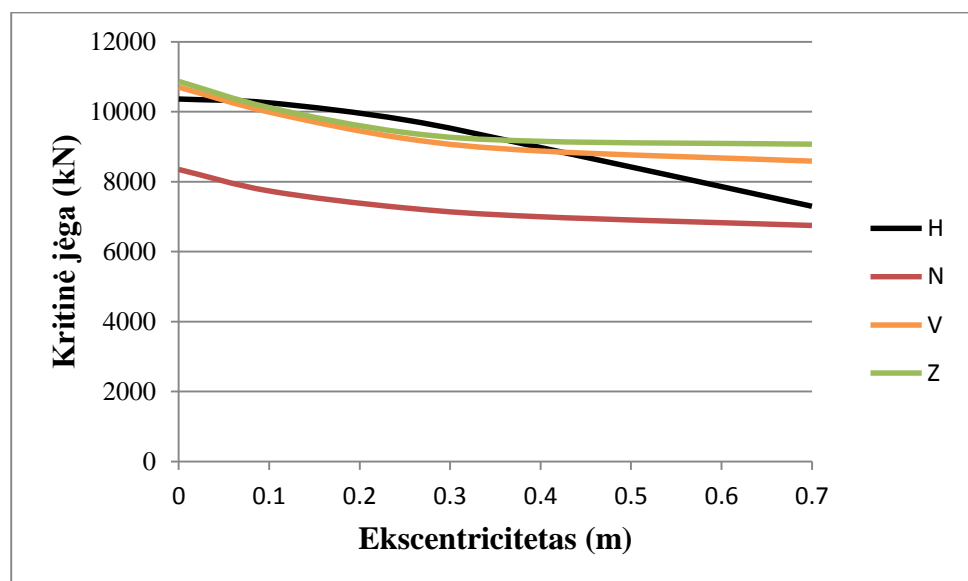
4.2 pav. Kritinės jėgos priklausomybė nuo išorinės apkrovos ekscentriciteto, kuris kinta horizontalia kryptimi (žr. 3.1 pav.), N, H, V ir Z tipo tinkleliams, kai kolonos aukštis yra 5 m, o ilgis 0,4 m

4.2 pav. pateikiama 5 m aukščio spragotinės kolonos kritinės jėgos priklausomybė nuo ekscentriciteto, kai ekscentriciteto dydis buvo keičiamas horizontalia kryptimi. Lyginant profilių kritines jėgas pastebimas didelis skirtumas. N, V ir Z tipo profilių kritinė jėga labai panaši, tačiau 2 kartus didesnė negu H tipo profilio. Lyginant priklausomybę nuo ekscentriciteto N, V ir Z profilių kritinė jėga sumažėja net 49 %, o H profilio tik 2 %.



**4.3 pav.** Kritinės jėgos priklausomybė nuo išorinės apkrovos ekscentriciteto, kuris kinta vertikalia kryptimi (žr. 3.1 pav.), N, H, V ir Z tipo tinkleliams, kai kolonos aukštis yra 5 m, o ilgis 0,4 m

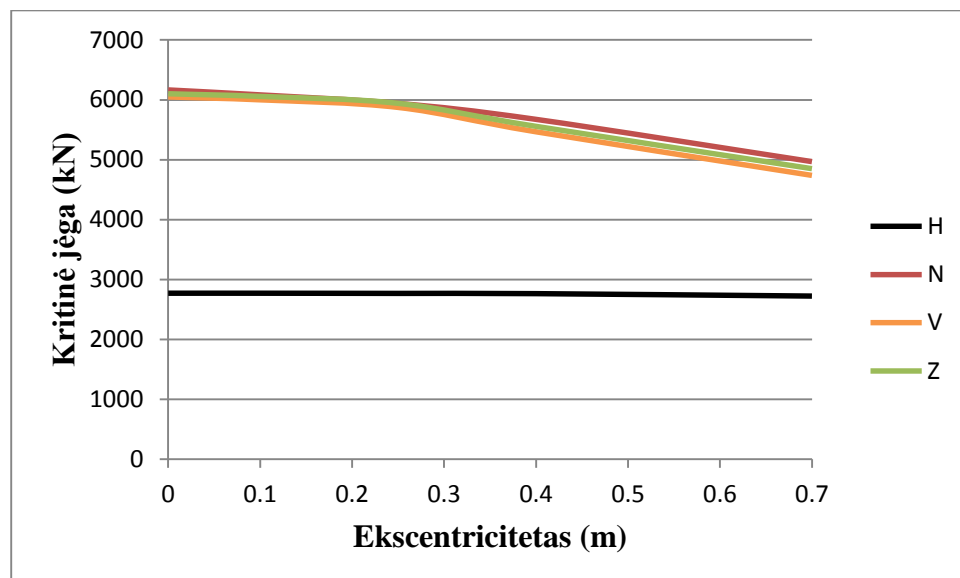
4.3 pav. pateikiama 5 m aukščio spragotinės kolonos kritinės jėgos priklausomybė nuo ekscentriciteto, kai ekscentriciteto dydis buvo keičiamas vertikalia kryptimi. Kaip ir prieš tai buvusiame grafike mes matome, kad N, H, V ir Z profiliuose kritinė apkrova mažėjo didėjant išorinės apkrovos pridėjimo vietasatstumui nuo kolonos centro. Kaip ir prieš tai buvusiame grafike matomas visų profilių kritinės jėgos sumažėjimas didėjant ekscentricitetui. N, V, Z tipo profilių kritinė jėga sumažėjo net apie 58 %, o H tipo sumažėjo 32 %.



**4.4 pav.** Kritinės jėgos priklausomybė nuo išorinės apkrovos ekscentriciteto, kuris kinta įstrižą kryptimi (žr. 3.1 pav.), N, H, V ir Z tipo tinkleliams, kai kolonos aukštis yra 5 m, o ilgis 0,4 m

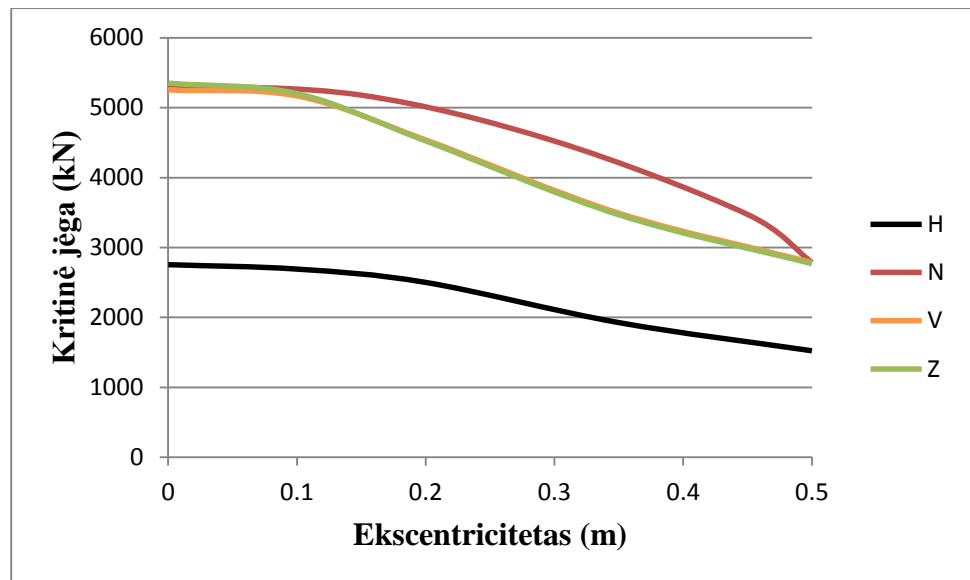


4.3 pav. pateikiama 5 m aukščio spragotinės kolonos kritinės jėgos priklausomybė nuo ekscentriciteto, kai ekscentriciteto dydis buvo keičiamas įstryža kryptimi. Kai apkrova iš geometrinio kolonos profilio centro perkeliama atstumu 0,7 m didžiausias sumažėjimas pastebimas H tipo profilyje 29,5 %, mažiausias Z tipo 16,5 %.



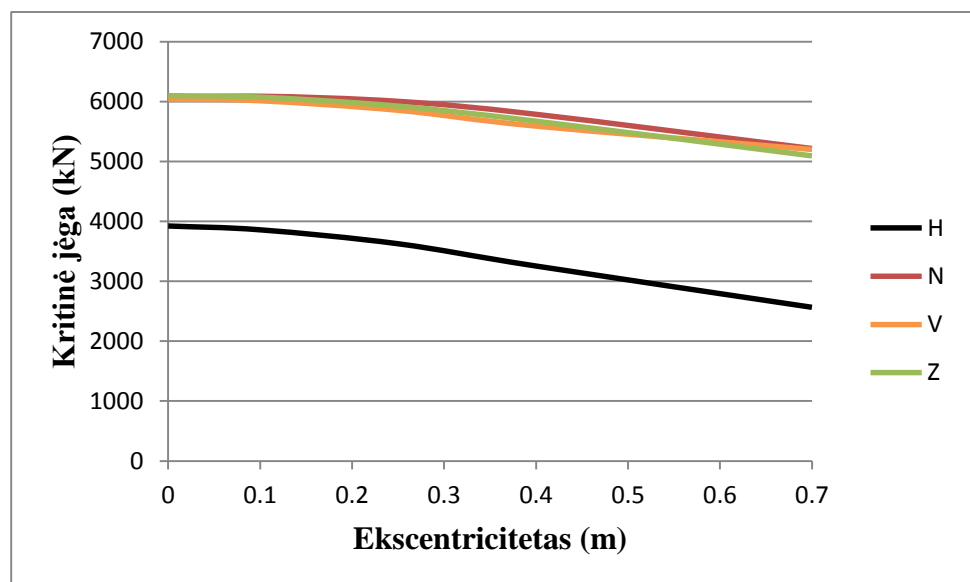
**4.5 pav.** Kritinės jėgos priklausomybė nuo išorinės apkrovos ekscentriciteto, kuris kinta horizontalia kryptimi (žr. 3.1 pav.), N, H, V ir Z tipo tinkliams, kai kolonos aukštis yra 10 m, o ilgis 0,4 m

4.5 pav. pateikiama 10 m aukščio spragotinės kolonos kritinės jėgos priklausomybė nuo ekscentriciteto, kai ekscentriciteto dydis buvo keičiamas horizontalia kryptimi. Lyginant 5 m ir 10 m ilgio spragotinių kolonų duomenys pastebime, kad nors ir kritinė jėga sumažėjo, tačiau išsidėstimas rezultatų labai panašus. N, V ir Z tipo profilių kritinė jėga labai panaši, tačiau 2 kartus didesnė negu H tipo profilio. Lyginant priklausomybę nuo ekscentriciteto N, V ir Z profilių kritinė jėga sumažėja vidutiniškai 21,5 %, o H profilio tik 1,5 %.



**4.6 pav.** Kritinės jėgos priklausomybė nuo išorinės apkrovos ekscentriciteto, kuris kinta vertikalia kryptimi (žr. 3.1 pav.), N, H, V ir Z tipo tinkleliams, kai kolonos aukštis yra 10 m, o ilgis 0,4 m

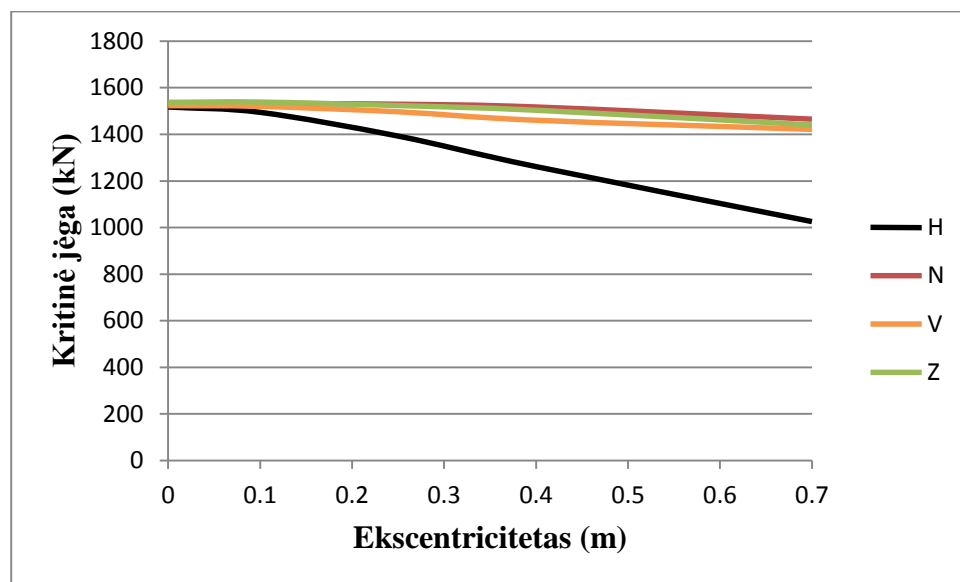
4.6 pav. pateikiama 10 m aukščio spragotinės kolonos kritinės jėgos priklausomybė nuo ekscentriciteto, kai ekscentriciteto dydis buvo keičiamas vertikalia kryptimi. Kai apkrova iš geometrinio kolonos profilio centro perkeliama atstumu 0,7 m didžiausias sumažėjimas pastebimas N, V, Z tipo profilių kritinė jėga vidutiniškai sumažėjo 47 %, o H tipo sumažėjo apie 44 %.



**4.7 pav.** Kritinės jėgos priklausomybė nuo išorinės apkrovos ekscentriciteto, kuris kinta įštryža kryptimi (žr. 3.1 pav.), N, H, V ir Z tipo tinkleliams, kai kolonos aukštis yra 5 m, o ilgis 0,4 m

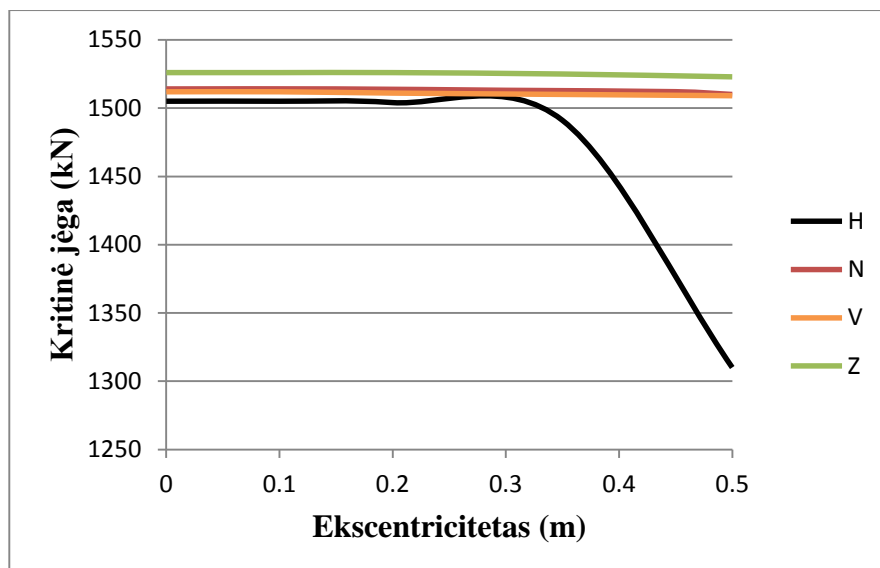
4.7 pav. pateikiama 10 m aukščio spragotinės kolonos kritinės jėgos priklausomybė nuo ekscentriciteto, kai ekscentriciteto dydis buvo keičiamas įštryža kryptimi. Kaip ir prieš tai

buvusiame grafike mes matome, kad N, H, V ir Z profiliuose kritinė apkrova mažėjo didėjant išorinės apkrovos pridėjimo vietasatstumui nuo kolonos centro. Didžiausias kritinės jėgos pokytis gautas H tipo profilyje 34 %, mažiausiai N tipo 14 %. Šiuo atveju kolonų su N, V ir Z tinkleliu kritinės klupdymo jėgos labai panašios (skiriasi tik apie 5%), o kolonos su H tinkleliu kritinė jėga ženkliai mažesnė (apie 30 %).



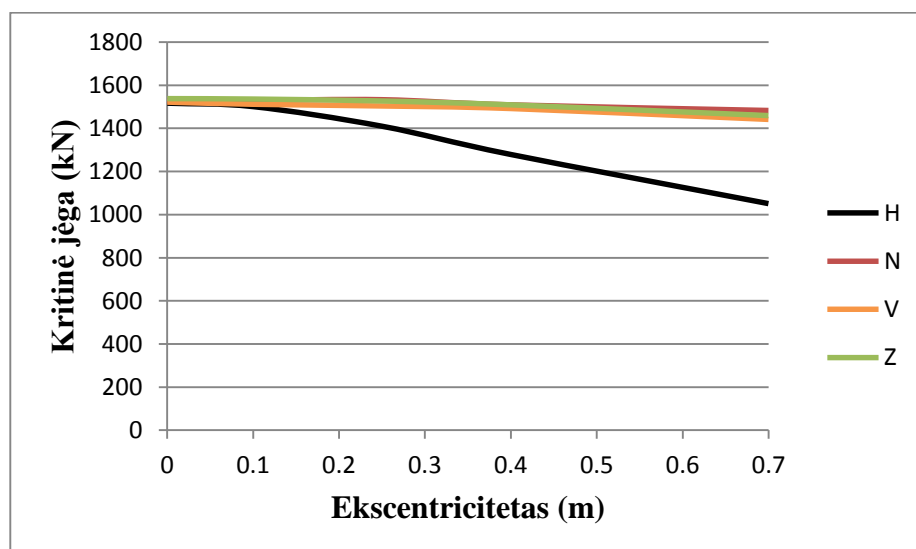
**4.8 pav.** Kritinės jėgos priklausomybė nuo išorinės apkrovos ekscentriciteto, kuris kinta horizontalia kryptimi (žr. 3.1 pav.), N, H, V ir Z tipo tinkleliams, kai kolonos aukštis yra 20 m, o ilgis 0,4 m

4.8 pav. pateikiama 20 m aukščio spragotinės kolonos kritinės jėgos priklausomybė nuo ekscentriciteto, kai ekscentriciteto dydis buvo keičiamas horizontalia kryptimi. Šiuo atveju kai klupdymo apkrova pridėta centriškai H, N, V ir Z profilių kritinės jėgos beveik vienodos, tačiau kinta nevienodai. Daugiausiai kritinė jėga sumažėjo H tipo profilyje apie 32,5 %, o mažiausiai N tipo profilyje apie 4 %.



**4.9 pav.** Kritinės jėgos priklausomybė nuo išorinės apkrovos ekscentriciteto, kuris kinta vertikalia kryptimi (žr. 3.1 pav.), N, H, V ir Z tipo tinkliams, kai kolonos aukštis yra 20 m, o ilgis 0,4 m

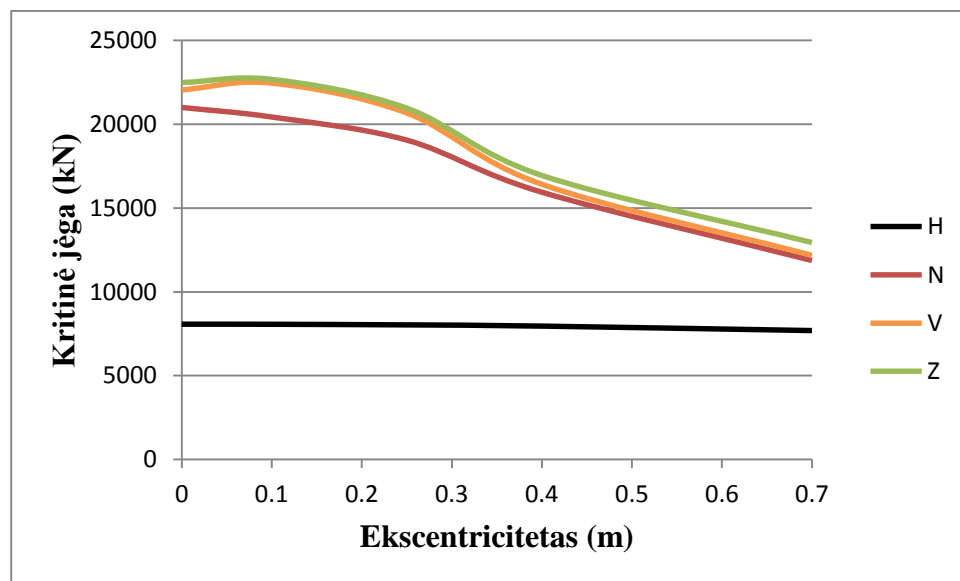
4.9 pav. pateikiama 20 m aukščio spragotinės kolonos kritinės jėgos priklausomybė nuo ekscentriciteto, kai ekscentriciteto dydis buvo keičiamas vertikalia kryptimi. Kai apkrova iš geometrinio kolonos profilio centro perkeliama atstumu 0,5 m didžiausias sumažėjimas pastebimas H tipo profilyje 13 %, o mažiausias N V ir Z tipo profiliuose vidutiniškai po 0,5 %.



**4.10 pav.** Kritinės jėgos priklausomybė nuo išorinės apkrovos ekscentriciteto, kuris kinta įstrižą kryptimi (žr. 3.1 pav.), N, H, V ir Z tipo tinkliams, kai kolonos aukštis yra 5 m, o ilgis 0,4 m

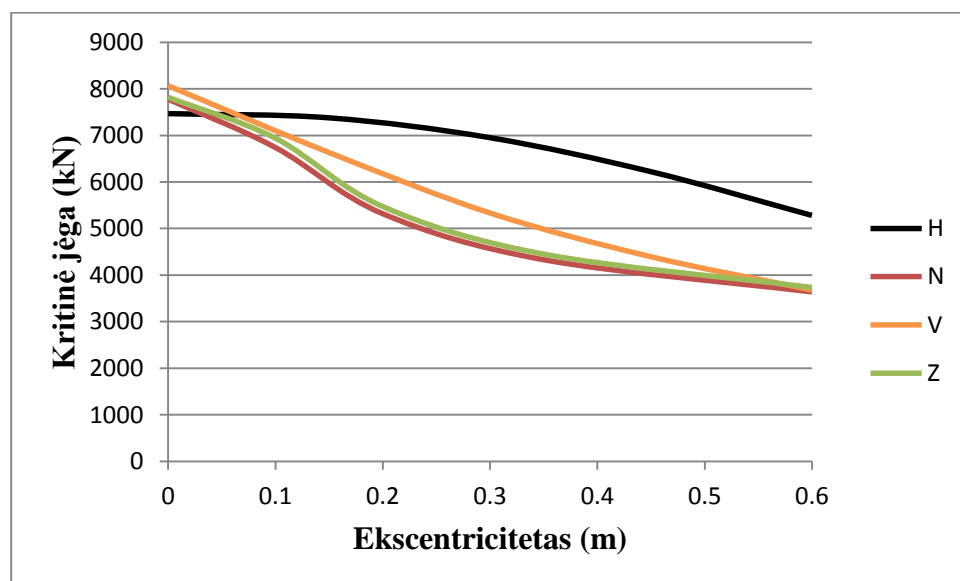
4.10 pav. pateikiama 20 m aukščio spragotinės kolonos kritinės jėgos priklausomybė nuo ekscentriciteto, kai ekscentriciteto dydis buvo keičiamas įstrižą kryptimi. Kai apkrova iš

geometrinio kolonos profilio centro perkeliama atstumu 0,7 m didžiausias sumažėjimas pastebimas sumažėjo H tipo profilyje 30 %, o mažiausiai N tipo profilyje 3 %.



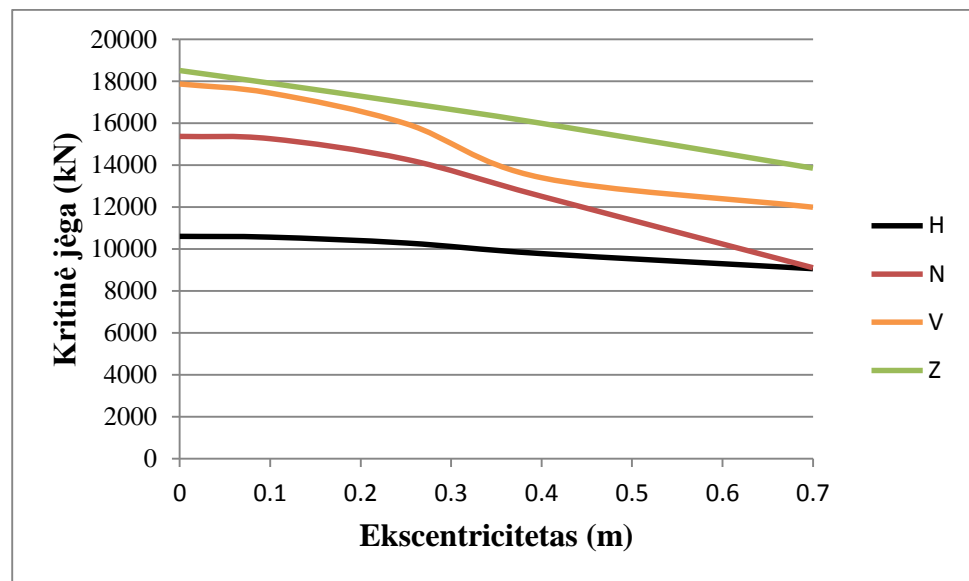
**4.11 pav.** Kritinės jėgos priklausomybė nuo išorinės apkrovos ekscentriciteto, kuris kinta horizontalia kryptimi (žr. 3.1 pav.), N, H, V ir Z tipo tinkliams, kai kolonos aukštis yra 5 m, o ilgis 0,6 m

4.11 pav.pateikiama 5 m aukščio spragotinės kolonos kritinės jėgos priklausomybė nuo ekscentriciteto, kai ekscentriciteto dydis buvo keičiamas horizontalia kryptimi. Lyginant profilių kritines jėgas pastebimas didelis skirtumas. N, V ir Z tipo profilių kritinė jėga panaši, tačiau net 3 kartus didesnė negu H tipo profilio. Lyginant priklausomybę nuo ekscentriciteto V profilio kritinė jėga sumažėja daugiausiai apie 45 %, o H profilio mažiausiai tik 4,5 %.



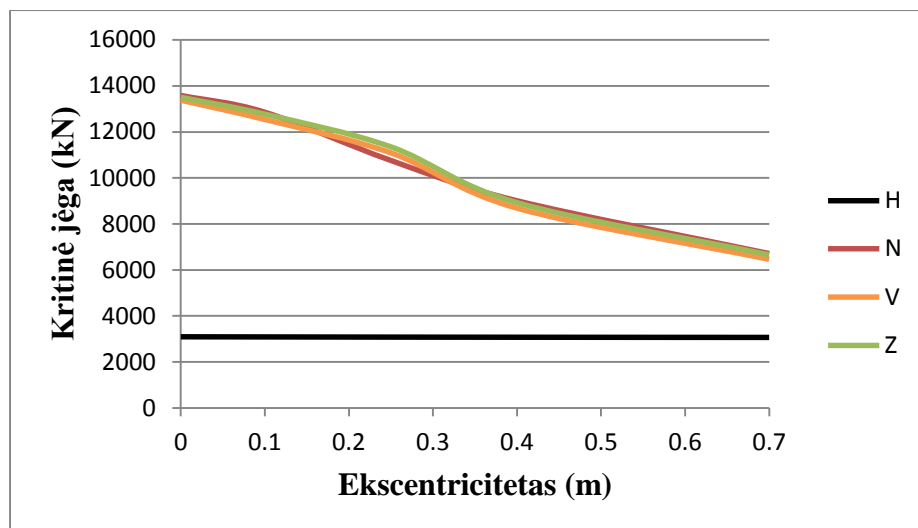
**4.12 pav.** Kritinės jėgos priklausomybė nuo išorinės apkrovos ekscentriciteto, kuris kinta vertikalia kryptimi (žr. 3.1 pav.), N, H, V ir Z tipo tinkleliams, kai kolonos aukštis yra 5 m, o ilgis 0,6 m

4.12 pav. pateikiama 5 m aukščio spragotinės kolonos kritinės jėgos priklausomybė nuo ekscentriciteto, kai ekscentriciteto dydis buvo keičiamas vertikalia kryptimi. Kai apkrova iš geometrinio kolonos profilio centro perkeliama atstumu 0,6 m didžiausias sumažėjimas pastebimas Z tipo profilyje apie 54,5 %, o mažiausias H tipo profilyje apie 29 %.



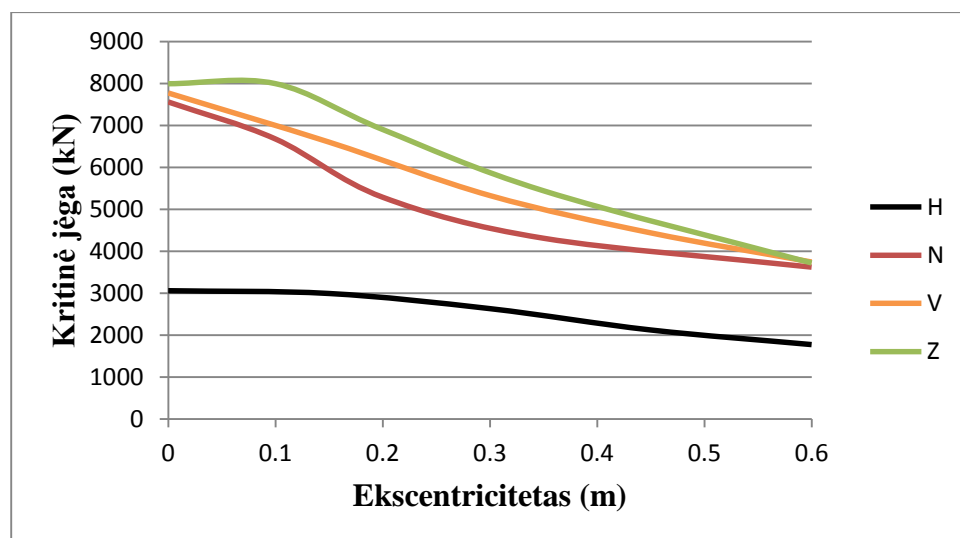
**4.13 pav.** Kritinės jėgos priklausomybė nuo išorinės apkrovos ekscentriciteto, kuris kinta įstrižą kryptimi (žr. 3.1 pav.), N, H, V ir Z tipo tinkleliams, kai kolonos aukštis yra 5 m, o ilgis 0,6 m

4.13 pav. pateikiama 5 m aukščio spragotinės kolonos kritinės jėgos priklausomybė nuo ekscentriciteto, kai ekscentriciteto dydis buvo keičiamas įstrižą kryptimi. Didžiausia kritinė jėga, kai kludymo apkrova pridėta centriškai, pasižymi Z profilis, mažiausia – H profilis. Visų keturių profilių kritinė jėga mažėjo didėjant ekscentricitetui. Daugiausiai sumažėjo N tipo profilyje apie 41 %, o mažiausiai H tipo profilyje apie 14,5 %.



**4.14 pav.** Kritinės jėgos priklausomybė nuo išorinės apkrovos ekscentriciteto, kuris kinta horizontalia kryptimi (žr. 3.1 pav.), N, H, V ir Z tipo tinkleliams, kai kolonos aukštis yra 10 m, o ilgis 0,6 m

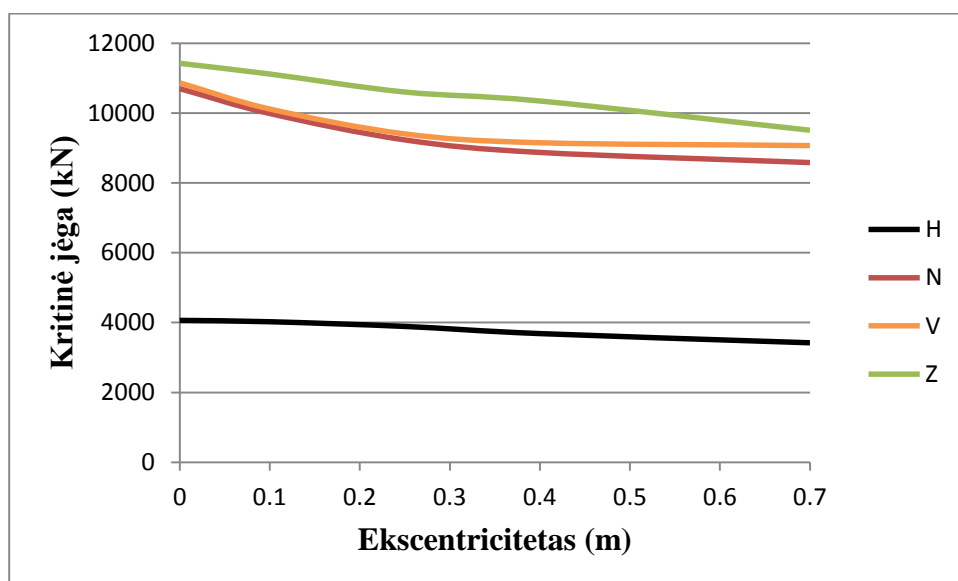
4.14 pav. pateikiama 10 m aukščio spragotinės kolonos kritinės jėgos priklausomybė nuo ekscentriciteto, kai ekscentriciteto dydis buvo keičiamas horizontalia kryptimi. Padidėjus kolonos aukščiui sumažėja kritinė jėga, tačiau priklausomybė nuo ekscentriciteto išlieka. Daugiausiai kritinė jėga sumažėjo N, V ir Z tipo profiliuose vidutiniškai po 51 %, o mažiausiai H tipo profilyje tik 1 %.



**4.15 pav.** Kritinės jėgos priklausomybė nuo išorinės apkrovos ekscentriciteto, kuris kinta vertikalia kryptimi (žr. 3.1 pav.), N, H, V ir Z tipo tinkleliams, kai kolonos aukštis yra 10 m, o ilgis 0,6 m

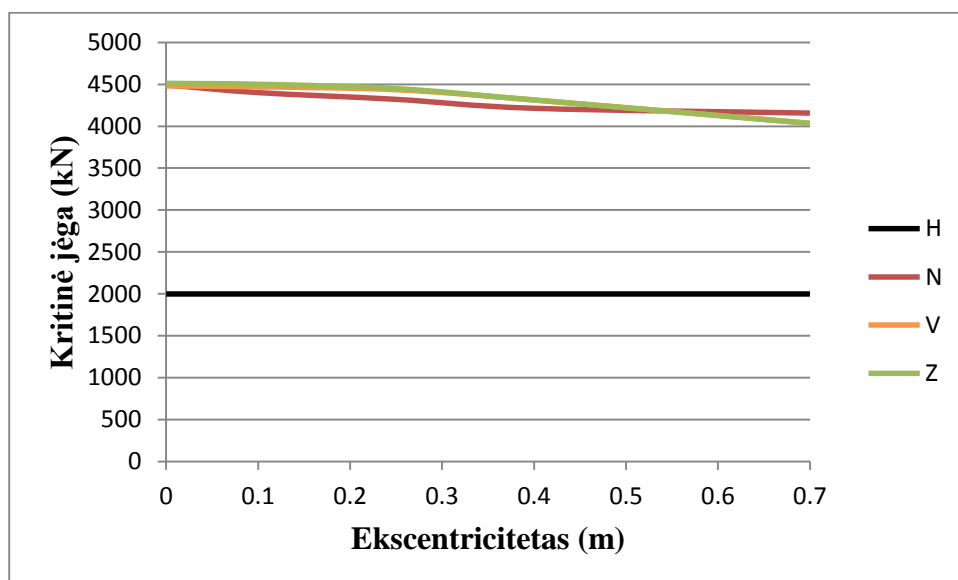
4.15 pav. pateikiama 10 m aukščio spragotinės kolonos kritinės jėgos priklausomybė nuo ekscentriciteto, kai ekscentriciteto dydis buvo keičiamas vertikalia kryptimi. Kai apkrova iš

geometrinio kolonos profilio centro perkeliama atstumu 0,6 m didžiausias sumažėjimas pastebimas N, V ir Z tipo profiliuose vidutiniškai po 52 %, o mažiausiai H tipo profilyje 42 %.



**4.16 pav.** Kritinės jėgos priklausomybė nuo išorinės apkrovos ekscentriciteto, kuris kinta įstryža kryptimi (žr. 3.1 pav.), N, H, V ir Z tipo tinkleliams, kai kolonos aukštis yra 10 m, o ilgis 0,6 m

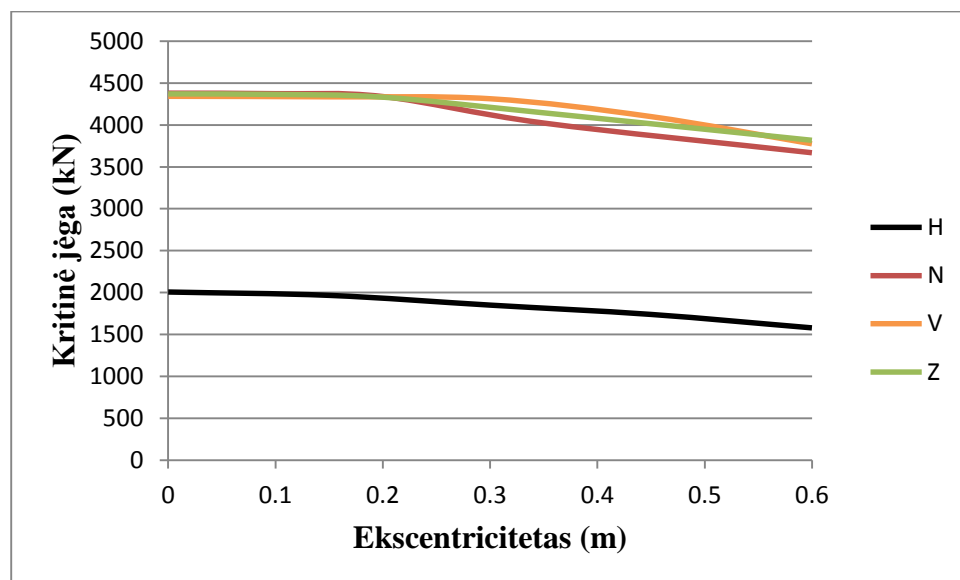
4.15 pav. pateikiama 10 m aukščio spragotinės kolonos kritinės jėgos priklausomybė nuo ekscentriciteto, kai ekscentriciteto dydis buvo keičiamas įstryža kryptimi. Daugiausiai kritinė jėga sumažėjo Z tipo profilyje 17 %, o mažiausiai N V ir H tipo profiliuose vidutiniškai po 16 %.



**4.17 pav.** Kritinės jėgos priklausomybė nuo išorinės apkrovos ekscentriciteto, kuris kinta horizontalia kryptimi (žr. 3.1 pav.), N, H, V ir Z tipo tinkleliams, kai kolonos aukštis yra 20 m, o ilgis 0,6 m

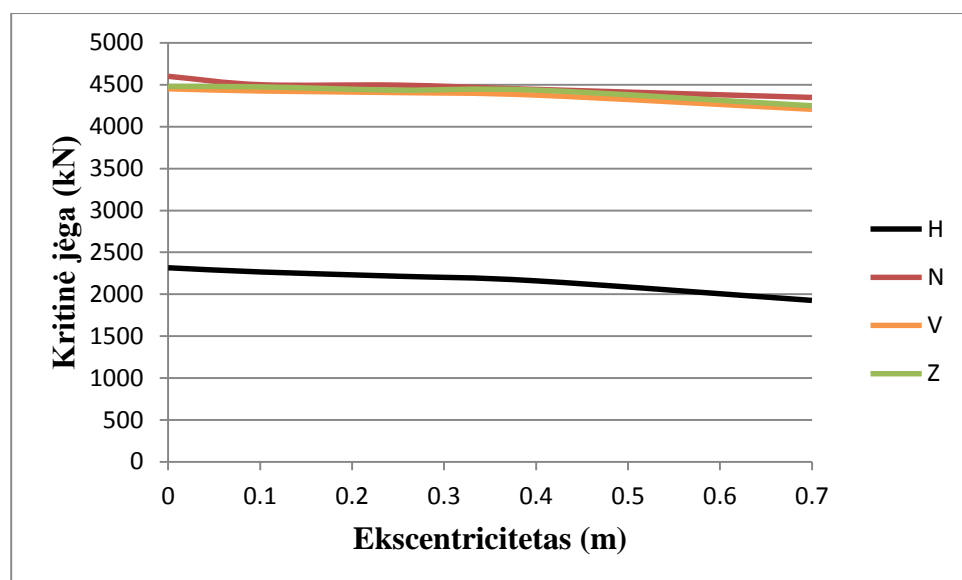


4.17 pav. pateikiama 20 m aukščio spragotinės kolonos kritinės jėgos priklausomybė nuo ekscentriciteto, kai ekscentriciteto dydis buvo keičiamas horizontalia kryptimi. Šiuo atveju N, V ir Z profilių pradinės ir esant didžiausiam ekscentricitetui kritinės jėgos beveik vienodos. Daugiausiai kritinė jėga sumažėjo N, V ir Z tipo profiliuose vidutiniškai po 10 %, H tipo profilyje kritinė jėga nekito.



**4.18 pav.** Kritinės jėgos priklausomybė nuo išorinės apkrovos ekscentriciteto, kuris kinta vertikalia kryptimi (žr. 3.1 pav.), N, H, V ir Z tipo tinkleliams, kai kolonos aukštis yra 20 m, o ilgis 0,6 m

4.18 pav. pateikiama 20 m aukščio spragotinės kolonos kritinės jėgos priklausomybė nuo ekscentriciteto, kai ekscentriciteto dydis buvo keičiamas vertikalia kryptimi. Šiuo atveju kolonų su N, V ir Z tinkleliu kritinės kludymo jėgos labai panašios, skiriasi tik apie 8%. Daugiausiai kritinė jėga sumažėjo H tipo profilyje apie 20 %, o mažiausiai Z tipo profilyje 15 %.



**4.19 pav.** Kritinės jėgos priklausomybė nuo išorinės apkrovos ekscentriciteto, kuris kinta įstryža kryptimi (žr. 3.1 pav.), N, H, V ir Z tipo tinkleiams, kai kolonos aukštis yra 20 m, o ilgis 0,6 m

4.19 pav. pateikiama 20 m aukščio spragotinės kolonos kritinės jėgos priklausomybė nuo ekscentriciteto, kai ekscentriciteto dydis buvo keičiamas įstryža kryptimi. Kai apkrova iš geometrinio kolonos profilio centro perkeliama atstumu 0,7 m didžiausias sumažėjimas pastebimas H tipo profilyje 17 %, o mažiausias N, V ir Z tipo profiliuose vidutiniškai po 5,5 %.

## Išvados

1. Nustatant apkrovos nesimetriškumo įtaką, ekscentriciteto dydis buvo keičiamas trimis kryptimis. Palyginus rezultatus paaiškėjo, jog pavojingiausia kai ekscentriciteto dydis keičiamas vertikalia kryptimi.

2. Rezultatai parodė, jog visų tinklelių kritinė jėga mažėja didėjant apkrovos ekscentricitetui. Tyrimo metu nustatyta, kad Z tipo tinklelio spragotinė kolona yra atspariausia klupdymui. Tokio tipo tinklelis turėjo didžiausią kritinę jėgą nesvarbu, kokia kryptimi buvo keičiamas ekscentriciteto dydis. Tačiau N tipo tinklelis yra mažiausiai „jautrus“ apkrovos ekscentriškumui. Taip pat nustatyta, kad konstrukcijos savojo svorio galima nevertinti, nes su savoju svoriu kritinė jėga visiems tinklelio tipams sumažėja tik apie 2 %.

3. Nustatant geometrinių parametrų įtaką spragotinių kolonų klupdymui, pagrindiniai kriterijai buvo spragotinės kolonos profilių aukštis ir ilgis. Nustatyta, kad didėjant dvitėjo profilio aukščiui mažėja kritinė jėga. Padidinus aukštį 2 kartus, kritinė jėga vidutiniškai sumažėdavo apie 4 kartus, nesvarbu, koks būtų tinklelio tipas. Rezultatai parodė, jog didinant dvitėjinio profilio ilgį, iš kurio sudaryta spragotinė kolona, padidėjo kritinė jėga. Padidinus ilgį nustatyta, kad Z tipo tinklelio kritinė jėga padidėja daugiausia, H tipo - mažiausiai.

## Literatūros šaltiniai

1. Aghoury, M.A.; Salem, A.H.; Hanna, M.T.; Amoush, E.A. 2010. Experimental investigation for the behaviour of battened beam-columns composed of four equal slender angles, *Thin-Walled Structures* 48: 669–683.
2. Bendikas, J. 2003. Suvirintos konstrukcijos. Skaičiavimas ir projektavimas. Mokomoji knyga. Vilnius: Technika.
3. Duan, L.; Reno, M.; Uang, Ch-M. 2002. Effect of compound buckling on compression strength of built-up members, *Engineering Journal* 39: 30–37.
4. Elmandy, G.M. 1997. Buckling of built-up columns. *Electronic Theses and Dissertations*.
5. Eurokodas 3. *Plieninių konstrukcijų projektavimas. 1-1 dalis. Bendrosios ir pastatų taisyklės* [Eurocode 3. Design of Steel Structures. Part 1.1: General Rules and Rules for Buildings]. 102 p.
6. Guo, Y.; Wang, J. 2009. Instability behavior and application of prismatic multi-tube latticed steel column, *Journal of Constructional Steel Research* 65: 12–22.
7. Hashemi, B. H.; Jafari, M. A. 2009. Experimental evaluation of elastic critical load in batten columns, *Journal of Constructional Steel Research* 65: 125–131.
8. Kalochairetis, K. E.; Gantes, C. J. 2011. Numerical and analytical investigation of collapse loads of laced built-up columns, *Computers and Structures* 89: 1166–1176.
9. Metalo gaminių techninės charakteristikos [interaktyvus] 2015. [Žiūrėta 2015 m. gruodžio 14 d. Prieiga per internetą :<http://www.b2bmetal.eu/metalo-gaminiai-metalo-gaminiu-technines-charakteristikos>
10. Paulauskas, J.; Kvedaras A. 1977. Metalinės konstrukcijos. Vilnius: Mokslas
11. Razdolsky, A. G. 2011. Calculation of slenderness ratio for laced columns with serpentine and crosswise lattices, *Journal of Constructional Steel Research* 67: 25–29.

12. Salem, A.H.; Aghoury, M.A.; Halsan, S.K; Amin, A.A. 2004. Post-buckling strength of battened columns built from cold - formed lipped channels, *Emirates Journal for Engineering Research* 9:117–125.
13. Šapalas, V.; Šiaučiuvėnas, G. 2011. Centriškai gniuždomų spragotųjų strypų pastovumas pagal STR ir EC3, *Statybinės konstrukcijos ir technologijos* 4: 150-156.
14. Zaharia R.; Dubina D. 2005. Numerical study of stability of cold formed built-up columns, *Buletinul Institutului Politehnic din Iași. , Construcții, arhitectură* 51: 61–68.
15. Žiliukas A. 2004. *Medžiagų mechanika*. Kaunas: Technologija.