



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

PANEVĖŽIO INSTITUTAS

TECHNOLOGIJŲ FAKULTETAS

Rytis Kiselis

**KLUPDOMO SANDŪRINIO SUVIRINTO SUJUNGIMO SU V
FORMOS SIŪLE ATSPARUMO TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Doc. dr. Dainius Vaičiulis

PANEVĖŽYS, 2015

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

**PANEVĖŽIO INSTITUTAS
TECHNOLOGIJŲ FAKULTETAS**

TVIRTINU
Katedros vedėjas
(parašas) Doc. dr. Arūnas Tautkus
(data)

**KLUPDOMO SANDŪRINIO SUVIRINTO SUJUNGIMO SU V
FORMOS SIŪLE ATSPARUMO TYRIMAS**

Magistro baigiamasis darbas

Vadovas
(parašas) Doc. dr. Dainius Vaičiulis
(data)

Recenzentas
(parašas) _____
(data)

Projektą atliko
(parašas) PMM-3 gr. stud. Rytis Kiselis
(data)

PANEVĖŽYS, 2015

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
TECHNOLOGIJŲ FAKULTETAS

(Fakultetas)

Rytis Kiselis

(Studento vardas, pavardė)

Mechanikos inžinerijos, 621H30001

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „KLUPDOMO SANDŪRINIO SUVIRINTO SUJUNGIMO SU V FORMOS
SIŪLE ATSPARUMO TYRIMAS“
AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 15 m. birželio 01 d.
Panevėžys

Patvirtinu, kad mano **Ryčio Kiselio** baigiamasis projektas tema „KLUPDOMO SANDŪRINIO SUVIRINTO SUJUNGIMO SU V FORMOS SIŪLE 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)

TVIRTINU:

KTU Panevėžio technologijų ir verslo fakulteto

Technologijų katedros vedėjas

Arūnas Tautkus

2015 - -

BAIGIAMOJO PROJEKTO UŽDUOTIS

Išduota studentui: Ryčiui Kiseliui

Grupė PMM-3

1. Darbo tema:

Lietuvių kalba: *Sandūrinio suvirintojo sujungimo su V formos siūle atsparumo klūpdymui tyrimas*

Anglų kalba: *Investigation of the buckling strength of butt welded joint with a V-shaped weld*

Patvirtinta 2015 m. vasario mėn. 13 d. dekanu potvarkiu Nr. ST17-F-13-11.

2. Darbo tikslas:

Ištirti kaip kritinė klūpdyimo jėgas priklauso nuo suvirintų lakštų geometrinių ir mechaninių parametrų.

3. Reikalavimai ir sąlygos:

Tirti plokščių deformacijų būvį esant tampriam deformavimui. Įvertinti siūlės rumbelių įtaką.

4. Projekto struktūra.

Turinys konkretizuojamas kartu su vadovu, atsižvelgiant į BBP pobūdį.

Literatūros apžvalga, Tiriamoji dalis, Išvados ir Literatūros sąrašas.

5. Ši užduotis yra neatskiriama bakalauro baigiamojo projekto dalis.

6. Projekto pateikimo gynimui kvalifikacinėje komisijoje terminas

2015-06-01

(data)

Užduotį gavau:

Rytis Kiselis

(studento vardas, pavardė, parašas)

2015-02-10

(data)

Vadovas:

doc. Dainius Vaičiulis

(pareigos, vardas, pavardė, parašas)

2015 m. vasaris

(data)

Kiselis R., Kludomo sandūrinio suvirinto sujungimo su V formos siūle atsparumo tyrimas. Mechanikos inžinerijos magistro tezės / vadovas doc. dr. D. Vaičiulis; Kauno technologijos universitetas, Panevėžio institutas, Technologijų fakultetas, Mechanikos technologijos katedra.

Panevėžys, 2015, - 64 psl.

SANTRAUKA

Suvirinti sujungimai plačiai naudojami šiuolaikinėse konstrukcijose, kurios veikiant išorės poveikiui gali būti kludomi, todėl yra svarbu nustatyti ar suvirinta konstrukcija nesuklups. Šiame tyrime pateikiama kaip mechaniškai nevienalyčių suvirintų sujungimų kritinė kludymo jėga priklauso nuo geometrinių ir mechaninių sujungimo parametrų. Nurodomas santykinės kritinės jėgos kitimas, keičiant lakšto storį, lakšto galų įtvirtinimo sąlygas, siūlės kampą, pagrindinės ir siūlės tamprumo modulių reikšmes bei siūlės aukštį.

Kiselis R., Buckling welded joint with a V - shaped butt weld, research of stability. Master of Mechanical Engineering Thesis / supervisor doc. dr. Vaičiulis D., Kaunas University of Technology, Institute of Panevėžys, Department of mechanical technology.

Panevėžys, 2015, - 64 p.

SUMMARY

Welded joints are widely use in modern structures, the operation of external influences can be buckling, so it is important to determine whether the design of welded fall. In this study, presented as a slender, mechanically heterogeneous connections critical force of buckling depends on the combination of geometric and mechanical parameters. The relative force of critical transitions, changing the sheet thickness, the sheet ends for attachment, joint angle, main and seam material modulus of elasticity values and the height of the seam.

Turinys

Įvadas	6
1. Literatūros apžvalga	7
1.1. Vienalyčių kūnų klupdymas.....	7
1.2. Suvirinti sujungimai	9
1.3. Klupdymo uždavinio sprendimo metodika BEM.....	9
2. KLUPDOMŲ SANDŪRINIŲ SUVIRINTŲ SUJUNGIMŲ SU V FORMOS SIŪLE ATSPARUMO TYRIMAS	10
2.1. Suvirinto sujungimo klupdymas, kai siūlė yra be rumbelės	13
2.1.1. Kritinės jėgos priklausomybė nuo sujungimo geometrijos.....	13
2.1.2. Kritinės jėgos priklausomybė nuo sujungimo mechaninio nevienalytiškumo ...	22
2.2. Suvirinto sujungimo klupdymas, kai siūlė yra su rumbele	34
2.2.1. Kritinės jėgos priklausomybė nuo sujungimo geometrijos.....	35
2.2.2. Kritinės jėgos priklausomybė nuo sujungimo mechaninio nevienalytiškumo ...	48
IŠVADOS.....	62
LITERATŪRA.....	64

Įvadas

Šiuo metu mašinų gamyboje, metalurgijoje, statyboje, laivų pramonėje plačiai taikomi suvirintieji sujungimai, kurie esant tam tikroms eksploatavimo sąlygoms gali būti gniūždomi ir prarasti pusiausvyros padėtį. Konstrukcijos pusiausvyra turi būti stabili. Stabilumas – konstrukcijos savybė išlaikyti pradinę pusiausvyros formą, t.y. gebėjimas po bet kokių trikdžių grįžti į pradinį būvį. Kai pusiausvyros forma nestabili, deformuotas elementas į pradinę pusiausvyros formą nebegrįžta [1].

Suvirinimas yra detalių neišardomo sujungimo technologinis procesas. Pramonėje suvirinimas plačiai taikomas gaminant ir remontuojant įvairias detales ir konstrukcijas. Kartais būtina patikrinti ar ne per mažas suvirintojo elemento liaunumas. Todėl reikia ištirti kokią įtaką suvirinto elemento stabilumui turi siūlės geometrija bei mechanines charakteristikos [1].

Magistro tezių tyrimų tikslai: Nustatyti kluddomo, mechaniškai nevienalyčio, sandūrinio suvirinto sujungimo su V formos siūle atsparumo priklausomybę:

- Nuo siūlės kampo α ;
- Nuo metalų tamprumo modulio santykio γ ;
- Nuo metalinio lakšto storio h ;
- Nuo vidutinio santykinio siūlės aukščio k ;
- Nuo kluddomo metalio lakšto įtvitinimo tipo μ ;

Tyrimo metodika. Mechaniškai nevienalyčio ir vienalyčio suvirintojo sujungimo kritinė jėga nustatyta panaudojus SolidWorks Simulation programinį paketą esant plokščiajai deformacijai.

Darbo aprobavimas ir publikacijos. Darbo tema buvo išdėstyta ir aptarta KTU Panevėžio instituto Technologijų fakulteto SMD konferencijų metu. Pranešimo tema:

- „Kluddomo sandūrinio suvirinto sujungimo su V formos siūle atsparumo tyrimas“, Panevėžys, 2015, balandžio 24 d.

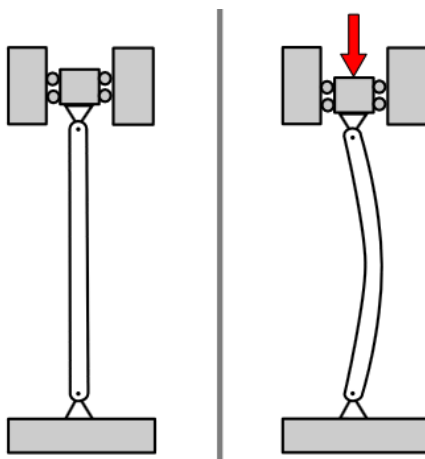
Darbo apimtis ir struktūra. Magistro tezes sudaro įvadas, du skyriai, išvados, literatūros sąrašas ir darbo santrauka lietuvių ir anglų kalbomis. Darbo apimtis 64 psl., kuriuose yra 76 iliustracijų.

1. LITERATŪROS APŽVALGA

1.1. Vienalyčių kūnų klūpdyimas

Konstrukcijos elemento pusiausvyra būna stabili, kol jo pagrindinė apkrova nedidelė, kol ji mažesnė už tam tikrą (kritinę) reikšmę, o kai apkrova viršija tą reikšmę, pusiausvyra tampa nestabili — tada pašalinė priežastis gali lengvai išvesti elementą iš šios nestabilios pusiausvyros į kitokią (jau stabilią) pusiausvyros formą ir sukelti nepageidaujamą deformavimąsi. Maža tikimybė, kad elementas pradinės pusiausvyros formos nepraras, tėra ir tuo atveju, kai pusiausvyra neutrali, t.y. kai apkrova yra pasiekusi kritinę reikšmę, bet dar neviršijusi jos [1].

Kai gniuždomoji jėga yra pasiekusi tam tikrą didumą, strypo pradinė (tiesioji) pusiausvyros forma yra neutrali, o kai ta jėga dar didesnė, pusiausvyros forma tampa nebestabili. Taip apkrautas strypas, ėmęs dėl kokio trikdymo linkti, įgyja vis didesnius ir didesnius skersinius poslinkius ir nebeišsitiesia net ir tada, kai pašalinio trikdymo nebėra, kai išnyksta skersinių poslinkių priežastis. Strypas pereina į kitokią stabilią pusiausvyros formą: jėga, veikusi išilgai strypo ašies, ima strypą ne tik gniuždyti, bet jau ir lenkti.

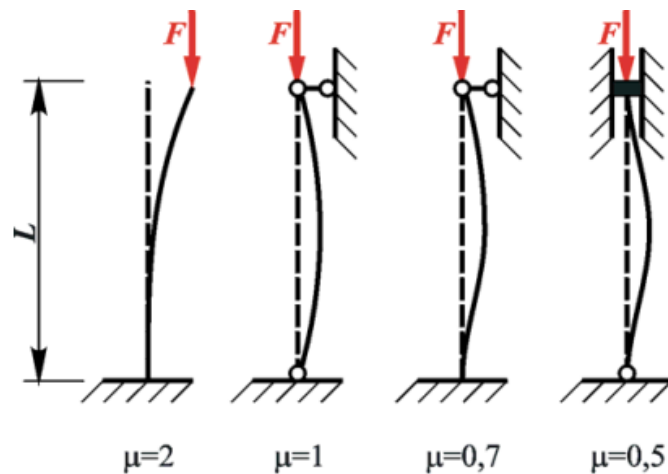


1.1 pav. Stypo klūpdomojo pobūdžio deformacija veikiant ašinei apkrovai [2]

Tamprus tiesaus centriškai gniuždomo strypo kritinės jėgos didumas apskaičiuojamas vadinamąja Oilerio formule [2]:

$$F_{kr} = \frac{\pi^2 EI_{\min}}{(\mu L)^2}; \quad (1.1)$$

F_{kr} – maksimali kritinė jėga (stypą veikianti vertikali apkrova),
 E — strypo medžiagos tamprumo modulis,
 I_{min} — minimalus strypo skerspjūvio inercijos momentas,
 L — strypo ilgis,
 μ — strypo galų įtvirtinimo sąlygų koeficientas (žr. 1.2 pav.)



1.2 pav. Centriškai gniuždomo strypo įtvirtinimo sąlygos [3]

Bet kurio klupdomo strypo kritinė jėga priklauso tikrai nuo strypo matmenų, įtvirtinimo būdo ir medžiagos savybių. Centriškai gniuždomo tiesaus strypo pusiausvyros forma yra stabili, kol jėga nepasiekia kritinės jėgos reikšmės F_{kr} , t. y. kol $F < F_{kr}$. Toks strypas yra tik gniuždomas. Kai jėga viršija F_{kr} , tiesioji pusiausvyros forma netenka stabilumo, strypas dėl menkiausios priežasties pereina į kitokią pusiausvyrą (jau ne tik gniuždomas, bet ir lenkiamas). Sakoma, kad jis suklumpa, kad apkrova jį klupdo. Todėl ir pats deformavimas, lydymas suklupimo pavojaus, dažnai nagrinėjamas kaip klupdymas, kalbama apie klupdomų strypų (kolonų) skaičiavimą ir pan. Nauja pusiausvyros forma, į kurią pereina konstrukcija, dažnai būna susijusi su tokiomis deformacijomis ir įrašomis, kurioms priešintis konstrukcija nepritaikyta. Todėl konstrukcijos deformacijos ir įtempimai ima sparčiai didėti, konstrukcija greit suyra arba kitaip išsena iš rikiuotės [3].

1.2. Suvirinti sujungimai

Metalinių konstrukcijų sujungimas

Svarbiausias uždavinys, su kuriuo tenka susidurti gamybos technologams yra metalinių konstrukcijos detalių briaunų sujungimas (sudūrimas). Šiuo atveju išskiriame:

- rankinį sujungimą, sujungimą jungtimis, sujungimą „karštuoju „prisodinimu“;
- neišardomąjį sujungimą suvirinimu, litavimu, sujungimą kniedėmis, falcavimą.

Detalių briaunų sujungimas suvirinant, lituojant ir panaudojant kniedes ženkliai skiriasi. Suvirinimas yra toks medžiagų sujungimo ir apsauginių paviršių sukūrimo būdas, kuris atliekamas, panaudojant šilumą ar mechaninį poveikį. Sujungimo zonoje medžiaga išsilydo ir patiria plastinę deformaciją.

Litavimas – tai terminis būdas, kuriuo sukuriamas neišardomas medžiagos sujungimas ir padaromas apsauginis sluoksnis. Jo atlikimo metu panaudojamas lydysis lydmetalis. Šiam procesui būdinga yra tai, kad jo metu pagrindinė medžiaga nesilydo bei – nesideformuoja. Sujungimo zonoje pagrindinė medžiaga sujungiama išlydytu pagalbiniu metalu. Sujungimą sukuria pagrindinio materialo bei lydyto metalo dalelių difuzija [4].

Gniuždomos ir tempiamos sandūrinės jungtys

Statybines konstrukcijas reikia paskaičiuoti jėgoms, veikiant kurioms ta konstrukcija dar tenkina reikalaujamus eksploatacinius reikalavimus. Lenkiamų, gniuždomų, tempiamų sandūrinių jungčių, suvirintų automatinu, pusiau automatinu arba rankiniu būdu ir kai naudojami fizikiniai kontrolės metodai, skaičiuojamasis atsparumas parenkamas lygiu pagrindinio metalo skaičiuojamajam atsparumui, kuris nustatomas pagal metalo stiprumo ribą arba atitinkamai pagal takumo ribą.

Mašinų gamybos konstrukcijos ir jungtys skaičiuojamos pagal leistinus įtempimus, kurie priklauso nuo:

- metalo savybių (kuo geresnės mechaninės savybės, tuo didesni leistini įtempimai).
- skaičiavimo tikslumo (kuo tiksliau paskaičiuojamas konstrukcijos stiprumas ir kuo tiksliau įvertinamos konstrukciją veikiančios apkrovos, tuo mažesnis stiprumo atsargos koeficientas ir todėl didesni leistini įtempimai).
- apkrovų rūšies (tempimas, gniuždymas, lenkimas, kirpimas).
- technologinio proceso kokybės (ypač nustatant leistinus įtempimus suvirintuose jungtyse).
- apkrovų pobūdžio (esant kintamoms apkrovoms leistini įtempimai sumažėja lyginant su statinėm).

Toliau pateikti stiprumo skaičiavimo metodai įvertina laikančiąją galią, t.y. leistinuosius įtempius projektuojamose konstrukcijose ir jungtyse, neatsižvelgiant į įtempių pasiskirstymą. Projektuotojas naudojami supaprastinta įtempimų būsenos schema, kuri neįvertina

įtempių koncentracijos. Konstrukcijos laikančioji galia nustatoma pagal ardančiuosius įtempius σ_B ir stiprumo atsargos koeficientą k_{stip} arba pagal σ_T įtempius, iššaukiančius metalo takumą ir takumo atsargos koeficientą k_{tak} , kuris yra mažesnis nei k_{stip} . Gilesnė įtemptų būsenų analizė ir įtempių koncentracijos koeficientų nustatymas vykdomas remiantis tamprumo ir plastiškumo teorijomis. Tokie įtempių nustatymo būdai būtini įvertinant konstrukcijas apkraunamas kintančiomis apkrovomis, nustatant plyšių plitimo sąlygas, naudojant irimo mechanikos kriterijus, taip pat įvertinant savuosius įtempius, atsiradusius suvirinimo proceso metu [5].

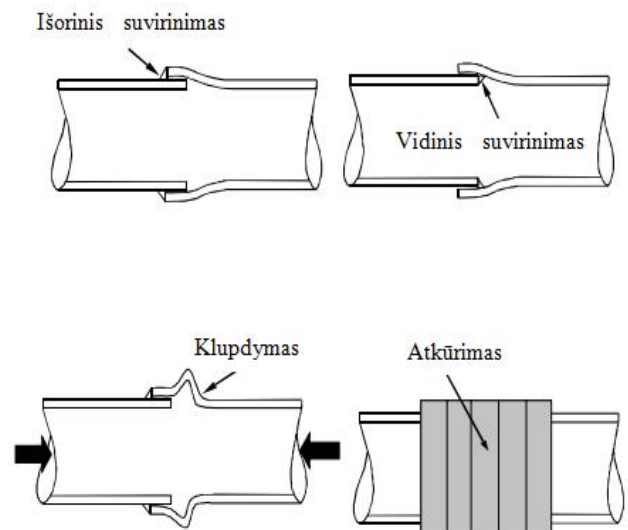
Suvirintų sujungimų vamzdžiuose projektavimas, veikiant gniuždomajai apkrovai

Plieniniai vamzdžiai, kurie naudojami daugelyje aukšto slėgio vandens paskirstymo sistemose yra imlūs dideliems įtempimams ir klupdymui. Paplitęs būdas sujungti dalis yra suvirinti sujungimo vietą, kurioje žiedinis bortelis taikomas, kai vienas varpo formos vamzdžio galas iš dalies sutampa gretimui kitu. Šie suvirinti sujungimai yra linkę vietiniam klupdymui, veikiant gniuždymo apkrovai. Suvirinti sujungimai gali suklypti prie apkrovos, kuri yra tik apie 50% teorinės jėgos esant tiesiam vamzdžiui. Šiame darbe aprašomas išsamus tyrimas dėl stiprumo ir elastingumo charakteristikų, suvirintų sujungimų plieniniams vamzdžiams esant gniuždymo apkrovai [7].

Dalis analizės įvairiems geometrinės formos sujungimams ir tiesioms vamzdžio dalims buvo atliekama naudojant BEM įrangos paketą ABAQUS. Analizės rezultatai palankūs eksperimentiniams rezultatams.



(a)



(b)

1.5 pav. Nepakankamo liaunumo suvirintas vamzdis: a) 1245 mm vamzdžio skersmens suvirinto sujungimo avarija; b) plieninių vamzdžių suvirintų sujungimų diagramos [7]

Šiame (1.3 pav.) pavaizduota suvirinto sujungimo avarija Granados magistralėje, 1245 mm skersmens plieninis vamzdis ir 6,4 mm sienelės storis, sutrūko Nortridžo žemės drebėjimo metu. Panaši avarija įvyko magistralėje 1971 metais, San Fernando žemės drebėjimo metu. Vamzdžio geometriniai parametrai – 1727 mm skersmens ir 9,5 mm sienelės storio vamzdis.

1.3 Kludymo uždavinio sprendimo metodika BEM

Norint išspręsti kludymo uždavinį turime išspręsti lygtį [6]:

$$([K_0] + \lambda[K_\sigma])d\{\delta\} = 0; \quad (2.4)$$

čia: $[K_0] = \int_v [B_0]^T [D][B_0] dV$ - paprastoji standumo matrica esant mažoms deformacijoms;

λ - jėgos daugiklis;

$[K_\sigma] = \int_v [G]^T [S][G] dV$ - geometrinė matrica;

$d\{\delta\}$ - savosios formos vektorius;

Norint apskaičiuoti standumo matricą $[K_0]$ reikia žinoti deformavimo matricą $[B_0]$ ir medžiagos tamprumo parametrų matricą $[D]$, kuri priklauso nuo Puasono koeficiento ν ir tamprumo modulių E . Pastarosios apskaičiuojamos taip:

$$[B_0] = B(x) = [\Delta(x)]^T [N(x)] \quad (2.5)$$

čia: $x = [x, y, z]^T$ - koordinačių vektorius, kur x, y, z taško, priklausančio elementui koordinatės;

Δ - diferencialinis operatorius;

$[N(x)]$ - formos funkcijų matrica, elementas turi tiek formos funkcijų kiek mazgų.

$$D = \frac{E}{1+\nu} \begin{bmatrix} \frac{1-\nu}{1-2\nu} & \frac{\nu}{1-2\nu} & \frac{\nu}{1-2\nu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{1-2\nu} & \frac{1-\nu}{1-2\nu} & \frac{\nu}{1-2\nu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1-\nu}{1-2\nu} & \frac{\nu}{1-2\nu} & \frac{1-\nu}{1-2\nu} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

čia: medžiagos standumo parametrų matrica, kuri priklauso nuo Puasono koeficiento ν ir tamprumo modulių E [8].

Norint apskaičiuoti geometrinę matricą $[K_s]$ reikia žinoti standumo matricą $[G]$ ir įtempimų tenzorių $[S]$. Pastarosios apskaičiuojamos taip:

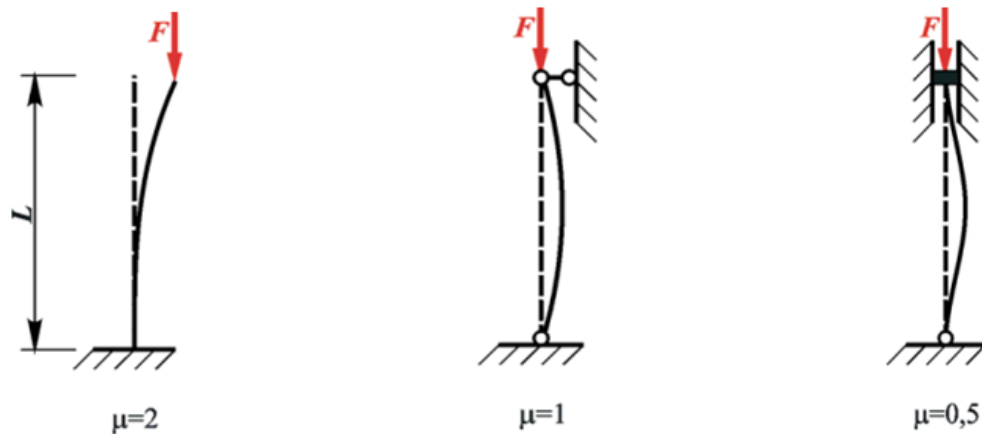
$$G = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \dots & \frac{\partial N_z}{\partial x} \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \dots & \frac{\partial N_z}{\partial y} \\ \frac{\partial N_1}{\partial z} & \frac{\partial N_2}{\partial z} & \dots & \frac{\partial N_z}{\partial z} \end{bmatrix}$$

čia: standumo matrica, kur N yra formos funkcija; z – elemento mazgų skaičius

$$G = \begin{bmatrix} \sigma_x & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} & \sigma_y & \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} & \sigma_{yz} & \sigma_z \end{bmatrix} - \text{įtempimų tenzorius;}$$

2. KLUPDOMŲ SANDŪRINIŲ SUVIRINTŲ SUJUNGIMŲ SU V FORMOS SIŪLE ATSPARUMO TYRIMAS

Tyrime naudojamos metalinio lakšto galų įtvirtinimo sąlygos ir jų koeficientai, pateikiami (2.1 pav.). Nevienalytėms konstrukcijoms kritinė jėga dažniausiai nustatoma baiginių elementų metodu (BEM) [6].



2.1 pav. Tyrime naudotos plokštės galų įtvirtinimo sąlygos [3]

Šiame skyriuje pateikiama kaip santykinė kritinė jėga priklauso nuo geometrinių parametrų ir sujungimo mechaninio nevienalytiškumo. Santykinė kritinė jėga:

$$F_{kr} = \frac{F_{kr}^{BEM}}{F_{kr}^{vm}}; \quad (2.1)$$

Priklauso nuo siūlės kampo ir pagrindinės, bei siūlės medžiagų tamprumo modulių santykio (toliau vadinamu – mechaniniu nevienalytiškumu)

$$\gamma = \frac{E_p}{E_s}; \quad (2.2)$$

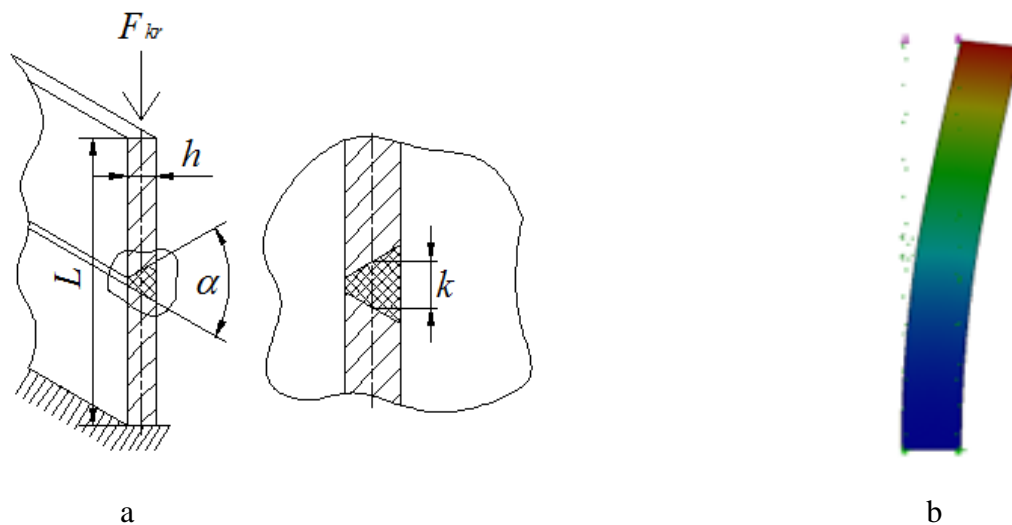
Ir santykinio vidutinio siūlės aukščio

$$\kappa = \frac{k}{h} = 0,2 \div 1,2; \quad (2.3)$$

čia: F_{kr}^{BEM} – mechaniškai nevienalyčio suvirintojo sujungimo kritinė jėga, apskaičiuota BEM; F_{kr}^{ym} – mechaniškai vienalyčio suvirintojo sujungimo (t.y. siūlės ir pagrindinio metalo medžiagų mechaninės charakteristikos yra vienodos), kurio geometrija tokia pat kaip ir nevienalyčio suvirintojo sujungimo, kritinė jėga, apskaičiuota BEM; E_p – pagrindinės medžiagos tamprumo modulis; E_s – siūlės medžiagos tamprumo modulis; κ – vidutinis santykinis siūlės aukštis; h – suvirinto sujungimo plotis (lakšto plotis).

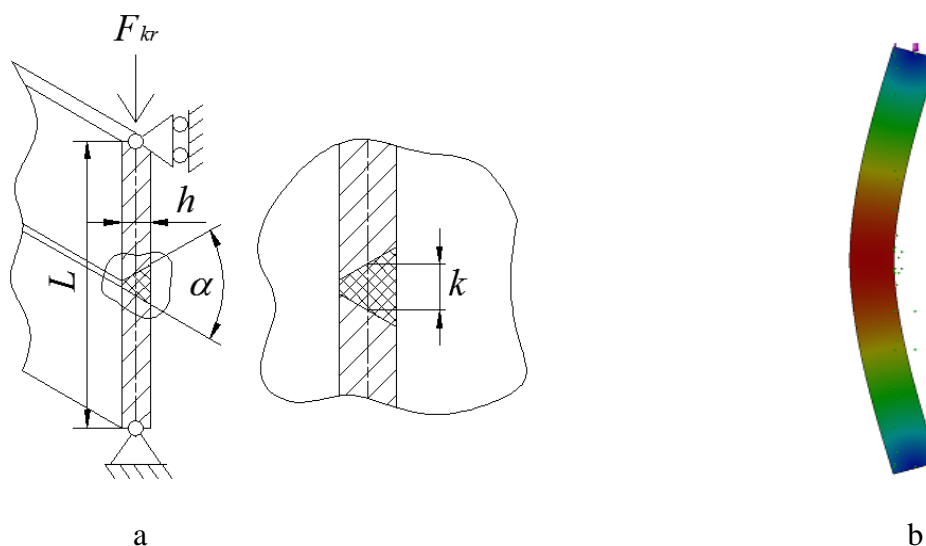
Nevienalyčio ir vienalyčio suvirinto sujungimo kritinė jėga buvo nustatyta panaudojus SolidWorks Simulation programinį paketą.

Pateikiamos mechaniškai nevienalyčio suvirinto sujungimo skaičiavimo schemas su skirtingomis įtvirtinimo sąlygomis ir po vieną nestabilumo forma.

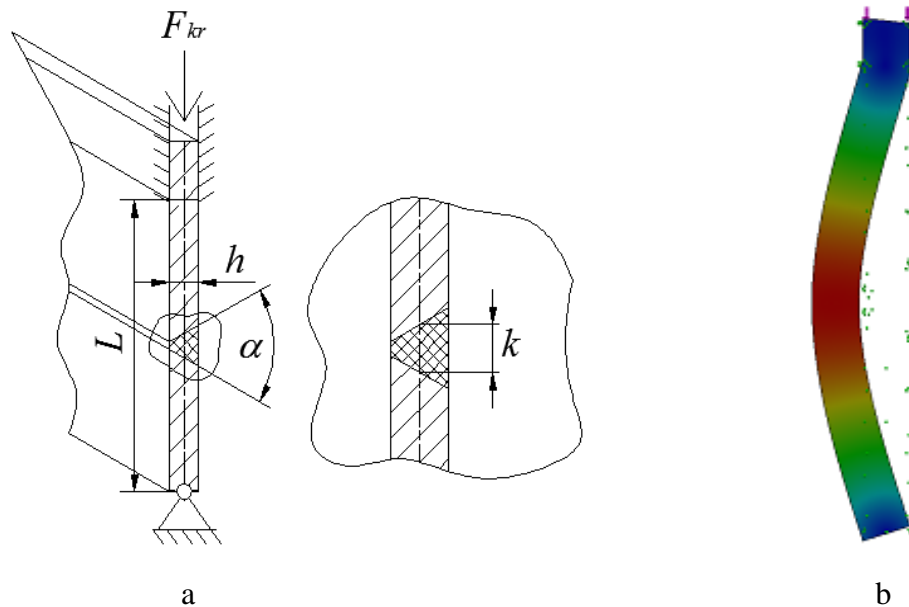


2.2 pav. Mechaniškai nevienalyčio suvirintojo sujungimo be rumbelės skaičiavimo schema (a) ir viena nestabilumo forma (b), kai: $\mu = 2$; $\gamma = 2$; $\kappa = 0,1$; $h = 10$ mm; $L = 100$ mm; $\alpha = 60^\circ$.

Gauta $F_{kr}^{BEM} = 40,62$ kN



2.3 pav. Mechanškai nevienalyčio suvirintojo sujungimo be rumbelės skaičiavimo schema (a) ir viena nestabilumo forma (b), kai: $\mu = 1$; $\gamma = 2$; $\kappa = 0,1$; $h = 10$ mm; $L = 100$ mm; $\alpha = 60^\circ$.
Gauta $F_{kr}^{BEM} = 145,45$ kN



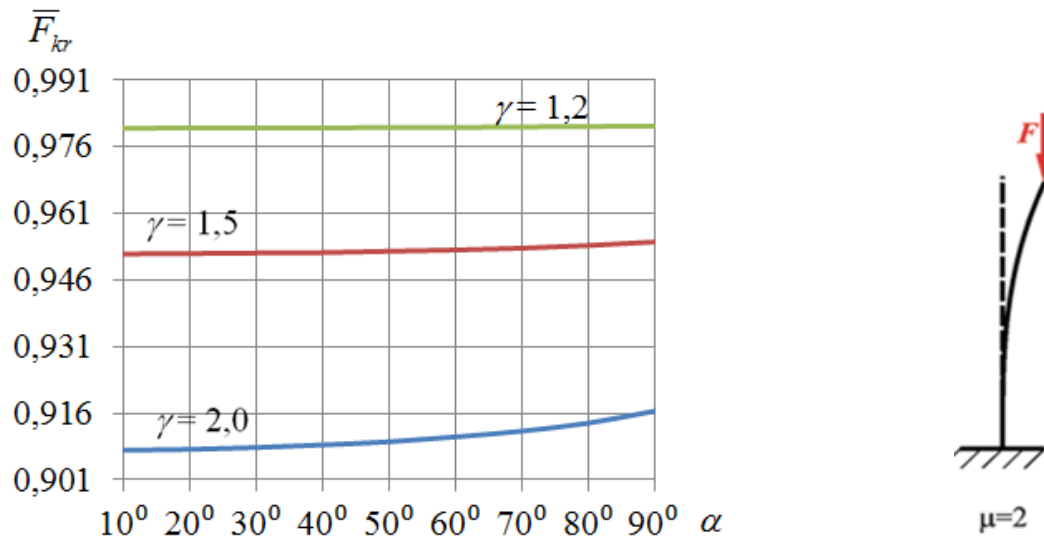
2.4 pav. Mechanškai nevienalyčio suvirintojo sujungimo be rumbelės skaičiavimo schema (a) ir viena nestabilumo forma (b), kai: $\mu = 0,5$; $\gamma = 2$; $\kappa = 0,1$; $h = 10$ mm; $L = 100$ mm; $\alpha = 60^\circ$.
Gauta $F_{kr}^{BEM} = 162,79$ kN

2.1. Suvirinto sujungimo klupdymas, kai siūlė yra be rumbelės

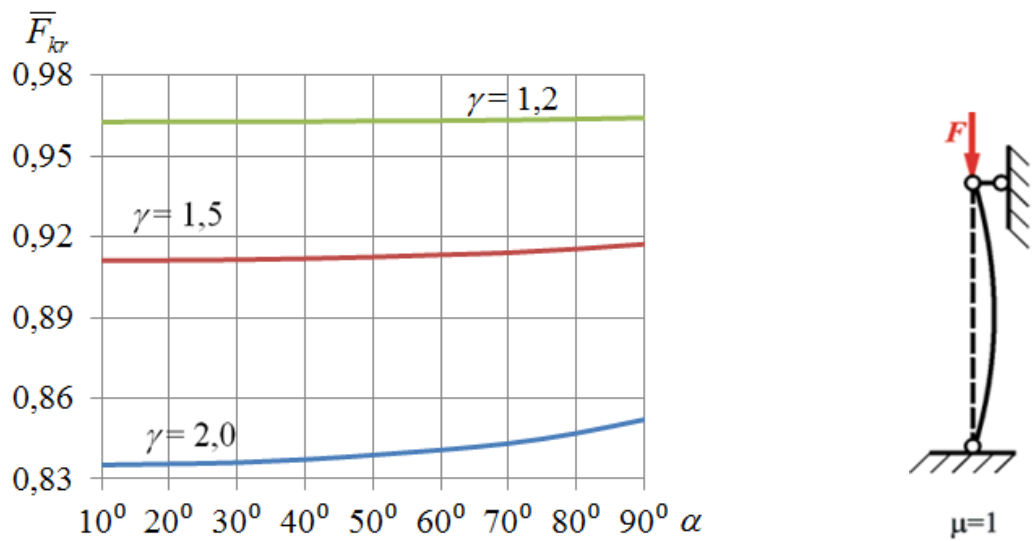
2.1.1. Kritinės jėgos priklausomybė nuo sujungimo geometrijos

Priklausomybė nuo siūlės kampo

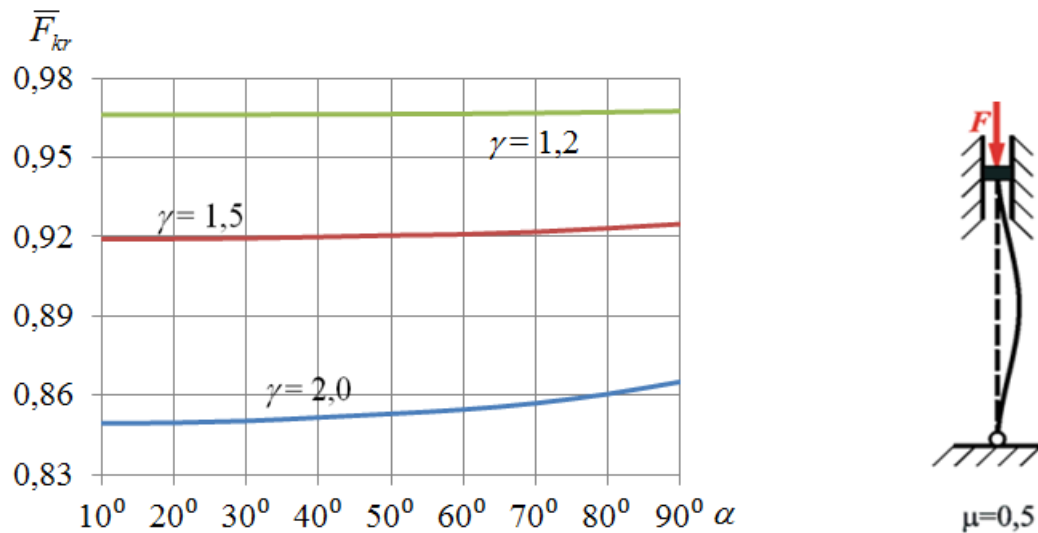
Tyrimo metu buvo analizuojamos trys (2.1 pav.) pateiktos plokštės galų įtvirtinimo sąlygos. Nagrinėta kritinės jėgos priklausomybė nuo siūlės kampo α . Mechaninio nevienalytiškumo santykis γ buvo priimtas: 1,2; 1,5; 2,0. Siūlės kampas buvo keičiamas ribose nuo 10° iki 90° . Santykinis siūlės aukštis $\kappa = 1,0$. Tyrimas atliktas dviejų lakštų suvirintajam sujungimui. Lakšto ilgis $L = 50$ mm, storis $h = 10$ mm, plotis – begalinis (plokščias deformacijų būvis). Suvirinto sujungimo geometrija pateikta (2.2 – 2.4 pav.).



2.5 pav. Santykinės kritinės jėgos priklausomybė nuo siūlės kampo α ir mechaninio nevienalytiškumo γ , kai $\mu = 2$; $h = 10$ mm; $\kappa = 1,0$



2.6 pav. Santykinės kritinės jėgos priklausomybė nuo siūlės kampo α ir mechaninio nevienalytiškumo γ , kai $\mu = 1$; $h = 10$ mm; $\kappa = 1,0$

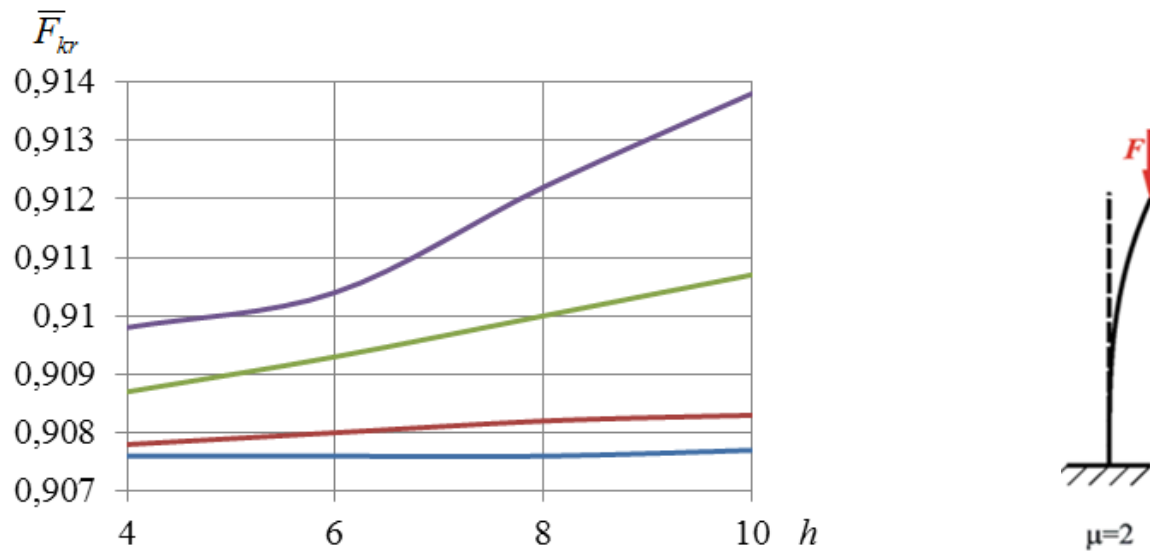


2.7 pav. Santykinės kritinės jėgos priklausomybė nuo siūlės kampo α ir mechaninio nevienalytiškumo γ , kai $\mu = 0,5$; $h = 10$ mm; $\kappa = 1,0$

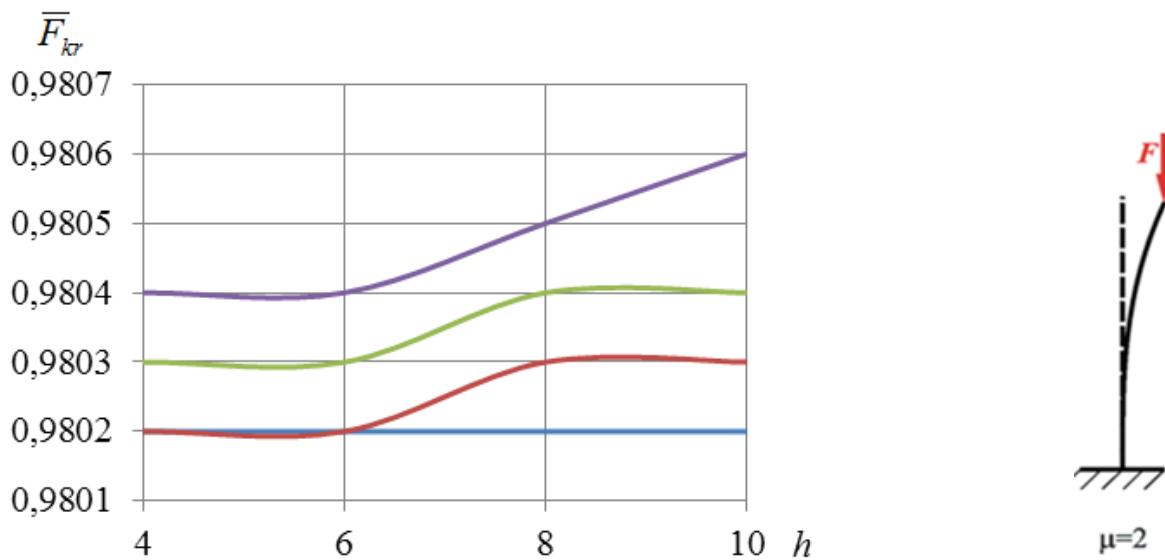
Didėjant siūlės kampui α , santykinė kritinė jėga \bar{F}_{kr} didėja labai nežymiai, nepriklausomai nuo įtvirtinimo būdo. Kai lakšto galų įtvirtinimo sąlygos koeficientas $\mu = 2$, santykinės kritinės jėgos pokytis didžiausias prie mechaninio nevienalytiškumo santykio vertės $\gamma = 1,5$. \bar{F}_{kr} padidėja vos 1,003 karto. Kai $\mu = 1$, santykinės kritinės jėgos pokytis didžiausias prie $\gamma = 2$. \bar{F}_{kr} padidėja vos 1,02 karto. Kai $\mu = 0,5$, santykinės kritinės jėgos pokytis didžiausias prie $\gamma = 2$. \bar{F}_{kr} padidėja vos 1,02 karto. Pavojingiausia santykinė kritinė jėga gaunama prie mechaninio nevienalytiškumo santykio vertės $\gamma = 2,0$, kai $\alpha = 10^\circ$, $\mu = 1$. $\bar{F}_{kr} = 0,8352$ kN.

Priklausomybė nuo lakšto storio

Nagrinėsime kaip santykinė kritinė jėga \bar{F}_{kr} priklauso nuo lakšto storio h , kurį keičiame ribose nuo 4 mm. iki 10 mm., žingsniu kas 2 mm. Taip pat nuo siūlės kampo α bei mechaninio nevienalytiškumo santykio γ , kurio vertes priimsim: 2,0; 1,2. Vidutinis santykinis siūlės aukštis buvo priimtas $\kappa = 1,0$.



2.8 pav. Santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybė nuo lakšto storio h ir siūlės kampo α , kai $\gamma = 2,0$; $\mu = 2$; $\kappa = 1,0$, čia: (—) – $\alpha = 10^\circ$; (—) – $\alpha = 30^\circ$; (—) – $\alpha = 60^\circ$; (—) – $\alpha = 80^\circ$

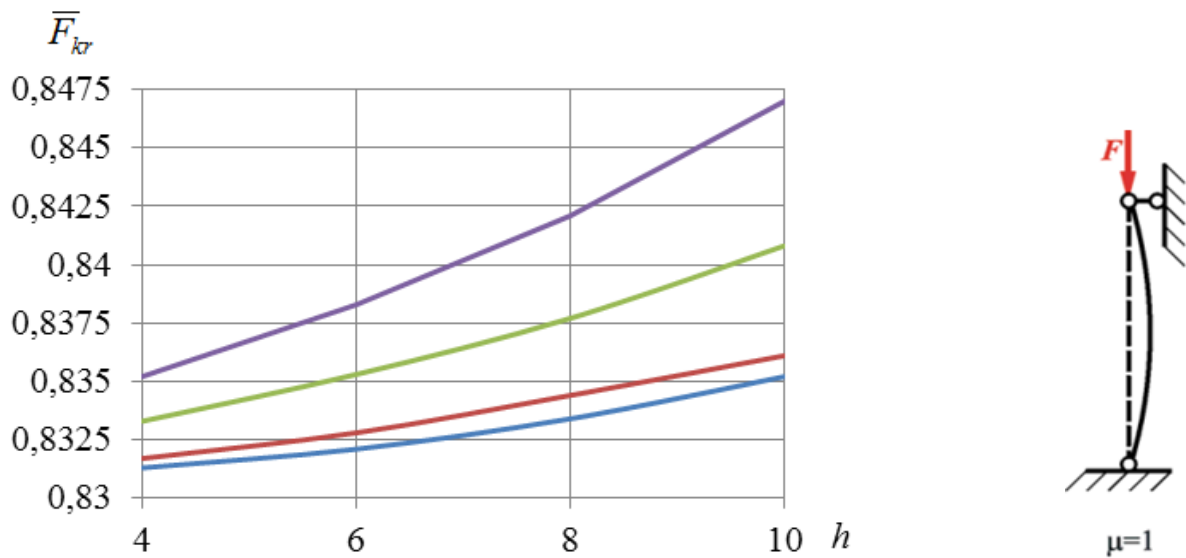


2.9 pav. Santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybė nuo lakšto storio h ir siūlės kampo α , kai $\gamma = 1,2$; $\mu = 2$; $\kappa = 1,0$, čia: (—) – $\alpha = 10^\circ$; (—) – $\alpha = 30^\circ$; (—) – $\alpha = 60^\circ$; (—) – $\alpha = 80^\circ$

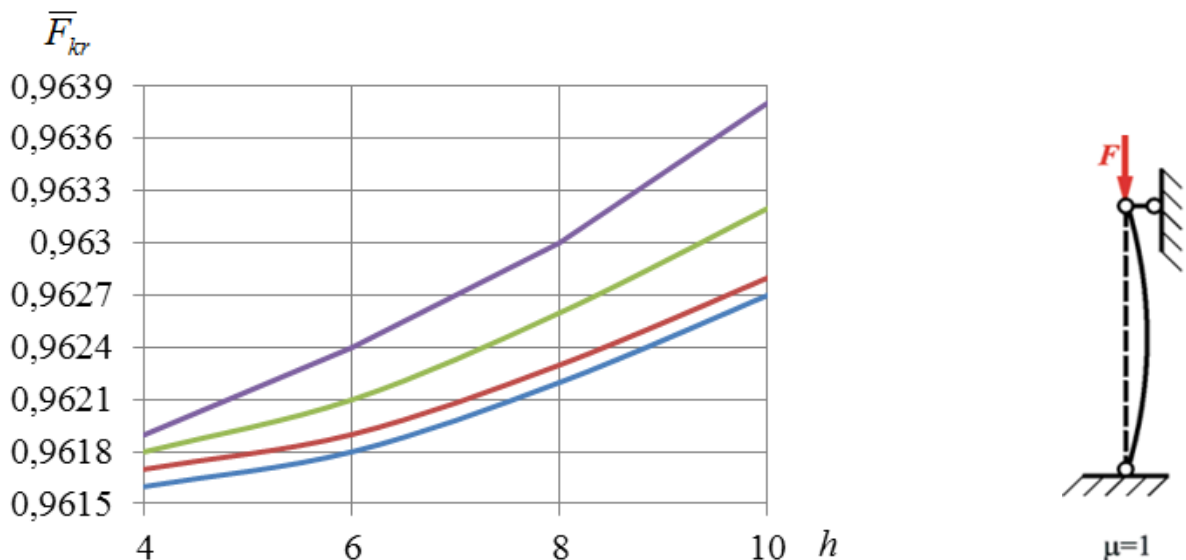
Kai lakšto galų įtvirtinimas $\mu = 2$ ir mechaninis nevienalytiškumas $\gamma = 2$, didžiausia santykinė kritinė jėga \bar{F}_{kr} gaunama kada lakšto storis $h = 10$ mm prie siūlės kampo $\alpha = 80^\circ$. \bar{F}_{kr}

padidėja 1,009 karto. O mažiausiai pakitusi santykinė kritinė jėga \bar{F}_{kr} gaunama, kai lakšto storis $h = 4$ mm prie siūlės kampo $\alpha = 10^\circ$. \bar{F}_{kr} padidėja tik vos 1,0001 karto. Keičiant lakšto storį ribose nuo 4mm iki 10mm, žingsniu kas 2mm, santykinė kritinė jėga \bar{F}_{kr} kinta vos 1,002 karto.

Analogiškai santykinė kritinė jėga \bar{F}_{kr} kinta ir kai mechaninis nevienalytiškumas $\gamma = 1,2$, tačiau tik mažesnėmis vertėmis. Didžiausia santykinė kritinė jėga \bar{F}_{kr} gaunama, kai $h = 10$ mm prie siūlės kampo $\alpha = 80^\circ$. \bar{F}_{kr} padidėja 1,0005 karto. O mažiausia \bar{F}_{kr} gaunama, kai $h = 4$ mm prie siūlės kampo $\alpha = 10^\circ$. \bar{F}_{kr} didinant siūlės kampą išlieka nepakitusi.



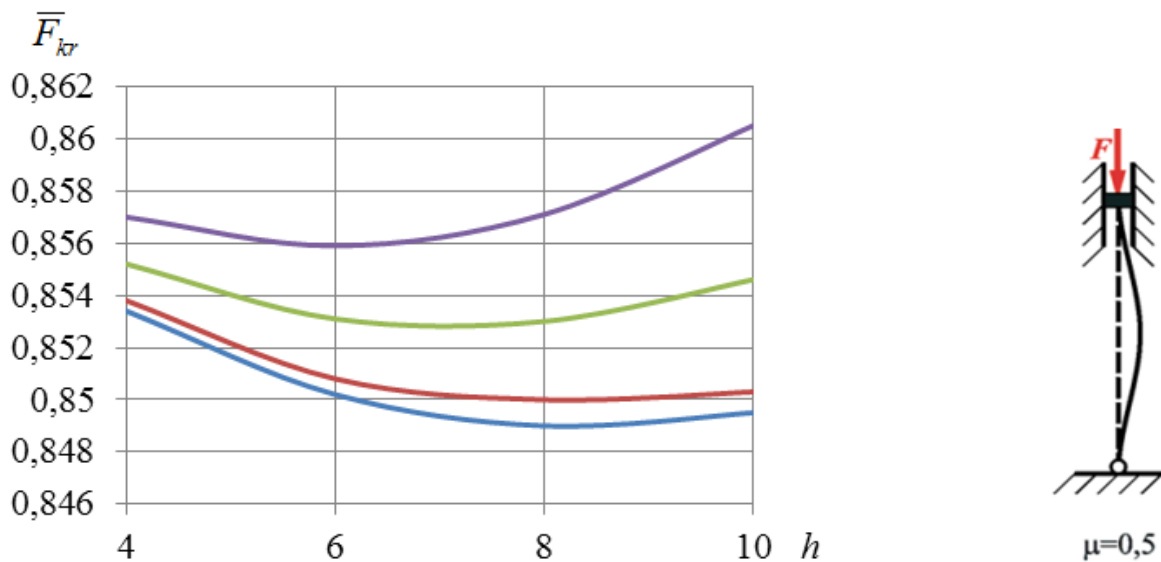
2.10 pav. Santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybė nuo lakšto storio h ir siūlės kampo α , kai $\gamma = 2,0$; $\mu = 1$; $\kappa = 1,0$, čia: (—) — $\alpha = 10^\circ$; (—) — $\alpha = 30^\circ$; (—) — $\alpha = 60^\circ$; (—) — $\alpha = 80^\circ$



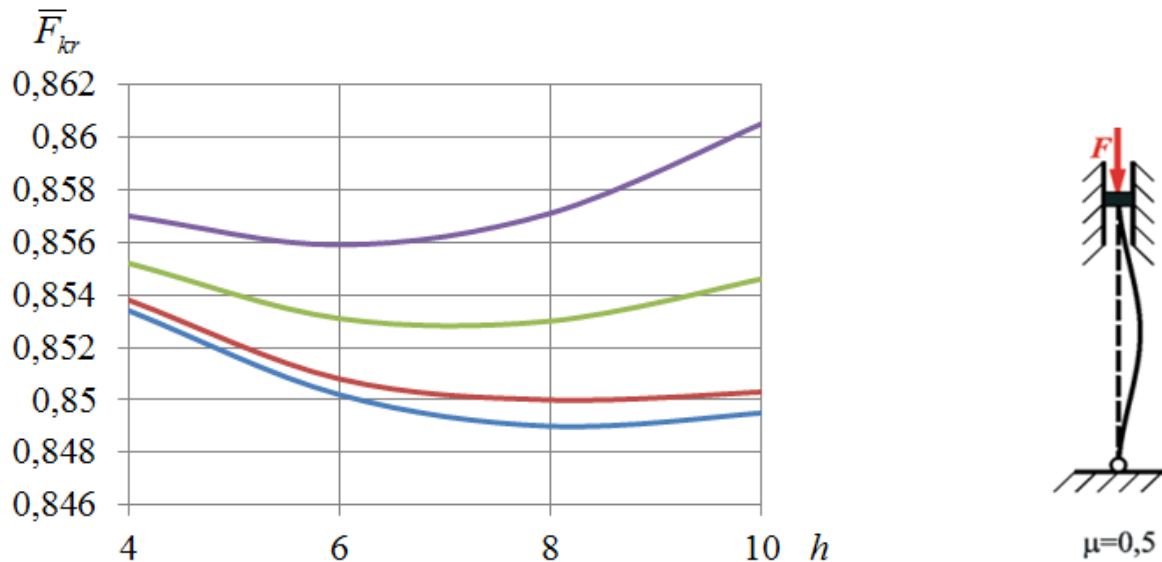
2.11 pav. Santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybė nuo lakšto storio h ir siūlės kampo α , kai $\gamma = 1,2$; $\mu = 1$; $\kappa = 1,0$, čia: (—) – $\alpha = 10^\circ$; (—) – $\alpha = 30^\circ$; (—) – $\alpha = 60^\circ$; (—) – $\alpha = 80^\circ$

Kai įtvirtinimo koeficientas $\mu = 1$ ir mechaninis nevienalytiškumas $\gamma = 2$, didžiausia santykinė kritinė jėga \bar{F}_{kr} gaunama kada lakšto storis $h = 10$ mm prie siūlės kampo $\alpha = 80^\circ$. \bar{F}_{kr} padidėja 1,02 karto. O mažiausiai pakitusi santykinė kritinė jėga \bar{F}_{kr} gaunama, kai lakšto storis $h = 4$ mm prie siūlės kampo $\alpha = 10^\circ$. \bar{F}_{kr} padidėja tik 1,004 karto.

Kai mechaninis nevienalytiškumas $\gamma = 1,2$, didžiausia ir vienodai pakitusi santykinė kritinė jėga \bar{F}_{kr} gaunama prie $h = 10$ mm ir $h = 8$ mm. \bar{F}_{kr} padidėja 1,002 karto. O mažiausia \bar{F}_{kr} gaunama, kai $h = 4$ mm prie siūlės kampo $\alpha = 10^\circ$. \bar{F}_{kr} padidėja tik 1,001 karto.



2.12 pav. Santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybė nuo lakšto storio h ir siūlės kampo α , kai $\gamma = 2,0$; $\mu = 0,5$; $\kappa = 1,0$, čia: (—) – $\alpha = 10^\circ$; (—) – $\alpha = 30^\circ$; (—) – $\alpha = 60^\circ$; (—) – $\alpha = 80^\circ$



2.13 pav. Santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybė nuo lakšto storio h ir siūlės kampo α , kai $\gamma = 1,2$; $\mu = 0,5$; $\kappa = 1,0$, čia: (—) – $\alpha = 10^\circ$; (—) – $\alpha = 30^\circ$; (—) – $\alpha = 60^\circ$; (—) – $\alpha = 80^\circ$

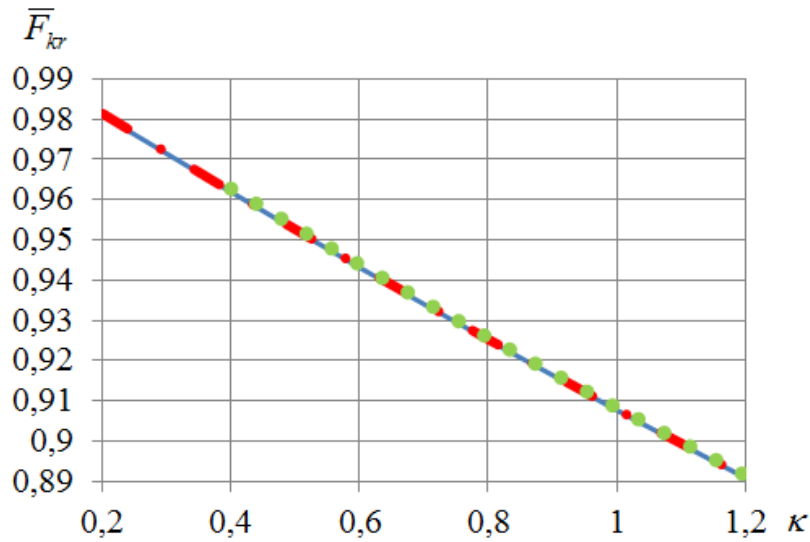
Kai įtvirtinimo koeficientas $\mu = 0,5$ ir mechaninis nevienalytiškumas $\gamma = 2$, didžiausia santykinė kritinė jėga \bar{F}_{kr} gaunama kada lakšto storis $h = 10$ mm. \bar{F}_{kr} padidėja 1,02 karto. O mažiausiai pakitusi santykinė kritinė jėga \bar{F}_{kr} gaunama, kai lakšto storis $h = 4$ mm. \bar{F}_{kr} padidėja tik 1,005 karto.

Kai mechaninis nevienalytiškumas $\gamma = 1,2$, didžiausia ir vienodai pakitusi santykinė kritinė jėga \bar{F}_{kr} gaunama prie $h = 10$ mm ir $h = 8$ mm. \bar{F}_{kr} padidėja 1,001 karto. O mažiausia \bar{F}_{kr} gaunama, kai $h = 4$ mm. \bar{F}_{kr} padidėja tik 1,0003 karto.

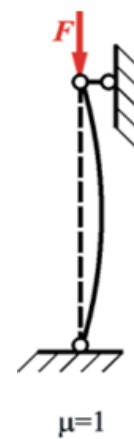
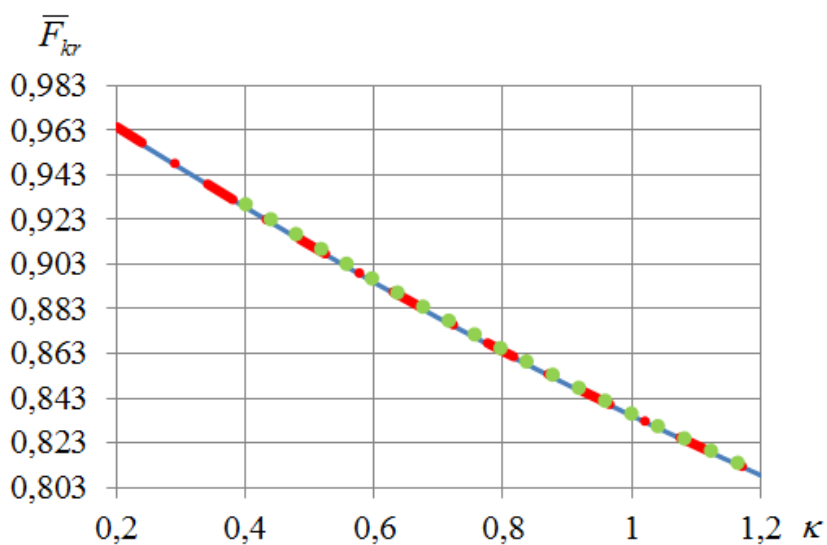
Taigi nepriklausomai nuo visų trijų lakštų galų įtvirtinimo tipo bei mechaninio nevienalytiškumo vertės, didinant siūlės kampą α bei keičiant lakšto storį į storesnį - santykinė kritinė jėga \bar{F}_{kr} laipsniškai labai nežymiai didėja. Iš šių grafikų (2.8 – 2.13 pav.) galima teigti, kad pavojingiausia santykinės kritinės jėgos reikšmė gaunama prie $h = 4$ mm, $\gamma = 2,0$, $\mu = 1$, $\alpha = 10^\circ$. Tačiau pastebimia, kad visais atvejais keičiant lakšto storį, santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} pokytis gaunamas labai nežymus. Tai galima paaiškinti tuo, kad lakšto plotis esant plokščiam deformacijos būviui yra ženkliai didesnis už lakšto storį.

Priklausomybė nuo vidutinio santykinio siūlės aukščio

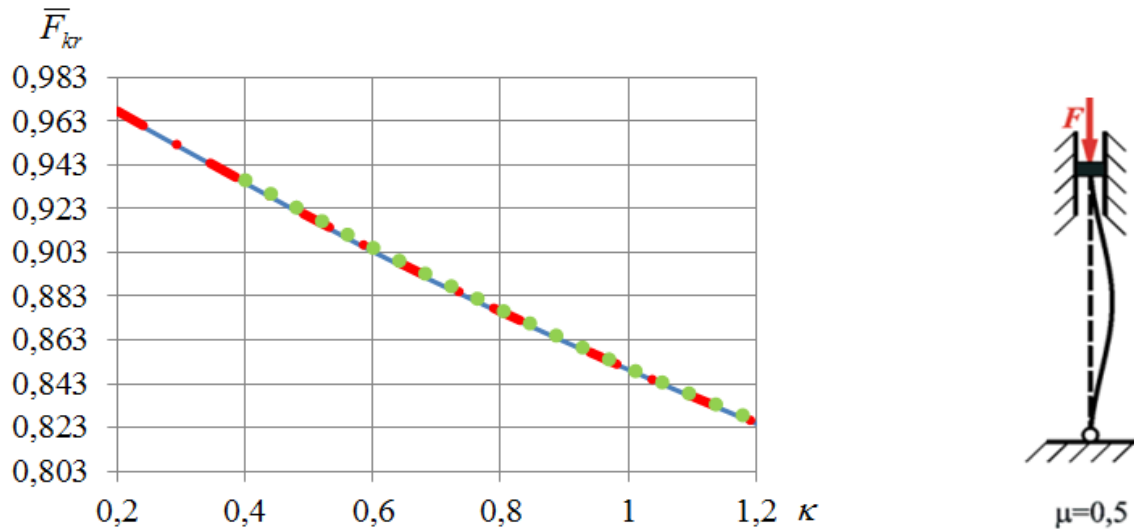
Nagrinėsime kaip santykinė kritinė jėga \bar{F}_{kr} priklauso nuo vidutinio siūlės santykinio aukščio κ , kurį keisime ribose nuo 0,2 iki 1,2, žingsniu 0,2 ir nuo siūlės kampo α , kurio vertes naudosime 10° , 20° ir 30° . Lakšto storį naudosime $h = 10$ mm, o mechaninio nevienalytiškumo santykį $\gamma = 2$.



2.14 pav. Santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybė nuo siūlės santykinio aukščio κ ir siūlės kampo α , kai $\gamma = 2$; $\mu = 2$; $h = 10$ mm; čia: (—) – $\alpha = 10^\circ$; (• — • — •) – $\alpha = 20^\circ$; (•••••) – $\alpha = 30^\circ$



2.15 pav. Santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybė nuo siūlės santykinio aukščio κ ir siūlės kampo α , kai $\gamma = 2$; $\mu = 1$; $h = 10$ mm; čia: (—) – $\alpha = 10^\circ$; (• — • — •) – $\alpha = 20^\circ$; (•••••) – $\alpha = 30^\circ$



2.16 pav. Santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybė nuo siūlės santykinio aukščio κ ir siūlės kampo α , kai $\gamma = 2$; $\mu = 0,5$; $h = 10$ mm; čia: (—) – $\alpha = 10^\circ$; (• — • — •) – $\alpha = 20^\circ$; (•••••) – $\alpha = 30^\circ$

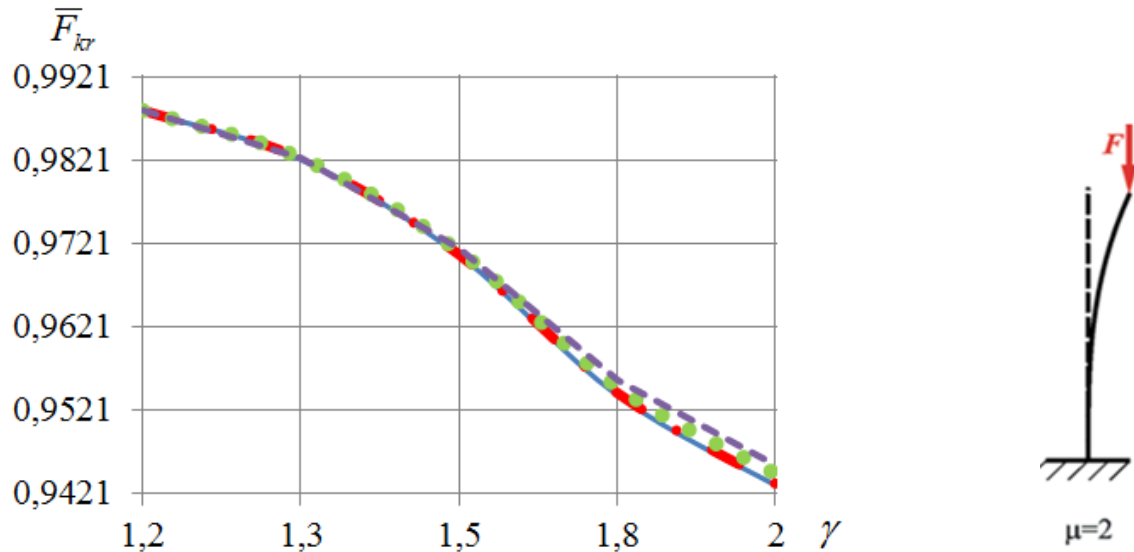
Nepriklausomai nuo plokštės įtvirtinimo būdo didėjant siūlės santykiui aukščiui κ , santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} mažėja. Visuose įtvirtinimo tipuose, kai $\alpha = 10^\circ$, santykinė kritinė jėga gaunama mažiausia, o kai $\alpha = 20^\circ$, santykinė kritinė jėga gaunama didžiausia.

Kai plokštės įtvirtinimas $\mu = 2$ ir siūlės kampas $\alpha = 20^\circ$ santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} reikšmė gaunama didžiausia. Prie to paties įtvirtinimo būdo, kai siūlės kampas $\alpha = 30^\circ$ gaunamas didžiausias santykinės kritinės jėgos pokytis. \bar{F}_{kr} sumažėja 1,08 karto.

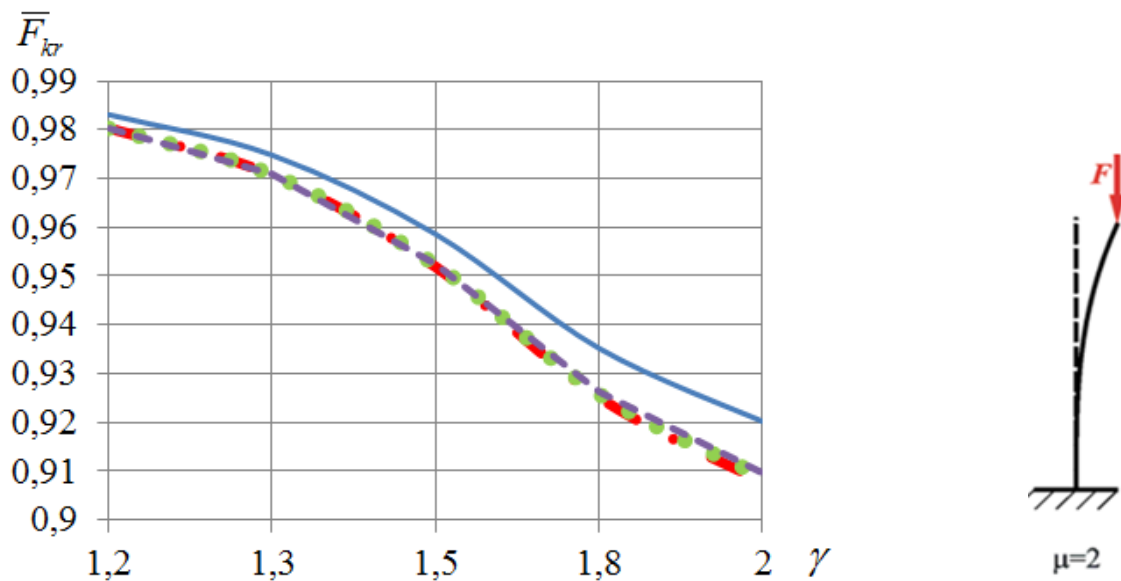
2.1.2. Kritinės jėgos priklausomybė nuo sujungimo mechaninio nevienalytiškumo

Priklausomybė nuo pagrindinės ir siūlės medžiagų tamprumo modulių santykio, kai keičiamas siūlės kampas

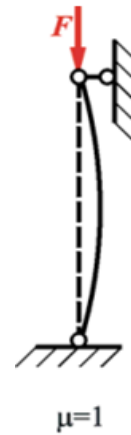
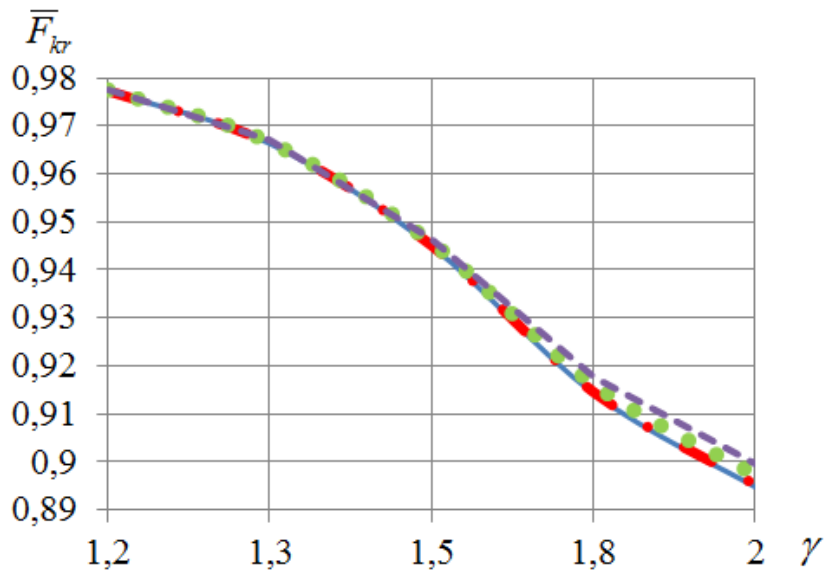
Nagrinėsime kaip santykinė kritinė jėga \bar{F}_{kr} priklauso nuo pagrindinės ir siūlės medžiagų tamprumo modulių santykio γ ir siūlės kampo α , kai keičiamas vidutinis santykinis siūlės aukštis κ ir galų įtvirtinimas. Siūlės kampa α naudosime 10° , 20° , 40° , 50° , o mechaninio nevienalytiškumo vertes γ priimsime: 1,2; 1,3; 1,5; 1,8; 2,0.



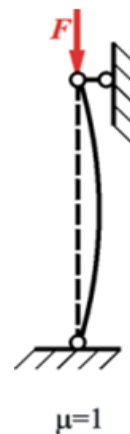
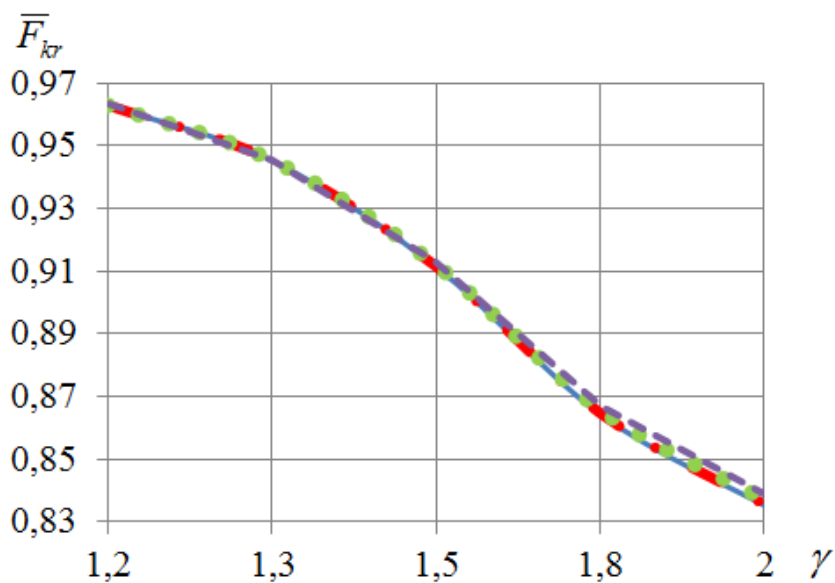
2.17 pav. Santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybė nuo pagrindinės ir siūlės medžiagų tamprumo modulių santykio γ ir siūlės kampo α , kai $\mu = 2$, $\kappa = 0,6$, $h = 10$ mm, čia:
 (—) – $\alpha = 10^\circ$; (• — • — • — •) – $\alpha = 20^\circ$; (•••••) – $\alpha = 40^\circ$; (---) – $\alpha = 50^\circ$



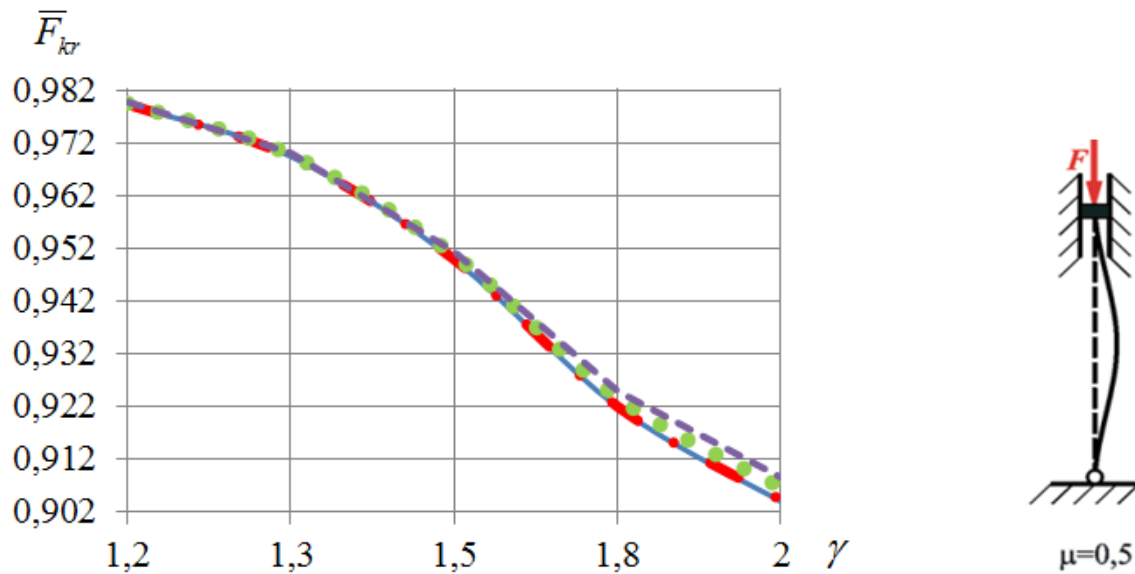
2.18 pav. Santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybė nuo pagrindinės ir siūlės medžiagų tamprumo modulių santykio γ ir siūlės kampo α , kai $\mu = 2$, $\kappa = 1,0$, $h = 10$ mm, čia:
 (—) – $\alpha = 10^\circ$; (•—•—•—•) – $\alpha = 20^\circ$; (•••••) – $\alpha = 40^\circ$; (- - -) – $\alpha = 50^\circ$



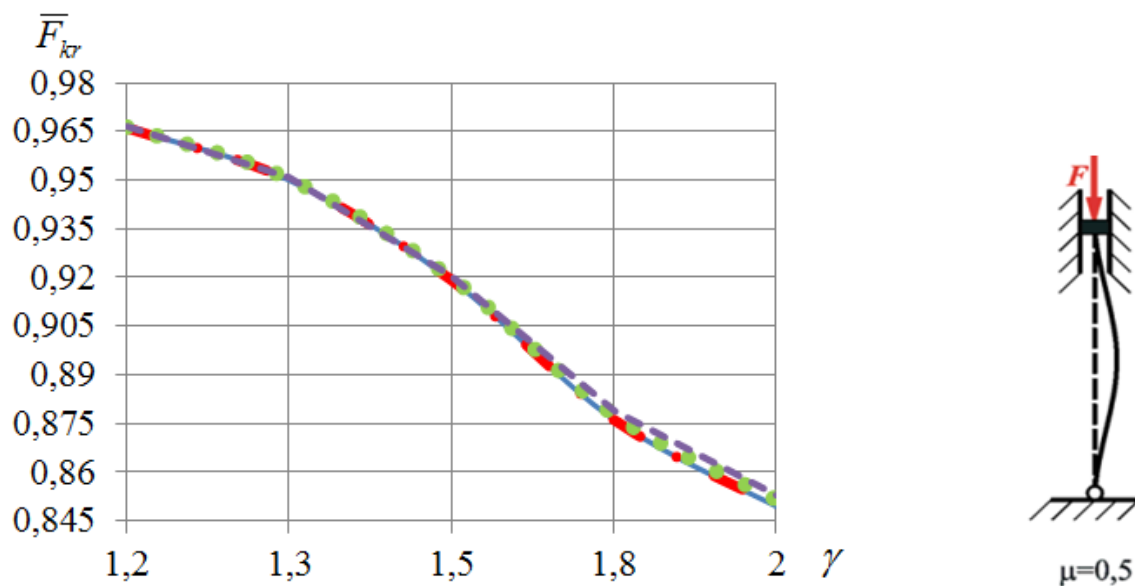
2.19 pav. Santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybė nuo pagrindinės ir siūlės medžiagų tamprumo modulių santykio γ ir siūlės kampo α , kai $\mu = 1$, $\kappa = 0,6$, $h = 10$ mm, čia:
 (—) – $\alpha = 10^\circ$; (•—•—•—•) – $\alpha = 20^\circ$; (•••••) – $\alpha = 40^\circ$; (- - -) – $\alpha = 50^\circ$



2.20 pav. Santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybė nuo pagrindinės ir siūlės medžiagų tamprumo modulių santykio γ ir siūlės kampo α , kai $\mu = 1$, $\kappa = 1,0$, $h = 10$ mm, čia:
 (—) – $\alpha = 10^\circ$; (•—•—•—•) – $\alpha = 20^\circ$; (•••••) – $\alpha = 40^\circ$; (---) – $\alpha = 50^\circ$



2.21 pav. Santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybė nuo pagrindinės ir siūlės medžiagų tamprumo modulių santykio γ ir siūlės kampo α , kai $\mu = 0,5$, $\kappa = 0,6$, $h = 10$ mm, čia:
 (—) – $\alpha = 10^\circ$; (•—•—•—•) – $\alpha = 20^\circ$; (•••••) – $\alpha = 40^\circ$; (---) – $\alpha = 50^\circ$

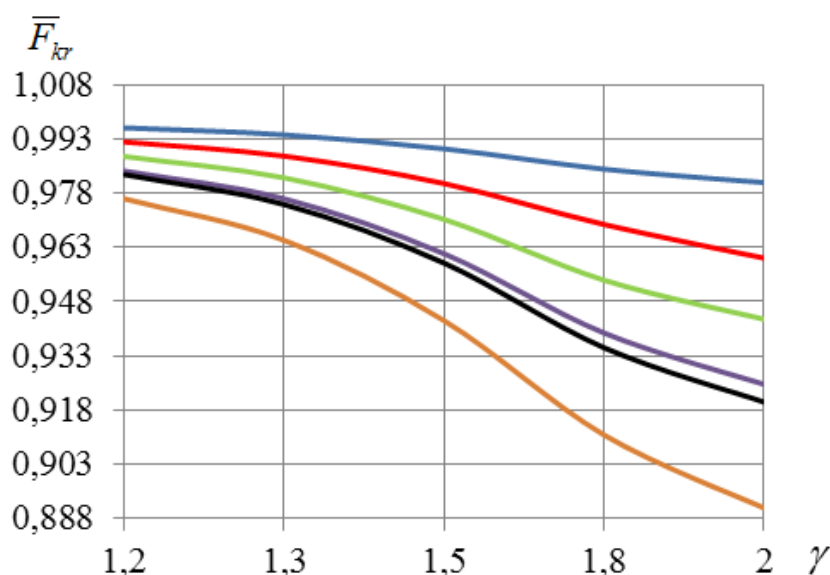


2.22 pav. Santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybė nuo pagrindinės ir siūlės medžiagų tamprumo modulių santykio γ ir siūlės kampo α , kai $\mu = 0,5$, $\kappa = 1,0$, $h = 10$ mm, čia:
 (—) – $\alpha = 10^\circ$; (•—•—•—•) – $\alpha = 20^\circ$; (•••••) – $\alpha = 40^\circ$; (- - - -) – $\alpha = 50^\circ$

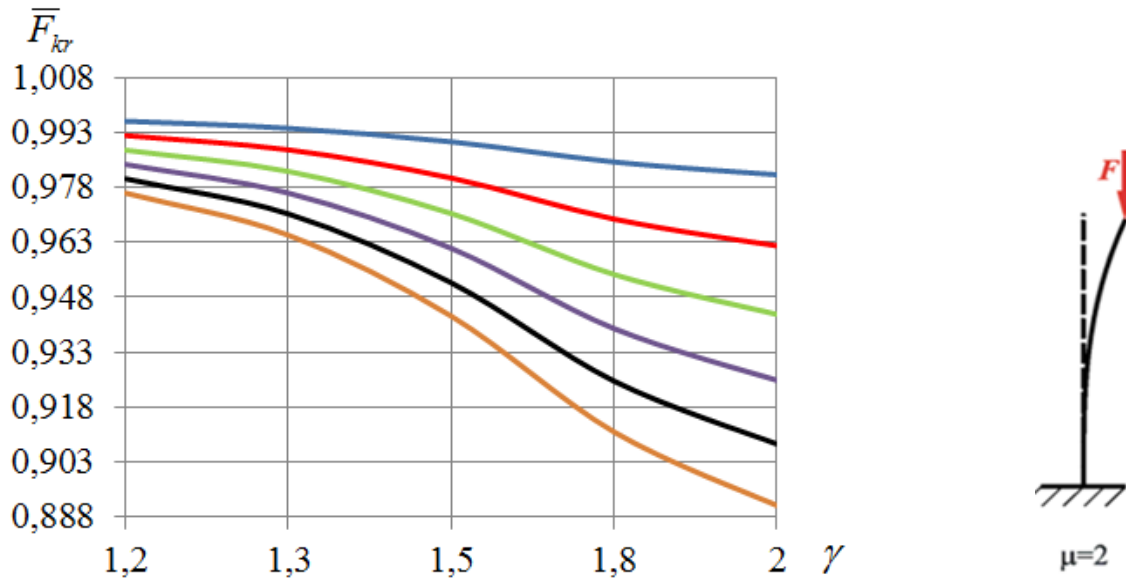
Iš šių (2.17 – 22.2 pav.) matyti, kad keičiant siūlės kampą α nuo 10° iki 50° , santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} reikšmės artimos vienas kitai. Nepriklausomai nuo plokštės įtvirtinimo būdo santykinė kritinė jėga gaunama didžiausia prie 50° siūlės kampo. Kai santykinis siūlės aukštis $\kappa = 0,6$, \bar{F}_{kr} gaunama didesnė, nei kada $\kappa = 1,0$, esant tam pačiam įtvirtinimo būdai. Tačiau didinant mechaninio nevienalytiškumo koeficientą γ , santykinė kritinė jėga mažėja. Tai pavojingiausia santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} reikšmė klupdomam suvirintam sujungimui gaunama, kai $\kappa = 1,0$, $\mu = 1$, $\gamma = 0,5$, $\alpha = 10^\circ$, $h = 10$ mm.

Priklausomybė nuo pagrindinės ir siūlės medžiagų tamprumo modulių santykio bei vidutinio santykinio siūlės aukščio

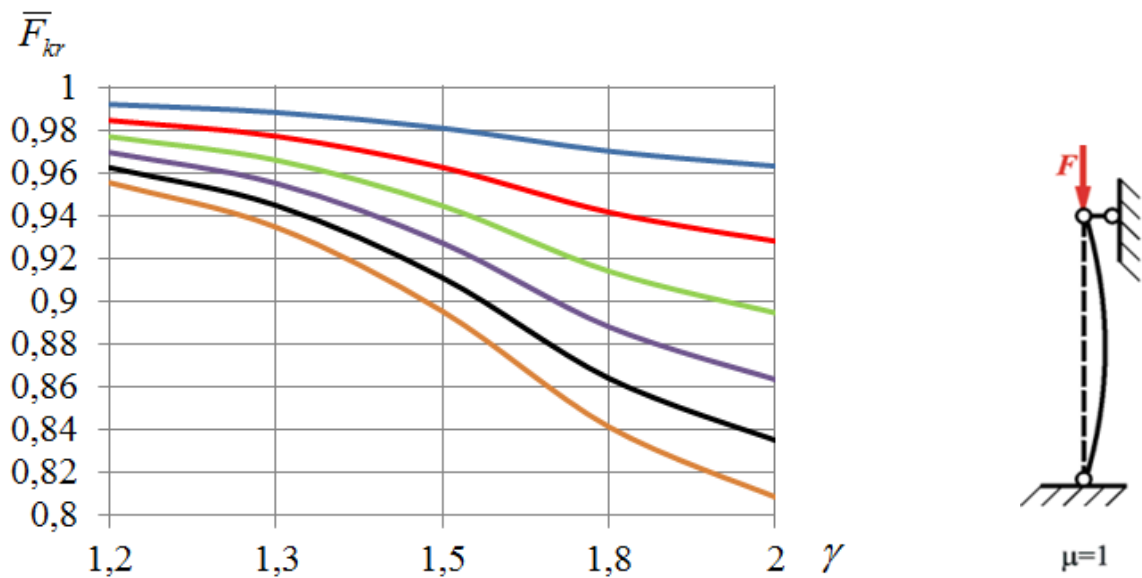
Nagrinėsime kaip santykinė kritinė jėga \bar{F}_{kr} priklauso nuo pagrindinės ir siūlės medžiagų tamprumo modulių santykio γ ir vidutinio santykinio siūlės aukščio κ , kai keičiamas siūlės kampas α ir galų įtvirtinimo koeficientas μ . Siūlės kampa α naudosisime 10° , 20° , mechaninio nevienalytiškumo vertes γ priimsime: 1,2; 1,3; 1,5; 1,8; 2,0; o vidutinį santykinį siūlės aukštį κ , keisime ribose nuo 0,2 iki 1,2, žingsniu 0,2. Lakšto storį naudosisime $h = 10$ mm.



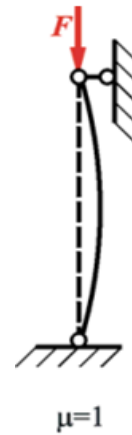
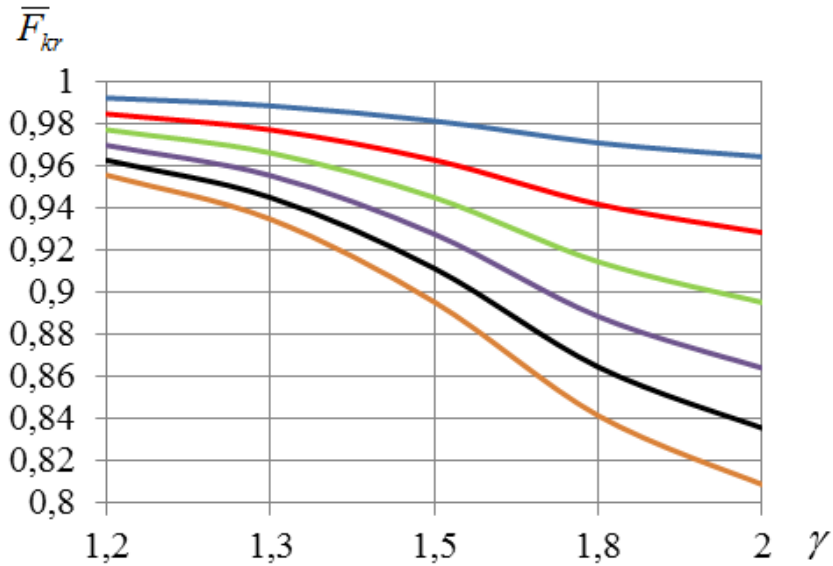
2.23 pav. Santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybė nuo pagrindinės ir siūlės medžiagų tamprumo modulių santykio γ ir vidutinio santykinio siūlės aukščio κ , kai $\mu = 2$, $h = 10$ mm, $\alpha = 10^\circ$, čia: (—) – $\kappa = 0,2$; (—) – $\kappa = 0,4$; (—) – $\kappa = 0,6$; (—) – $\kappa = 0,8$; (—) – $\kappa = 1,0$; (—) – $\kappa = 1,2$



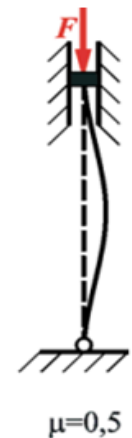
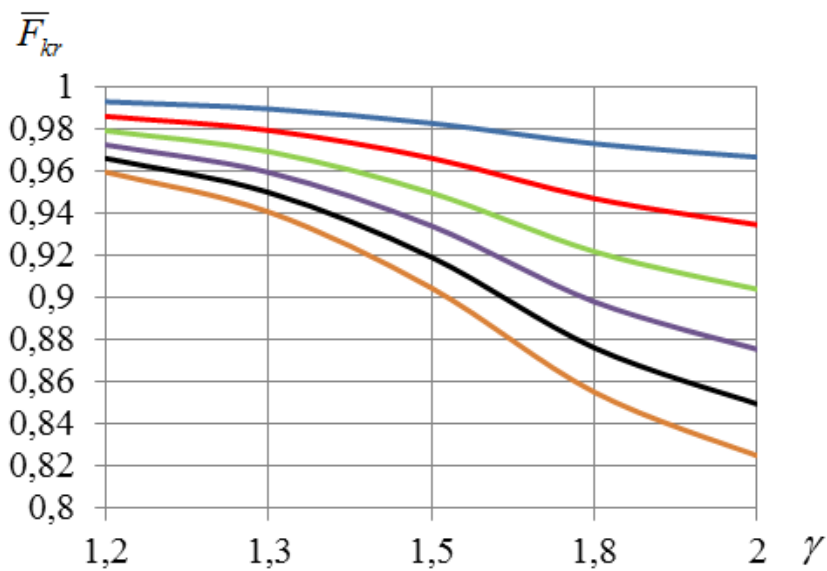
2.24 pav. Santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybė nuo pagrindinės ir siūlės medžiagų tamprumo modulių santykio γ ir vidutinio santykinio siūlės aukščio κ , kai $\mu = 2$, $h = 10$ mm, $\alpha = 20^\circ$, čia: (—) – $\kappa = 0,2$; (—) – $\kappa = 0,4$; (—) – $\kappa = 0,6$; (—) – $\kappa = 0,8$; (—) – $\kappa = 1,0$; (—) – $\kappa = 1,2$



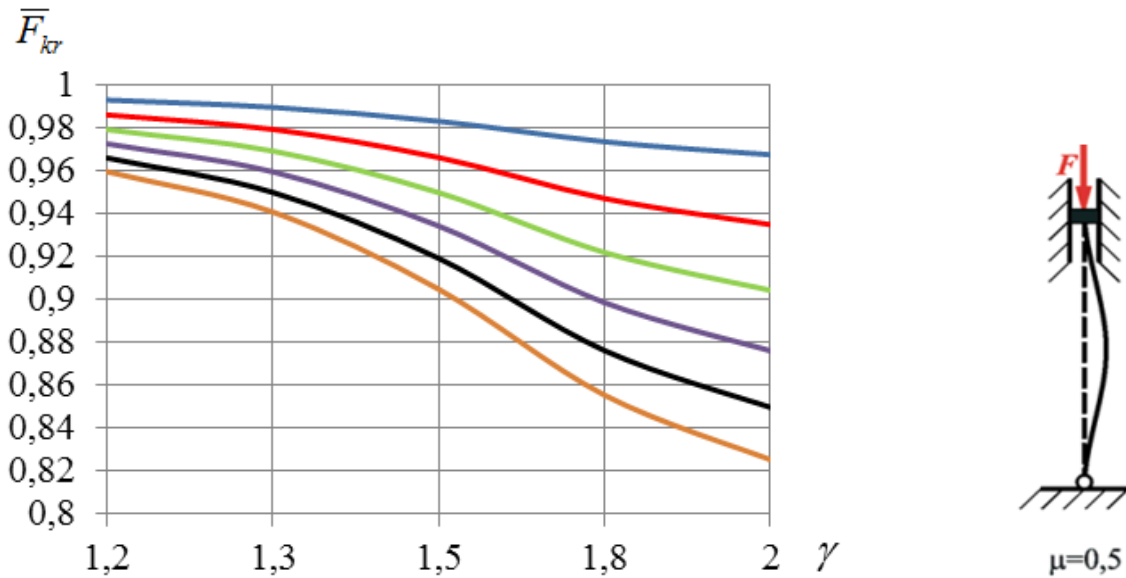
2.25 pav. Santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybė nuo pagrindinės ir siūlės medžiagų tamprumo modulių santykio γ ir vidutinio santykinio siūlės aukščio κ , kai $\mu = 1$, $h = 10$ mm, $\alpha = 10^\circ$, čia: (—) – $\kappa = 0,2$; (—) – $\kappa = 0,4$; (—) – $\kappa = 0,6$; (—) – $\kappa = 0,8$; (—) – $\kappa = 1,0$; (—) – $\kappa = 1,2$



2.26 pav. Santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybė nuo pagrindinės ir siūlės medžiagų tamprumo modulių santykio γ ir vidutinio santykinio siūlės aukščio κ , kai $\mu = 1$, $h = 10$ mm, $\alpha = 20^\circ$, čia: (—) – $\kappa = 0,2$; (—) – $\kappa = 0,4$; (—) – $\kappa = 0,6$; (—) – $\kappa = 0,8$; (—) – $\kappa = 1,0$; (—) – $\kappa = 1,2$



2.27 pav. Santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybė nuo pagrindinės ir siūlės medžiagų tamprumo modulių santykio γ ir vidutinio santykinio siūlės aukščio κ , kai $\mu = 0,5$, $h = 10$ mm, $\alpha = 10^\circ$, čia: (—) – $\kappa = 0,2$; (—) – $\kappa = 0,4$; (—) – $\kappa = 0,6$; (—) – $\kappa = 0,8$; (—) – $\kappa = 1,0$; (—) – $\kappa = 1,2$



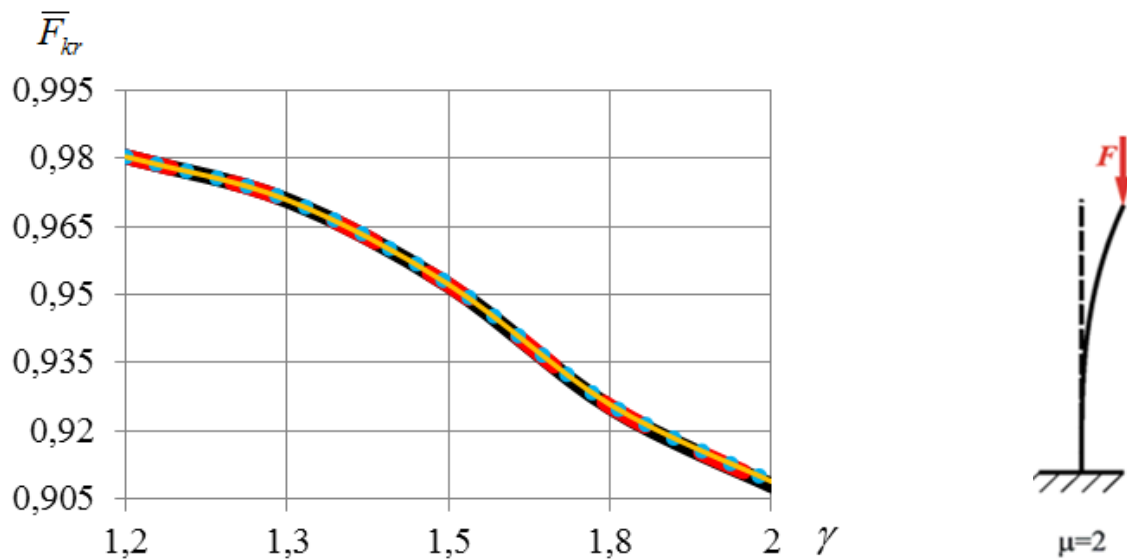
2.28 pav. Santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybė nuo pagrindinės ir siūlės medžiagų tamprumo modulių santykio γ ir vidutinio santykinio siūlės aukščio κ , kai $\mu = 0,5$, $h = 10$ mm, $\alpha = 20^\circ$, čia: (—) – $\kappa = 0,2$; (—) – $\kappa = 0,4$; (—) – $\kappa = 0,6$; (—) – $\kappa = 0,8$; (—) – $\kappa = 1,0$; (—) – $\kappa = 1,2$

Palyginus visų trijų įtvirtinimų santykinės kritinės jėgas, galima teigti, kad esant tam pačiam įtvirtinimui, tik keičiant suvirinto sujungimo siūlės kampą, šiuo atveju $\alpha = 10^\circ$ ir $\alpha = 20^\circ$, prie didesnio siūlės kampo santykinė kritinė jėga gaunama didesnė. Kai $\kappa = 1,2$ ir $\alpha = 10^\circ$ mechaninio nevienalytiškumo modulių santykį padidinus 5 kartus santykinė kritinė jėga analogiškai sumažėja kaip ir prie $\alpha = 20^\circ$ kampo: kai $\mu = 2$ – 1,09 karto; kai $\mu = 1$ – 1,18 karto; kai $\mu = 0,5$ – 1,16 karto (2.23 – 2.28 pav.).

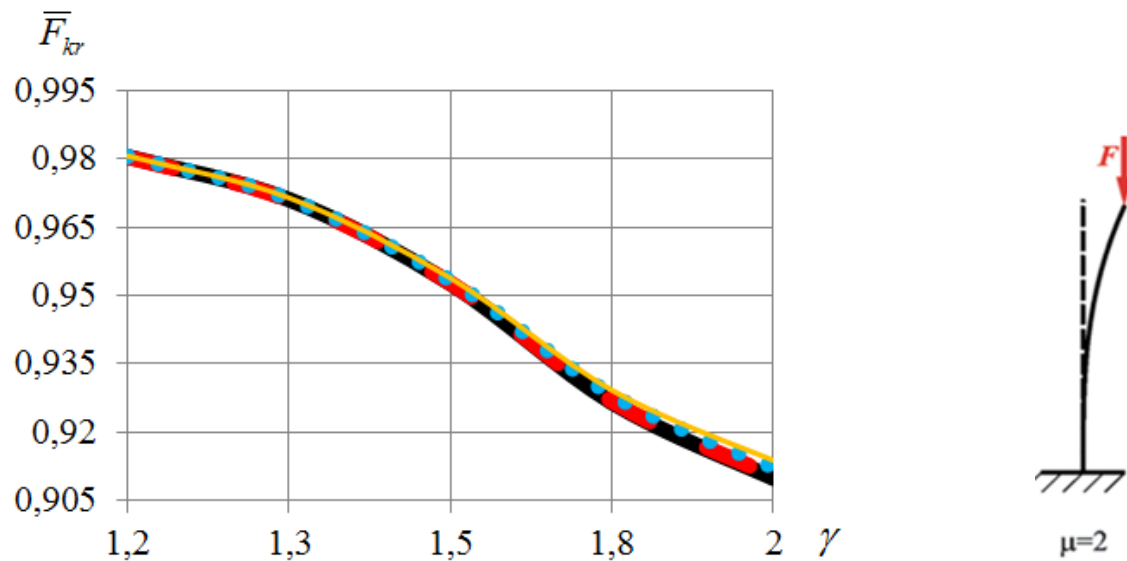
Priklausomybė nuo pagrindinės ir siūlės medžiagų tamprumo modulių santykio bei lakšto storio

Nagrinėsime kaip santykinė kritinė jėga \bar{F}_{kr} priklauso nuo pagrindinės ir siūlės medžiagų tamprumo modulių santykio γ ir lakšto storio h , kai keičiamas siūlės kampas α ir galų įtvirtinimo koeficientas μ . Siūlės kampa α naudosime 40° , 80° , mechaninio nevienalytiškumo vertes

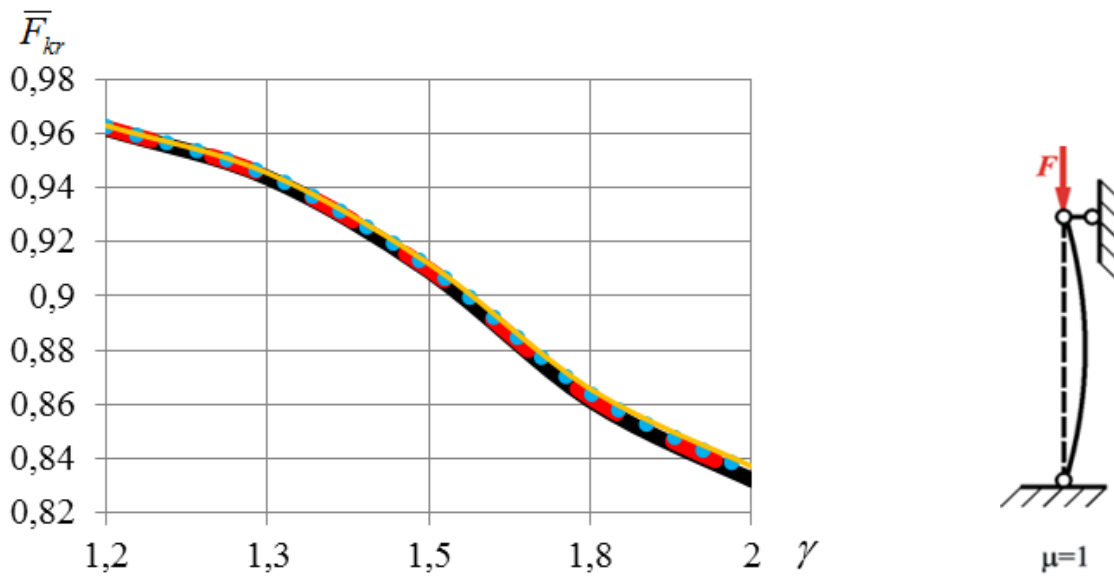
γ priimsime: 1,2; 1,3; 1,5; 1,8; 2,0. Vidutinį santykinį siūlės aukštį naudosisime $\kappa = 1,0$. Lakšto storio h vertes naudosisime: 4 mm, 6 mm, 8 mm, 10 mm.



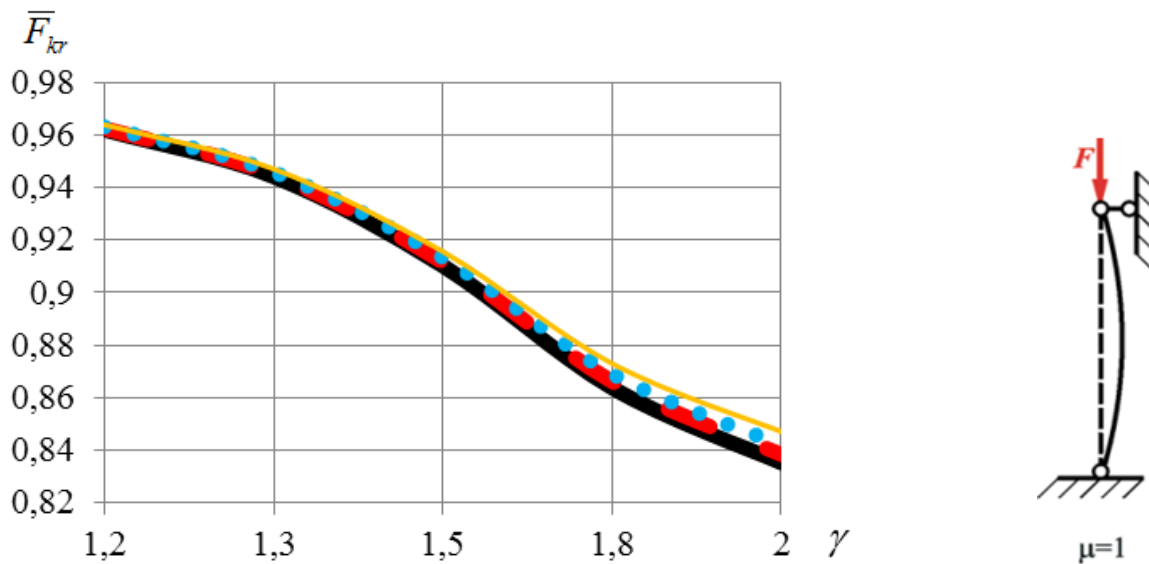
2.29 pav. Santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybė nuo pagrindinės ir siūlės medžiagų tamprumo modulių santykio γ ir lakšto storio h , kai $\alpha = 40^\circ$; $\mu = 2$, $\kappa = 1,0$, čia: (—) – $h = 4$ mm; (---) – $h = 6$ mm; (•••••) – $h = 8$ mm; (—•—) – $h = 10$ mm



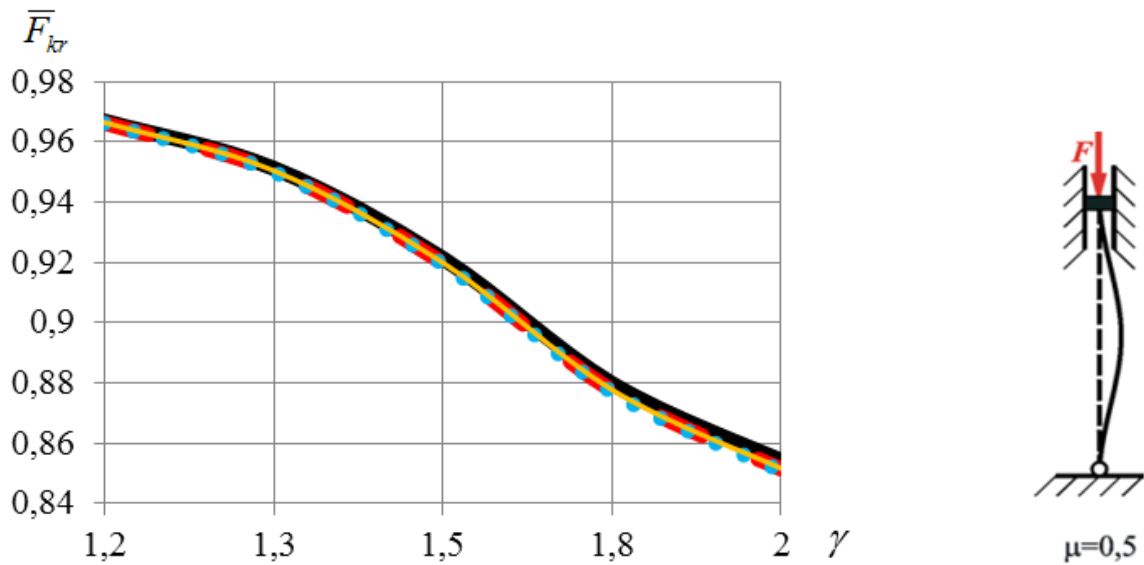
2.30 pav. Santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybė nuo pagrindinės ir siūlės medžiagų tamprumo modulių santykio γ ir lakšto storio h , kai $\alpha = 80^\circ$; $\mu = 2$, $\kappa = 1,0$, čia: (—) – $h = 4$ mm; (---) – $h = 6$ mm; (•••••) – $h = 8$ mm; (—•—) – $h = 10$ mm



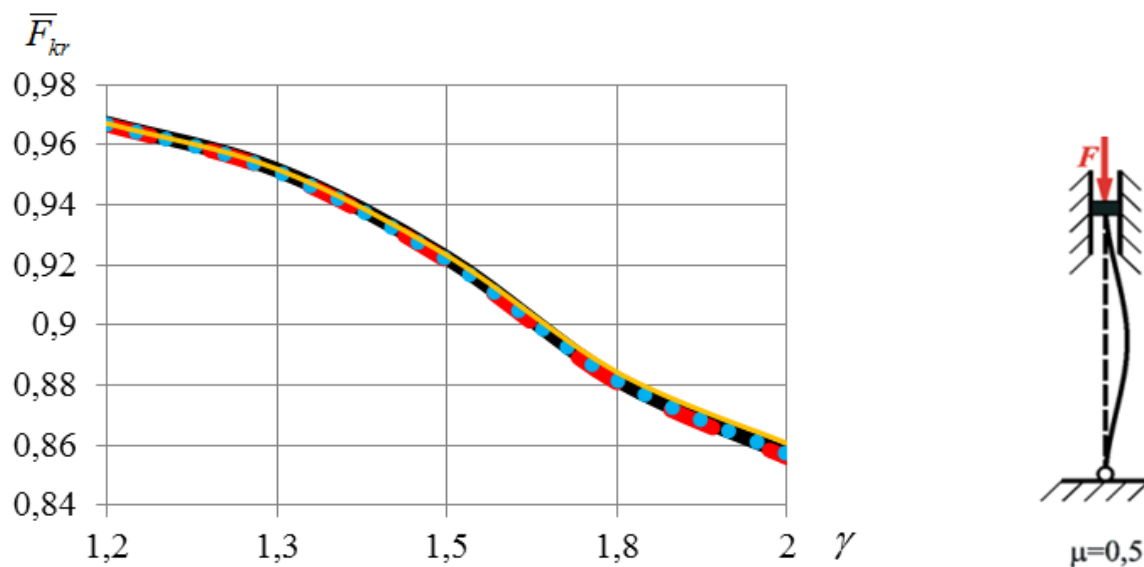
2.31 pav. Santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybė nuo pagrindinės ir siūlės medžiagų tamprumo modulių santykio γ ir lakšto storio h , kai $\alpha = 40^\circ$; $\mu = 1$, $\kappa = 1,0$, čia: (—) – $h = 4$ mm; (---) – $h = 6$ mm; (••••) – $h = 8$ mm; (—) – $h = 10$ mm



2.32 pav. Santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybė nuo pagrindinės ir siūlės medžiagų tamprumo modulių santykio γ ir lakšto storio h , kai $\alpha = 80^\circ$; $\mu = 1$, $\kappa = 1,0$, čia: (—) – $h = 4$ mm; (---) – $h = 6$ mm; (••••) – $h = 8$ mm; (—) – $h = 10$ mm



2.33 pav. Santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybė nuo pagrindinės ir siūlės medžiagų tamprumo modulių santykio γ ir lakšto storio h , kai $\alpha = 40^\circ$; $\mu = 0,5$, $\kappa = 1,0$, čia:
 (—) – $h = 4$ mm; (---) – $h = 6$ mm; (••••) – $h = 8$ mm; (—) – $h = 10$ mm



2.34 pav. Santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybė nuo pagrindinės ir siūlės medžiagų tamprumo modulių santykio γ ir lakšto storio h , kai $\alpha = 80^\circ$; $\mu = 0,5$, $\kappa = 1,0$, čia:
 (—) – $h = 4$ mm; (---) – $h = 6$ mm; (••••) – $h = 8$ mm; (—) – $h = 10$ mm

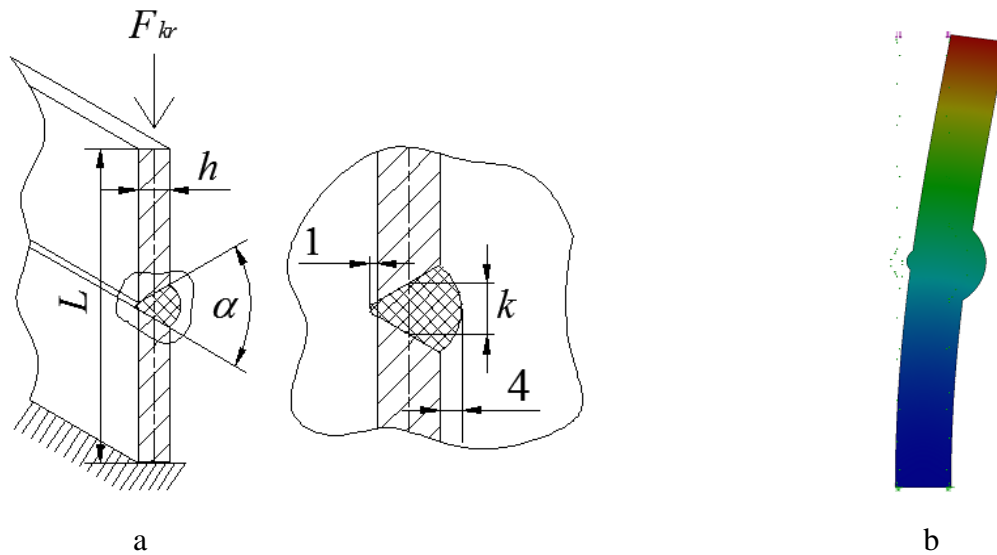
Iš šių (2.29 – 2.34 pav.) matyti, kad nepriklausomai nuo to koks siūlės kampas ar $\alpha = 40^\circ$ ar $\alpha = 80^\circ$, santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} reikšmės artimos vienas kitai. Nepriklausomai nuo plokštės įtvirtinimo būdo didinant mechaninio nevienalytiškumo γ modulį santykį santykinės kritinės jėgos reikšmė mažėja. Prie didžiausios mechaninio nevienalytiškumo $\gamma = 2$ reikšmės, santykinė kritinė jėga \bar{F}_{kr} gaunama mažiausia (pavojingiausia), kai $h = 4$ mm; $\alpha = 40^\circ$; $\mu = 1$. O didžiausia santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} reikšmė gaunama, kai $\gamma = 1,2$; $h = 10$ mm; $\alpha = 80^\circ$; $\mu = 2$.

Peržiūrėjus visų šių grafikų (2.5 – 2.34 pav.) priklausomybes nuo įvairių parametru pastebime, kad kai kuriuose grafikuose parametrai „persipina“ vienas su kitu. Tai buvo bandoma parodyti, kad iš vienu grafikų matosi kitimo dėsningumas nuo vienu parametru, o kituose grafikuose atvirkščiai, nuo kitu

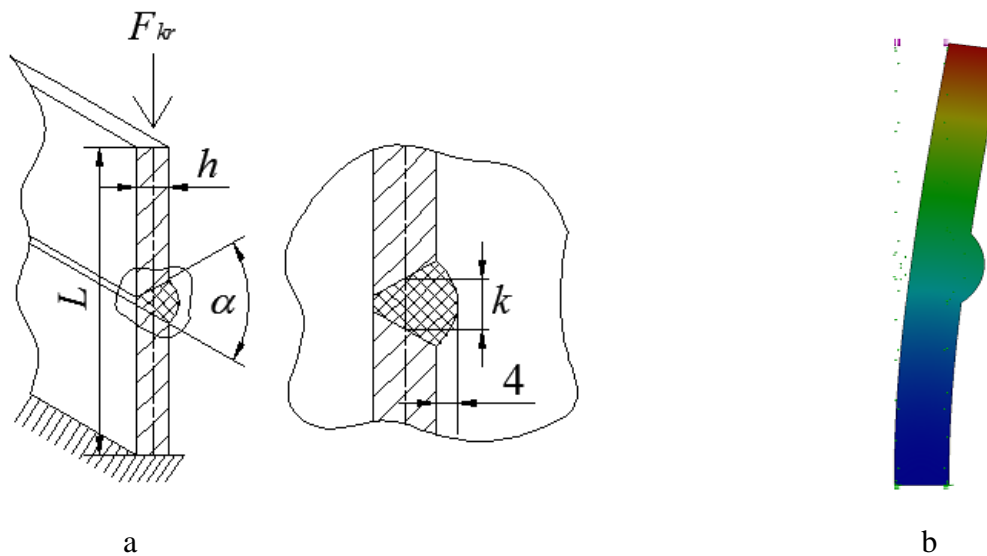
2.2. Suvirinto sujungimo klūpdymas, kai siūlė yra su rumbele

Tyrimo metu buvo analizuojamos tos pačios trys (2.1 pav.) pateiktos plokštės galu įtvirtinimo sąlygos.

Šiame skyriuje nagrinėsime santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybę nuo siūlės kampo α , santykinio siūlės aukščio κ , lakšto storio h ir mechaninio nevienalytiškumo santykio γ . Mechaninio nevienalytiškumo santykio γ reikšmes priimsime, kai suvirintas sujungimas su kieta siūle: 0,5; 0,75, o kai su minkšta siūle: 1,5; 2,0. Siūlės kampą keisime ribose nuo 10° iki 80° . Vidutinį santykinį siūlės aukštį κ keisime ribose nuo 0,2 iki 1,2. Lakšto storio h keičiame ribose nuo 4 mm. iki 10 mm. Tyrimas atliktas dviejų lakštų suvirintajam sujungimui su rumbele, kuri bus dviejų tipų. Lakšto ilgis $L = 50$ mm, storis $h = 10$ mm, plotis – begalinis (plokščias deformacijų būvis). (2.35 – 2.36 pav.) pateikiamos mechaniškai nevienalyčio suvirinto sujungimo skaičiavimo schemas su skirtingais rumbelių tipais ir po vieną nestabilumo forma.



2.35 pav. Mechaniskai nevienalyčio suvirintojo sujungimo su rumbele, kai rumbelės iš abiejų pusių, skaičiavimo schema (a) ir viena nestabilumo forma (b), kai: $\mu = 2$; $\gamma = 2,0$; $\kappa = 0,1$; $h = 10 \text{ mm}$; $L = 100 \text{ mm}$; $\alpha = 60^\circ$. Gauta $F_{kr}^{BEM} = 44,316 \text{ kN}$

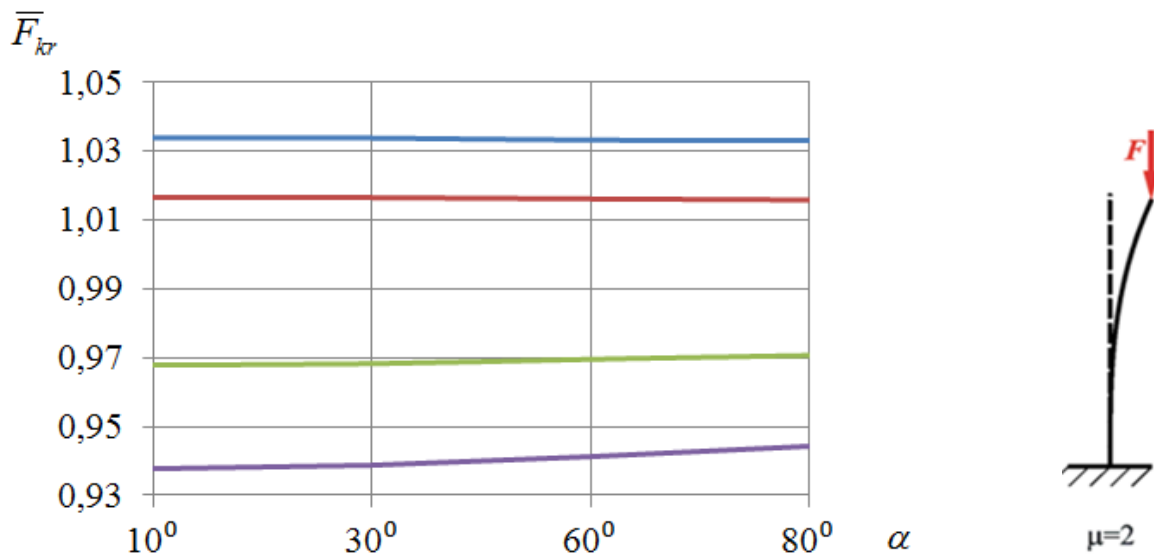


2.36 pav. Mechaniskai nevienalyčio suvirintojo sujungimo su rumbele, kai rumbelė iš vienos pusės, skaičiavimo schema (a) ir viena nestabilumo forma (b), kai: $\mu = 2$; $\gamma = 0,5$; $\kappa = 0,1$; $h = 10 \text{ mm}$; $L = 100 \text{ mm}$; $\alpha = 60^\circ$. Gauta $F_{kr}^{BEM} = 48,603 \text{ kN}$

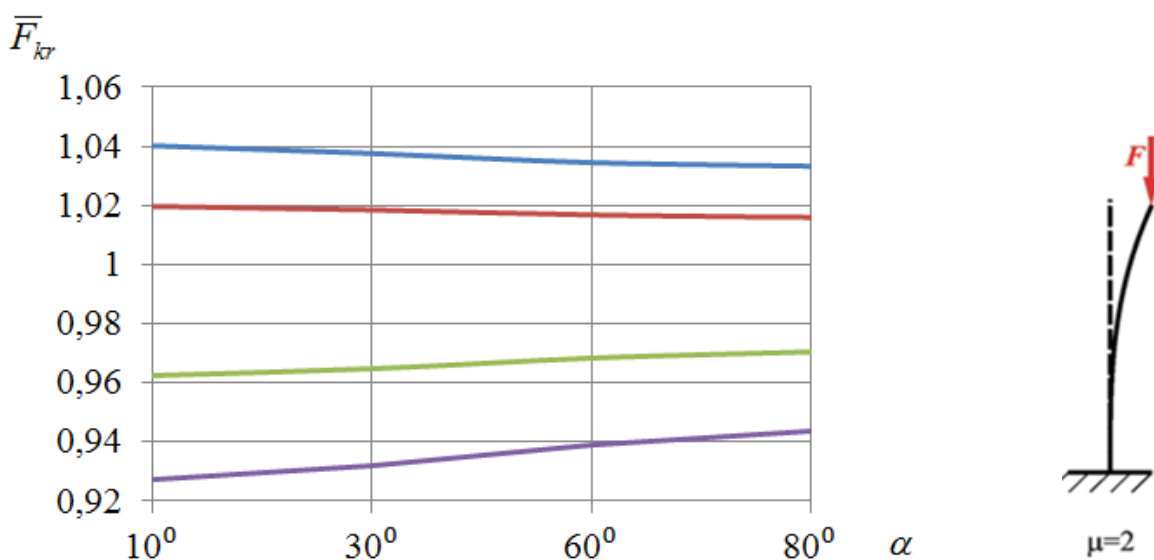
2.2.1. Kritinės jėgos priklausomybė nuo sujungimo geometrijos

Priklausomybė nuo siūlės kampo

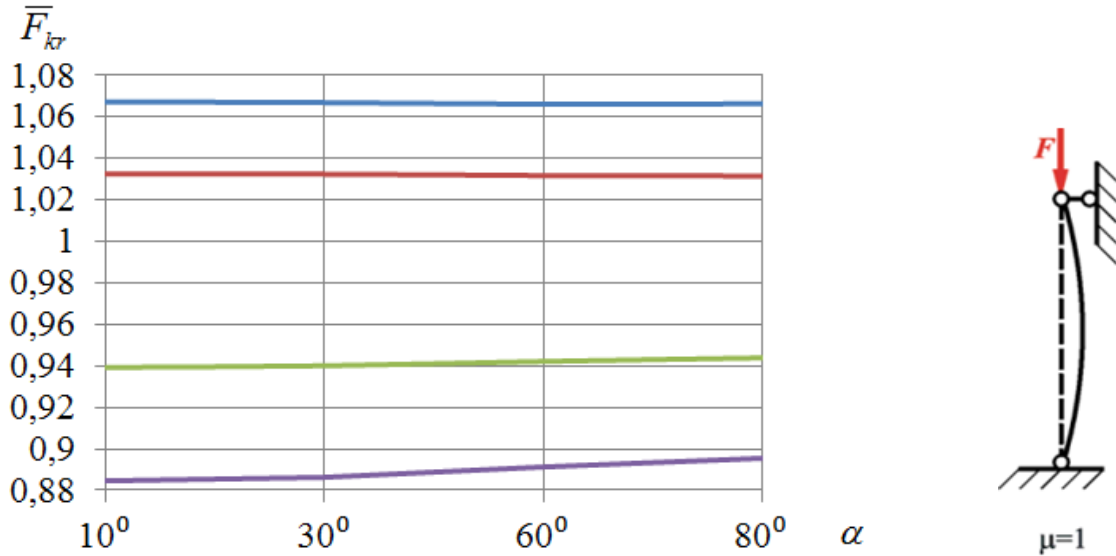
Nagrinesime santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybę nuo siūlės kampo α . Siūlės kampo α reikšmes paimsime: 10° , 30° , 60° , 90° . Mechaninio nevienalytiškumo santykio γ reikšmes priimsime, kai kieta siūlė: 0,5; 0,75, o kai minkšta siūlė: 1,5; 2,0.



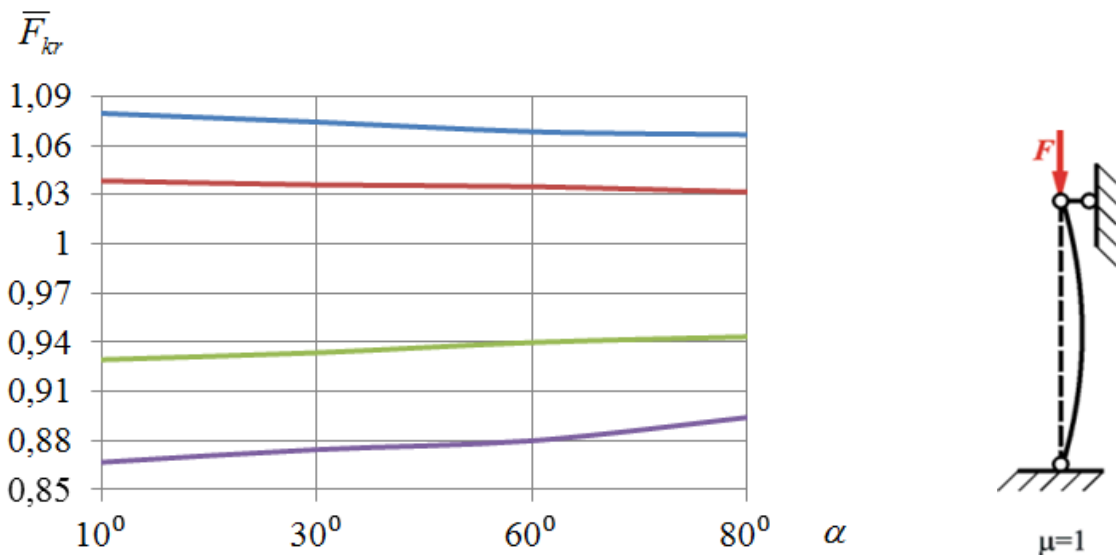
2.37 pav. Santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybė nuo siūlės kampo α ir mechaninio nevienalytiškumo santykio γ , kada tiriamas suvirintą sujungimą su dviem rumbelėmis (2.35 pav.), kai $\mu = 2$; $h = 10\text{mm}$; $\kappa = 1,0$, čia: (—) – $\gamma = 0,5$; (—) – $\gamma = 0,75$; (—) – $\gamma = 1,5$; (—) – $\gamma = 2,0$



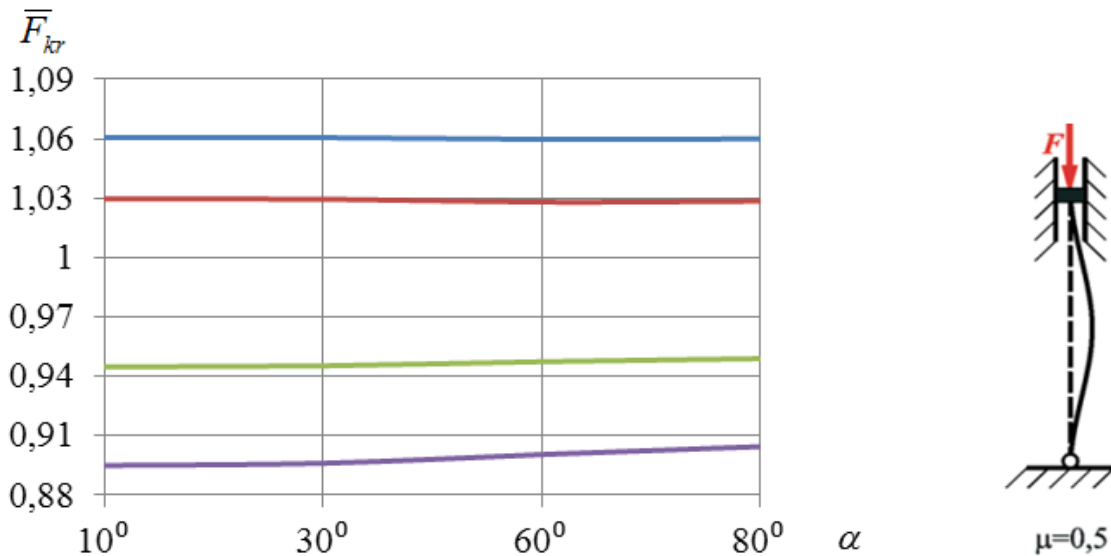
2.38 pav. Santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybė nuo siūlės kampo α ir mechaninio nevienalytiškumo santykio γ , kada tiriamas suvirintą sujungimą su viena rumbele (2.36 pav.), kai $\mu = 2$; $h = 10$ mm; $\kappa = 1,0$, čia: (—) – $\gamma = 0,5$; (—) – $\gamma = 0,75$; (—) – $\gamma = 1,5$; (—) – $\gamma = 2,0$



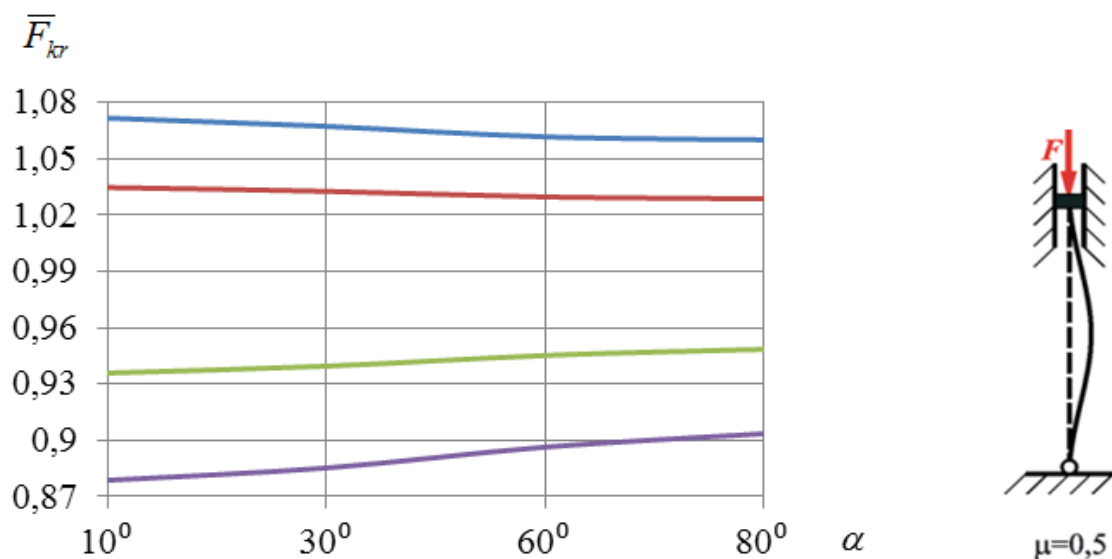
2.39 pav. Santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybė nuo siūlės kampo α ir mechaninio nevienalytiškumo santykio γ , kada tiriamas suvirintą sujungimą su dviem rumbelėmis (2.35 pav.), kai $\mu = 1$; $h = 10$ mm; $\kappa = 1,0$, čia: (—) – $\gamma = 0,5$; (—) – $\gamma = 0,75$; (—) – $\gamma = 1,5$; (—) – $\gamma = 2,0$



2.40 pav. Santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybė nuo siūlės kampo α ir mechaninio nevienalytiškumo santykio γ , kada tiriamas suvirintą sujungimą su viena rumbele (2.36 pav.), kai $\mu = 1$; $h = 10$ mm; $\kappa = 1,0$, čia: (—) – $\gamma = 0,5$; (—) – $\gamma = 0,75$; (—) – $\gamma = 1,5$; (—) – $\gamma = 2,0$



2.41 pav. Santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybė nuo siūlės kampo α ir mechaninio nevienalytiškumo santykio γ , kada tiriamas suvirintą sujungimą su dviem rumbelėmis (2.35 pav.), kai $\mu = 0,5$; $h = 10$ mm; $\kappa = 1,0$, čia: (—) – $\gamma = 0,5$; (—) – $\gamma = 0,75$; (—) – $\gamma = 1,5$; (—) – $\gamma = 2,0$



2.42 pav. Santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybė nuo siūlės kampo α ir mechaninio nevienalytiškumo santykio γ , kada tiriamas suvirintą sujungimą su viena rumbele (2.36 pav.), kai $\mu = 0,5$; $h = 10$ mm; $\kappa = 1,0$, čia: (—) – $\gamma = 0,5$; (—) – $\gamma = 0,75$; (—) – $\gamma = 1,5$; (—) – $\gamma = 2,0$

Iš pavaizduotų grafikų (2.37 – 2.42 pav.) matyti, kad nepriklausomai nuo įtvirtinimo būdo, kai suvirintas sujungimas su kieta siūle, santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} reikšmė mažėja, o su minkšta siūle - \bar{F}_{kr} didėja.

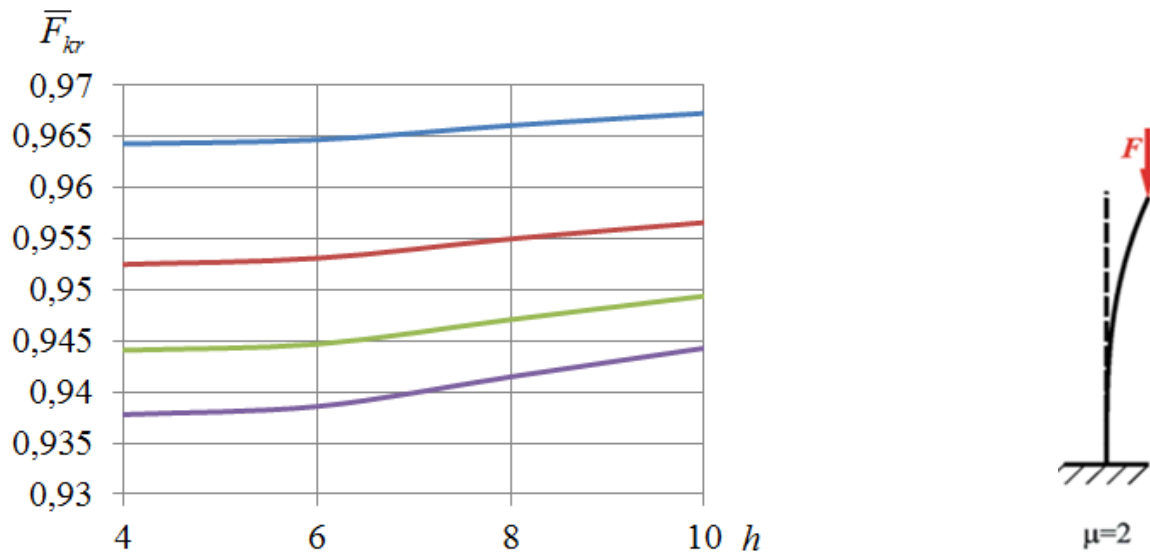
Kada tiriamas pagal 2.35 pav. pavaizduotą skaičiuojamąją schemą, siūlės kampą α padidini nuo 10° iki 80° , didžiausias santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} pokytis pastebimas, kai siūlės sujungimas su minkšta siūle prie $\gamma = 2,0$, lakšto įtvirtinimas $\mu = 1$. \bar{F}_{kr} reikšmė padidėja 1,01 karto ir 1,2 %.

Kada tiriamas pagal 2.36 pav. pavaizduotą skaičiuojamąją schemą, didžiausias santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} pokytis pastebimas taip pat kada siūlės sujungimas su minkšta siūle prie $\gamma = 2,0$, lakšto įtvirtinimas $\mu = 1$. \bar{F}_{kr} reikšmė padidėja 1,03 karto ir 3,15 %.

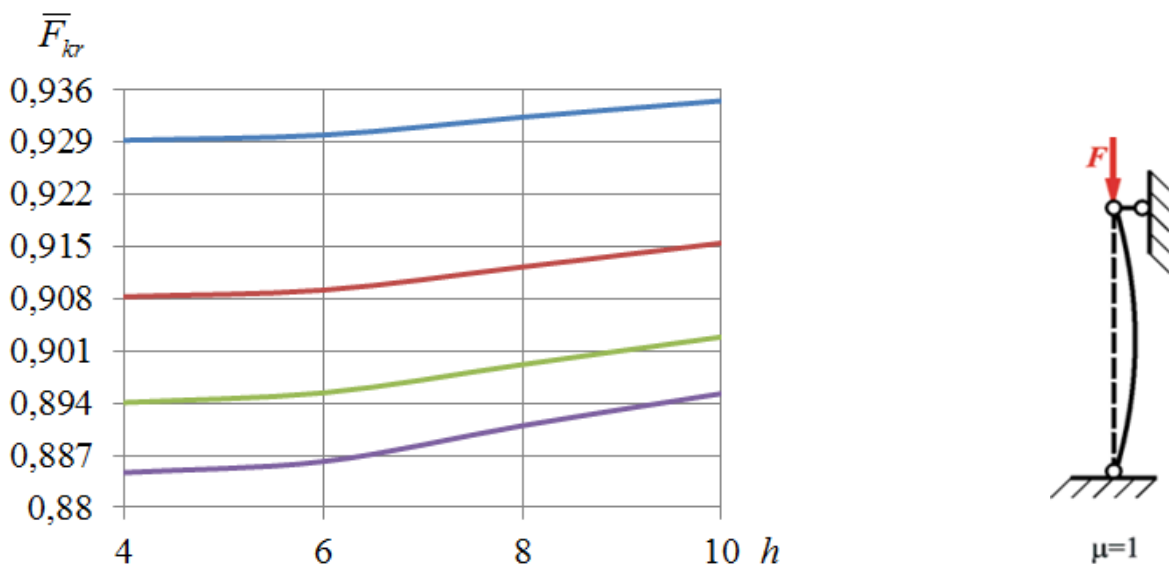
Taigi pastebime, kad 1,95 % gauname didesnę santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} reikšmės pokytį, kai tiriamas skaičiavimo schemą su dviem rumbelėmis (2.35 pav.) nei su viena rumbele (2.36 pav.).

Priklausomybė nuo lakšto storio

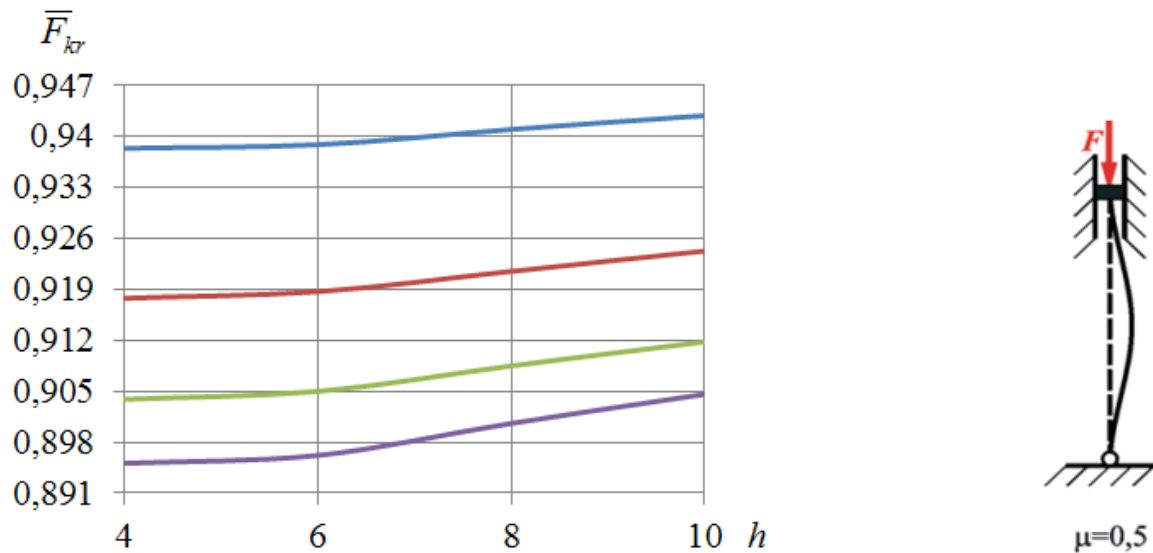
Nagrinėsime kaip santykinė kritinė jėga \bar{F}_{kr} priklauso nuo lakšto storio h , kurį keičiame ribose nuo 4 mm. iki 10 mm., žingsniu kas 2 mm. Taip pat nuo siūlės kampo α , vidutinio santykinio siūlės aukščio κ , kurį priimsime 1,0. Galų įtvirtinimo, rumbelės tipo bei mechaninio nevienalytiškumo santykio γ , kai minkšta siūlė $\gamma = 2,0$, o kai kieta siūlė $\gamma = 0,5$.



2.43 pav. Santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybė nuo lakšto storio h ir mechaninio nevienalytiškumo santykio γ kada tiriamame suvirintą sujungimą su dviem rumbelėmis (2.35 pav.), kai $\mu = 2$; $\gamma = 2,0$; $\kappa = 1,0$, čia: (—) – $\alpha = 10^\circ$; (—) – $\alpha = 30^\circ$; (—) – $\alpha = 60^\circ$; (—) – $\alpha = 80^\circ$

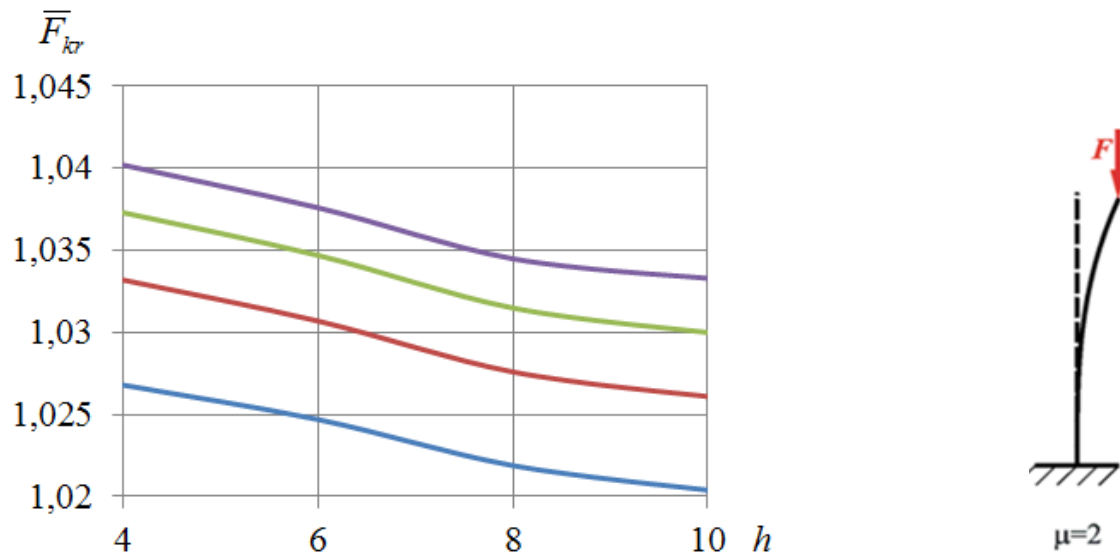


2.44 pav. Santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybė nuo lakšto storio h ir mechaninio nevienalytiškumo santykio γ kada tiriamame suvirintą sujungimą su dviem rumbelėmis (2.35 pav.), kai $\mu = 1$; $\gamma = 2,0$; $\kappa = 1,0$, čia: (—) – $\alpha = 10^\circ$; (—) – $\alpha = 30^\circ$; (—) – $\alpha = 60^\circ$; (—) – $\alpha = 80^\circ$

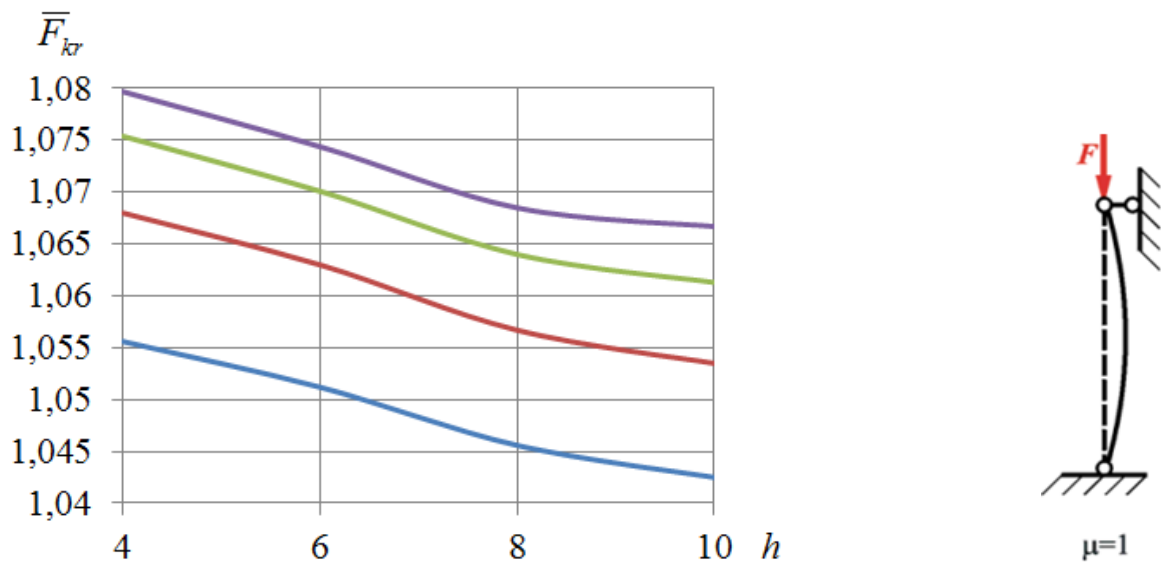


2.45 pav. Santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybė nuo lakšto storio h ir mechaninio nevienalytiškumo santykio γ kada tiriamame suvirintą sujungimą su dviem rumbelėmis (2.35 pav.), kai $\mu = 0,5$; $\gamma = 2,0$; $\kappa = 1,0$, čia: (—) – $\alpha = 10^\circ$; (—) – $\alpha = 30^\circ$; (—) – $\alpha = 60^\circ$; (—) – $\alpha = 80^\circ$

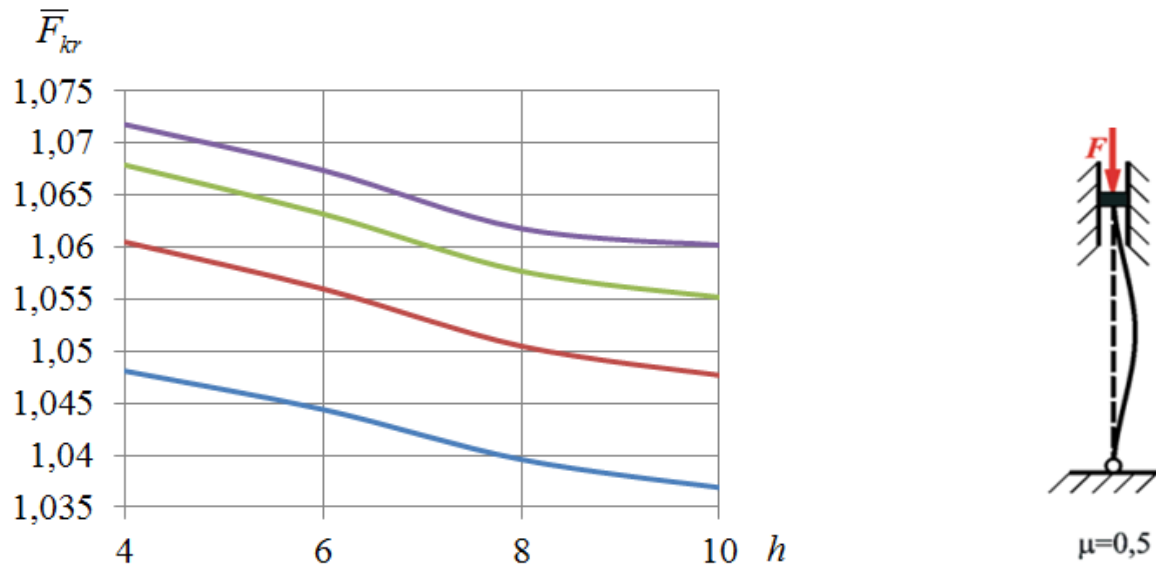
Ištirę suvirinto sujungimo su dviem rumbelėmis (2.35 pav.) santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybę nuo lakšto storio h prie minkštos siūlės, kurios mechaninio nevienalytiškumo santykis $\gamma = 2,0$, matome kad didinat lakšto storį į storesnį, santykinės kritinės jėgos reikšmė didėja nepriklausomai nuo įtvirtinimo tipo. Didžiausias santykinės kritinės jėgos pokytis pastebimas, kai lakšto storis 10 mm prie įtvirtinimo $\mu = 1$. \bar{F}_{kr} padidėja 1,01 karto ir 1,2 %. O mažiausias \bar{F}_{kr} pokytis, kai lakšto storis 4 mm prie įtvirtinimo $\mu = 2$. \bar{F}_{kr} padidėja vos 1,003 karto ir 0,3 % (2.43 – 2.45 pav.).



2.46 pav. Santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybė nuo lakšto storio h ir mechaninio nevienalytiškumo santykio γ kada tiriamas suvirintą sujungimą su viena rumbele (2.36 pav.), kai $\mu = 2$; $\gamma = 0,5$; $\kappa = 1,0$, čia: (—) – $\alpha = 10^\circ$; (—) – $\alpha = 30^\circ$; (—) – $\alpha = 60^\circ$; (—) – $\alpha = 80^\circ$



2.47 pav. Santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybė nuo lakšto storio h ir mechaninio nevienalytiškumo santykio γ kada tiriamas suvirintą sujungimą su viena rumbele (2.36 pav.), kai $\mu = 1$; $\gamma = 0,5$; $\kappa = 1,0$, čia: (—) – $\alpha = 10^\circ$; (—) – $\alpha = 30^\circ$; (—) – $\alpha = 60^\circ$; (—) – $\alpha = 80^\circ$



2.48 pav. Santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybė nuo lakšto storio h ir mechaninio nevienalytiškumo santykio γ kada tiriamas suvirintą sujungimą su viena rumbele (2.36 pav.), kai $\mu = 0,5$; $\gamma = 0,5$; $\kappa = 1,0$, čia: (—) – $\alpha = 10^\circ$; (—) – $\alpha = 30^\circ$; (—) – $\alpha = 60^\circ$; (—) – $\alpha = 80^\circ$

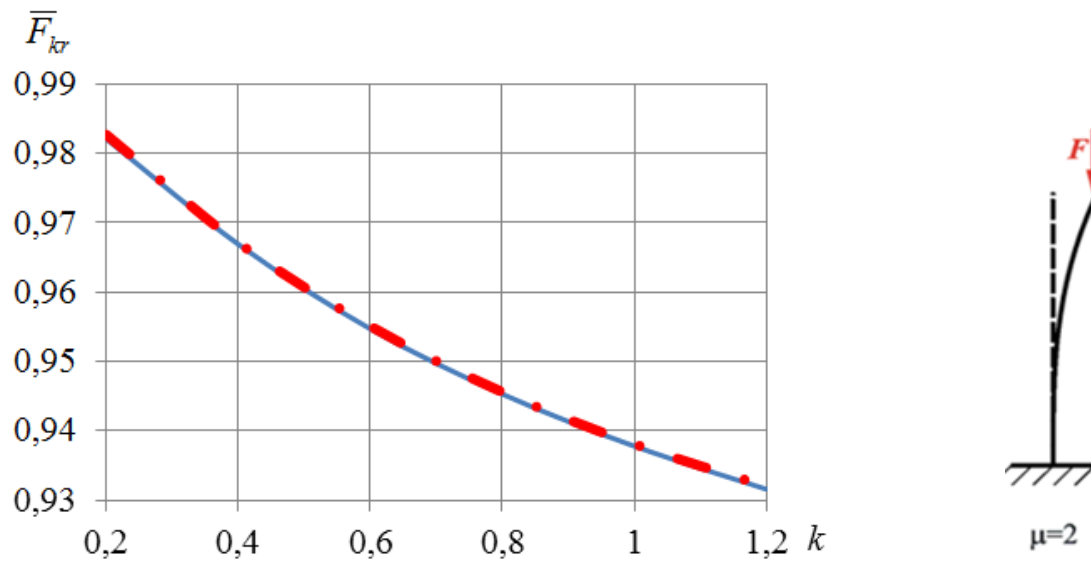
Ištirę suvirinto sujungimo su viena rumbele (2.36 pav.) santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybę nuo lakšto storio h prie kietosios siūlės, kai mechaninio nevienalytiškumo santykis $\gamma = 0,5$, matome kad didinat lakšto storį į storesnį, santykinės kritinės jėgos reikšmė didėja nepriklausomai nuo įtvirtinimo tipo, tačiau didėjant siūlės kampui \bar{F}_{kr} mažėja. Didžiausias santykinės kritinės jėgos pokytis pastebimas, kai lakšto storis 6 mm prie įtvirtinimo $\mu = 1$. \bar{F}_{kr} sumažėja 0,98 karto ir 1,4 %. O mažiausias \bar{F}_{kr} pokytis, kai lakšto storis 4 mm prie įtvirtinimo $\mu = 2$. \bar{F}_{kr} sumažėja 0,99 karto ir 0,63 % (2.46 – 2.48 pav.).

Taigi kada kludome suvirintą sujungimą su minkšta siule, santykinė kritinė jėga tampa pavojingiausia prie įtvirtinimo $\mu = 1$ ir kada kludome 10 mm lakšto storį. O kada tyrimą atliekame su kieta siule, santykinė kritinė jėga tampa pavojingiausia prie įtvirtinimo $\mu = 2$ ir kada kludome 4 mm lakšto storį.

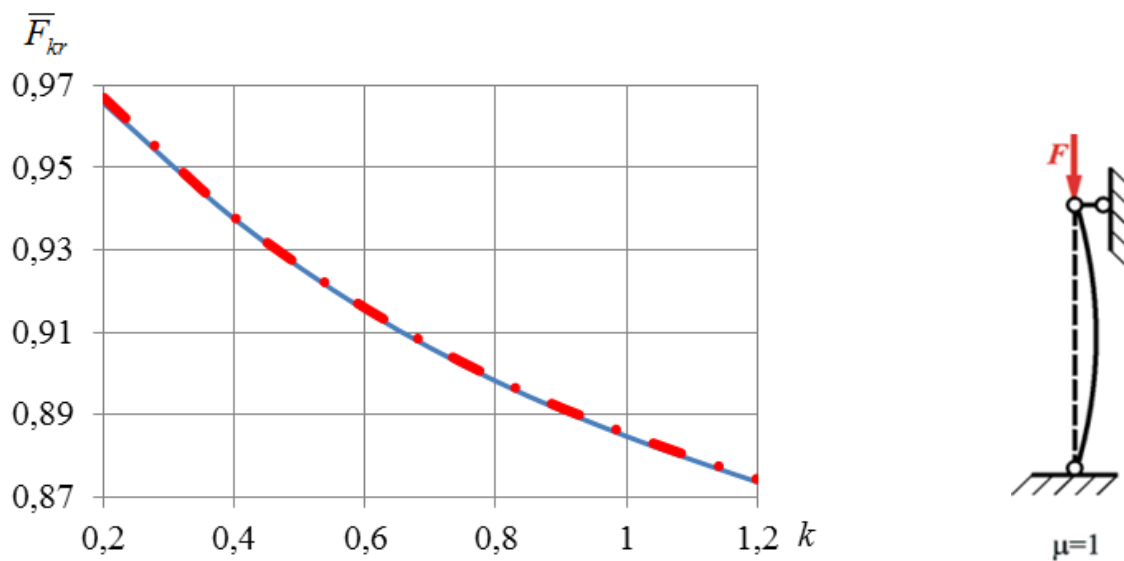
Priklausomybė nuo vidutinio santykinio siūlės aukščio

Nagrinėsime kaip santykinė kritinė jėga \bar{F}_{kr} priklauso nuo vidutinio siūlės santykinio aukščio κ , kurį keisime ribose nuo 0,2 iki 1,2, žingsniu 0,2, nuo siūlės kampo α , kurio vertes

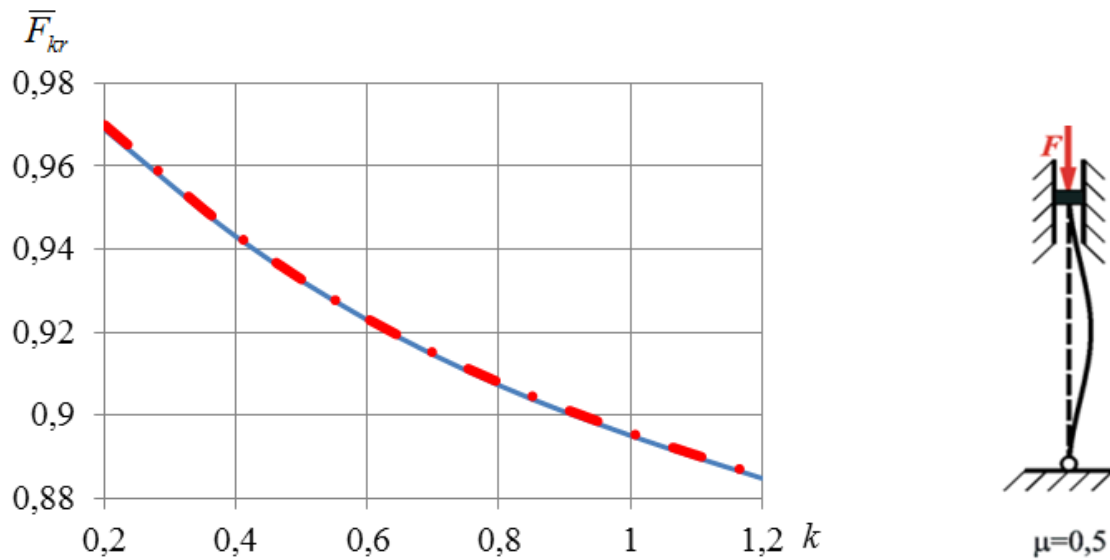
naudosime 10° , 20° , galų įtvirtinimo ir rumbelės tipo. Lakšto storį naudosime $h = 10$ mm, o mechaninio nevienalytiškumo santykį γ kai minkšta siūlė 2,0, o kai kieta siūlė 0,5.



2.49 pav. Santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybė nuo vidutinio santykinio siūlės aukščio k ir siūlės kampo α kada tiriamame suvirintą sujungimą su dviem rumbelėmis (2.35 pav.), kai $\gamma = 2,0$; $\mu = 2$; $h = 10$ mm; čia: (—) – $\alpha = 10^\circ$; (• - - - •) – $\alpha = 20^\circ$

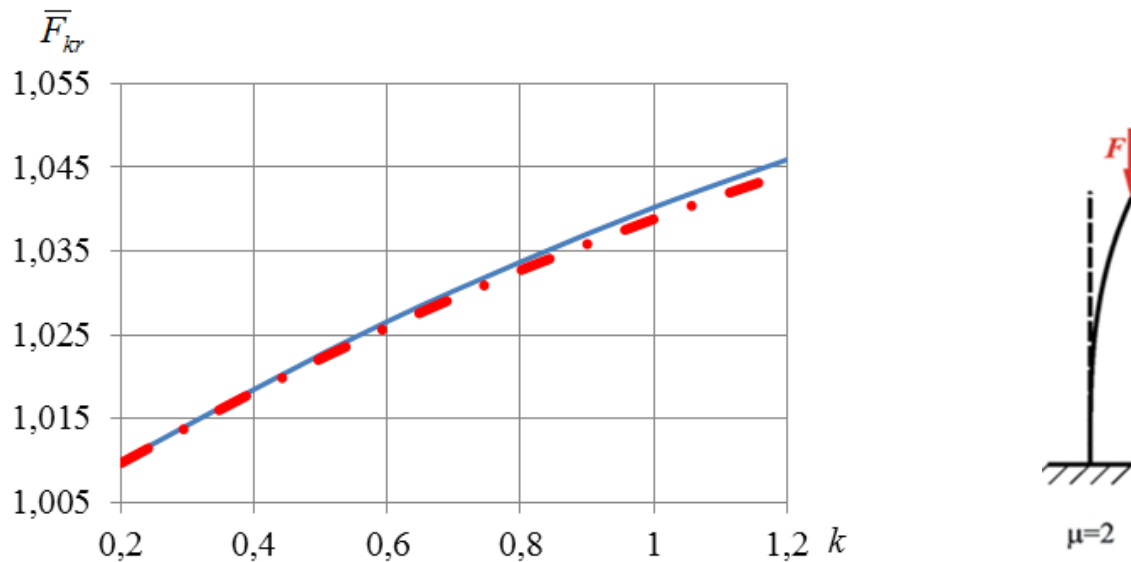


2.50 pav. Santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybė nuo vidutinio santykinio siūlės aukščio k ir siūlės kampo α kada tiriamame suvirintą sujungimą su dviem rumbelėmis (2.35 pav.), kai $\gamma = 2,0$; $\mu = 1$; $h = 10$ mm; čia: (—) – $\alpha = 10^\circ$; (• - - - •) – $\alpha = 20^\circ$

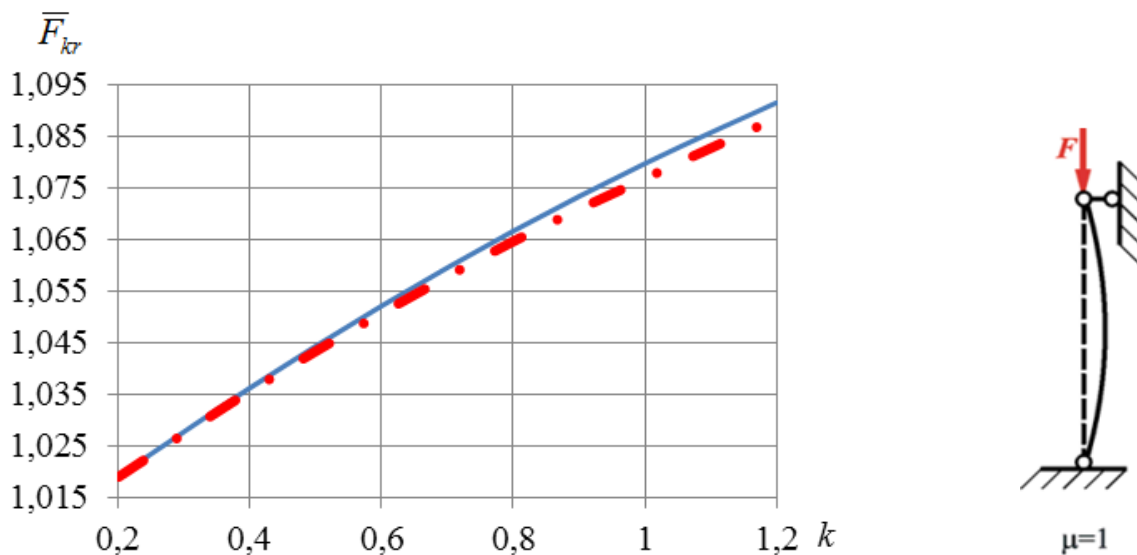


2.51 pav. Santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybė nuo vidutinio santykinio siūlės aukščio κ ir siūlės kampo α kada tiriamame suvirintą sujungimą su dviejomis rumbelėmis (2.35 pav.), kai $\gamma = 2,0$; $\mu = 0,5$; $h = 10$ mm; čia: (—) – $\alpha = 10^\circ$; (• - - - •) – $\alpha = 20^\circ$

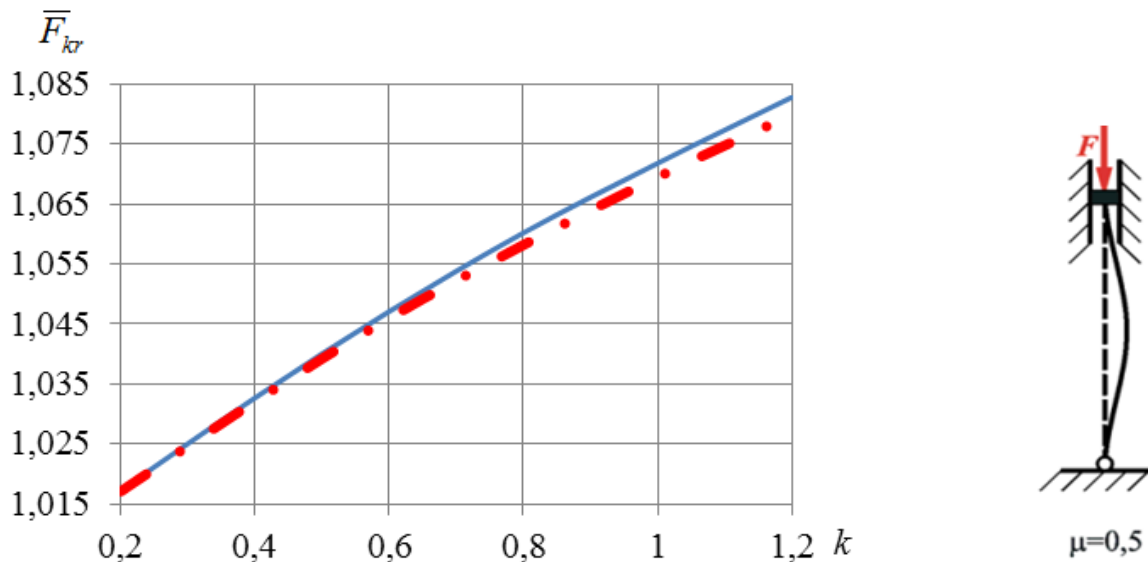
Ištirę suvirinto sujungimo su dviejomis rumbelėmis (2.35 pav.) santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybę nuo vidutinio siūlės santykinio aukščio κ prie minkštos siūlės, kai mechaninio nevienalytiškumo santykis $\gamma = 2,0$, matome kad didinat vidutinį santykinį siūlės aukštį, santykinės kritinės jėgos reikšmė mažėja nepriklausomai nuo įtvirtinimo tipo. Didžiausias santykinės kritinės jėgos pokytis pastebimas, kai siūlės kampas $\alpha = 10^\circ$ prie įtvirtinimo $\mu = 0,5$. \bar{F}_{kr} sumažėja 0,91 karto - 9,5 %. O mažiausias \bar{F}_{kr} pokytis, kai siūlės kampas $\alpha = 20^\circ$ prie įtvirtinimo $\mu = 2$. \bar{F}_{kr} sumažėja 0,88 karto - 5,4 % (2.49 – 2.51 pav.).



2.52 pav. Santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybė nuo vidutinio santykinio siūlės aukščio κ ir siūlės kampo α kada tiriamame suvirintą sujungimą su viena rumbele (2.36 pav.), kai $\gamma = 0,5$; $\mu = 2$; $h = 10$ mm; čia: (—) – $\alpha = 10^\circ$; (• - - - •) – $\alpha = 20^\circ$



2.53 pav. Santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybė nuo vidutinio santykinio siūlės aukščio κ ir siūlės kampo α kada tiriamame suvirintą sujungimą su viena rumbele (2.36 pav.), kai $\gamma = 0,5$; $\mu = 1$; $h = 10$ mm; čia: (—) – $\alpha = 10^\circ$; (• - - - •) – $\alpha = 20^\circ$



2.54 pav. Santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybė nuo vidutinio santykinio siūlės aukščio κ ir siūlės kampo α kada tiriamame suvirintą sujungimą su viena rumbele (2.36 pav.), kai $\gamma = 0,5$; $\mu = 0,5$; $h = 10$ mm; čia: (—) – $\alpha = 10^\circ$; (• - - - •) – $\alpha = 20^\circ$

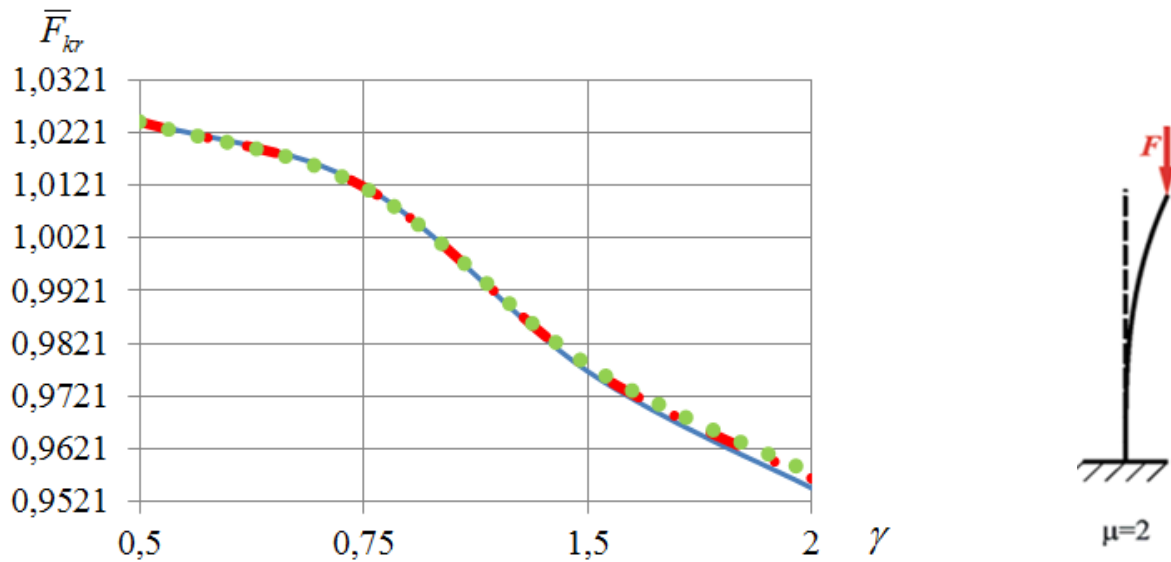
Ištirę suvirinto sujungimo su viena rumbele (2.36 pav.) santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybę nuo vidutinio siūlės santykinio aukščio κ prie kietosios siūlės, kai mechaninio nevienalytiškumo santykis $\gamma = 0,5$ matome, kad didinat vidutinį santykinį siūlės aukštį, atvirkščiai nei prie minkštosios siūlės, santykinės kritinės jėgos reikšmė mažėja nepriklausomai nuo įtvirtinimo tipo. Didžiausias santykinės kritinės jėgos pokytis pastebimas, kai siūlės kampas $\alpha = 10^\circ$ prie įtvirtinimo $\mu = 1$. \bar{F}_{kr} padidėja 1,07 karto – 7,1 %. O mažiausias \bar{F}_{kr} pokytis, kai siūlės kampas $\alpha = 20^\circ$ prie įtvirtinimo $\mu = 2$. \bar{F}_{kr} padidėja 1,03 karto – 3,4 % (2.52 – 2.54 pav.).

Taigi pastebime, kad pavojingiausia klubdomam suvirintajam sujungimui santykinė kritinė jėga gaunama prie minkštosios siūlės ir įtvirtinimo $\mu = 1$ (2.50 pav.).

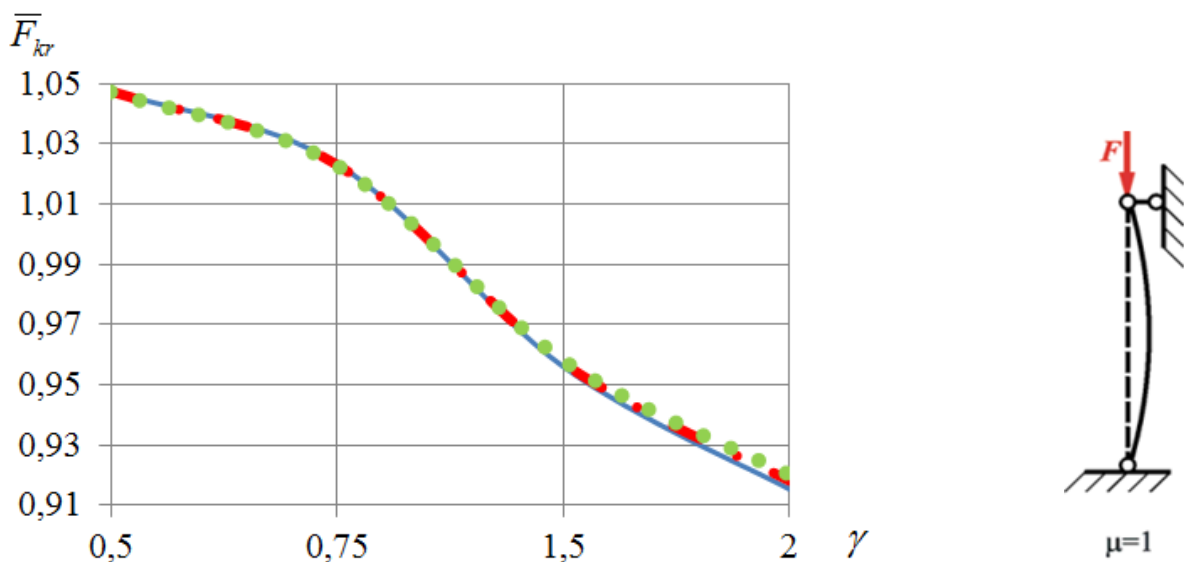
2.2.2. Kritinės jėgos priklausomybė nuo sujungimo mechaninio nevienalytiškumo

Priklausomybė nuo pagrindinės ir siūlės medžiagų tamprumo modulių santykio, kai keičiamas siūlės kampas

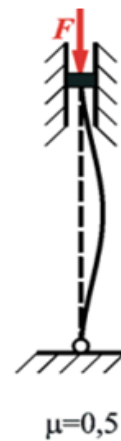
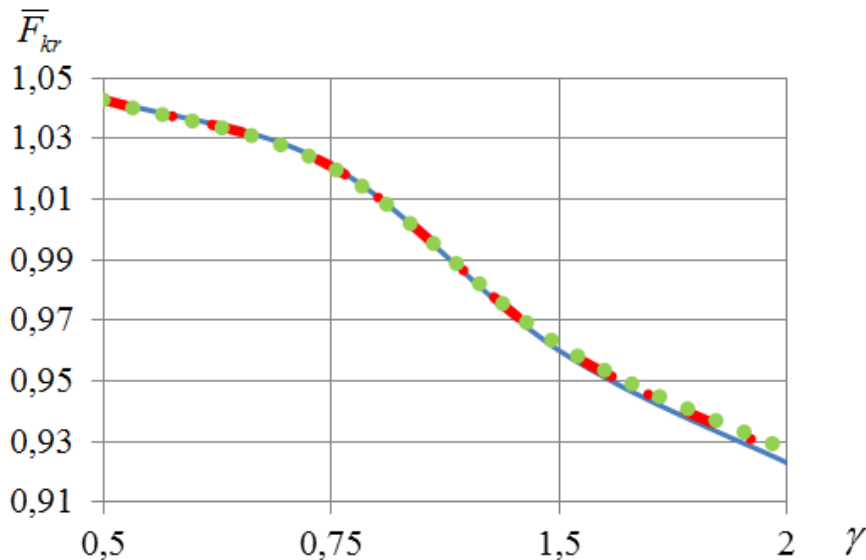
Nagrinėsime kaip santykinė kritinė jėga \bar{F}_{kr} priklauso nuo pagrindinės ir siūlės medžiagų tamprumo modulių santykio γ ir siūlės kampo α , kai keičiamas vidutinis santykinis siūlės aukštis κ , galų įtvirtinimas ir suvirinto sujungimo rumbelių tipai. Siūlės kampa α naudosisime 10° , 20° , 40° , 50° , o mechaninio nevienalytiškumo vertes γ priimsime: 0,5; 0,75; 1,5; 2,0.



2.55 pav. Santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybė nuo pagrindinės ir siūlės medžiagų tamprumo modulių santykio γ ir siūlės kampo α , kada tiriamas suvirintą sujungimą su dviem rumbelėmis (2.35 pav.), kai $\mu = 2$, $\kappa = 0,6$, $h = 10$ mm, čia: (—) – $\alpha = 10^\circ$; (• - - • - - •) – $\alpha = 40^\circ$; (•••••) – $\alpha = 50^\circ$

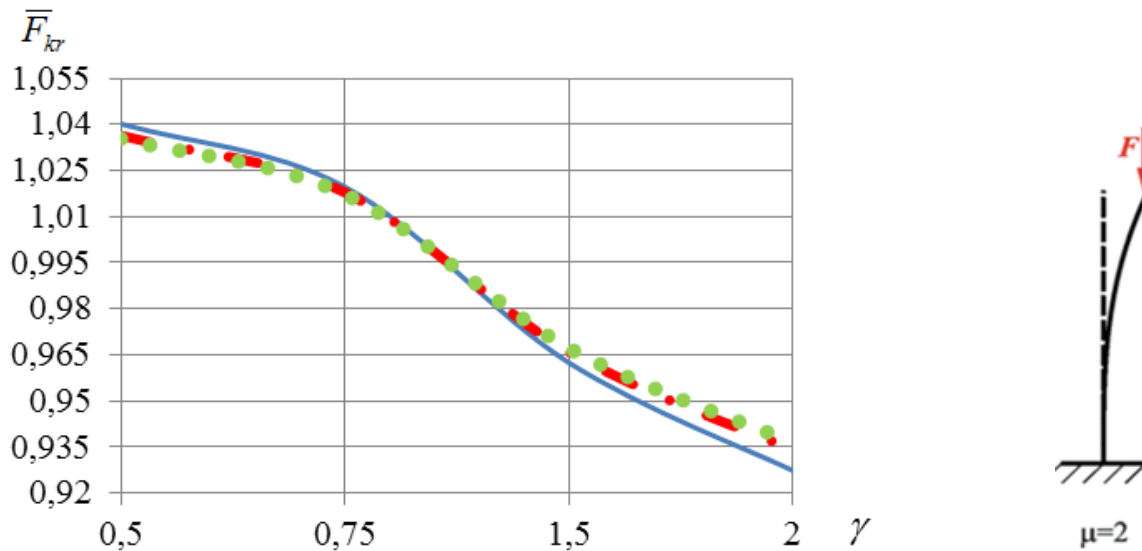


2.56 pav. Santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybė nuo pagrindinės ir siūlės medžiagų tamprumo modulių santykio γ ir siūlės kampo α , kada tiriamas suvirintą sujungimą su dviem rumbelėmis (2.35 pav.), kai $\mu = 1$, $\kappa = 0,6$, $h = 10$ mm, čia: (—) – $\alpha = 10^\circ$; (•—•—•—•) – $\alpha = 40^\circ$; (•••••) – $\alpha = 50^\circ$

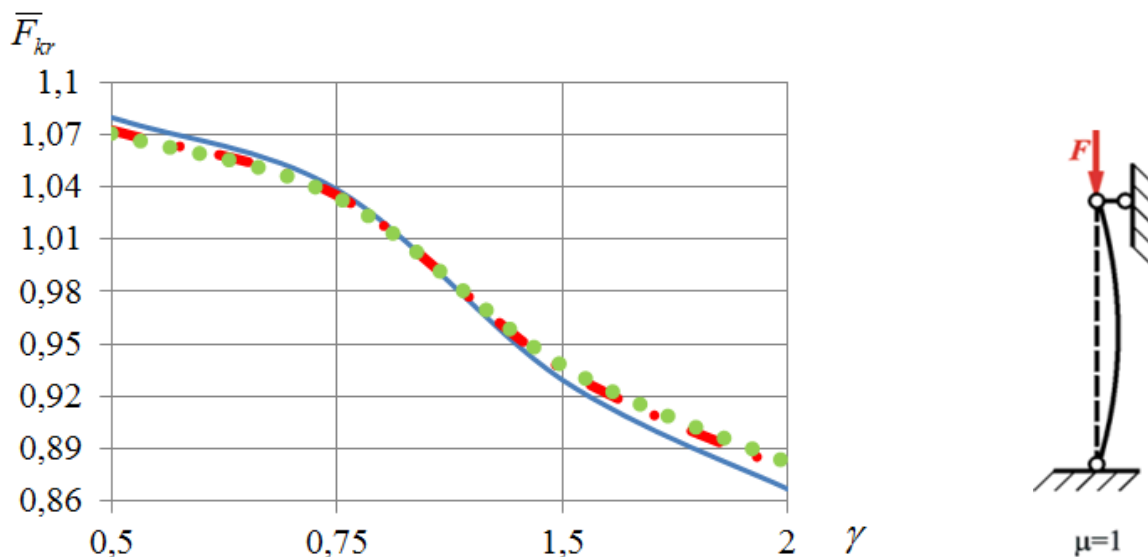


2.57 pav. Santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybė nuo pagrindinės ir siūlės medžiagų tamprumo modulių santykio γ ir siūlės kampo α , kada tiriamas suvirintą sujungimą su dviem rumbelėmis (2.35 pav.), kai $\mu = 0,5$, $\kappa = 0,6$, $h = 10$ mm, čia: (—) – $\alpha = 10^\circ$; (•—•—•—•) – $\alpha = 40^\circ$; (•••••) – $\alpha = 50^\circ$

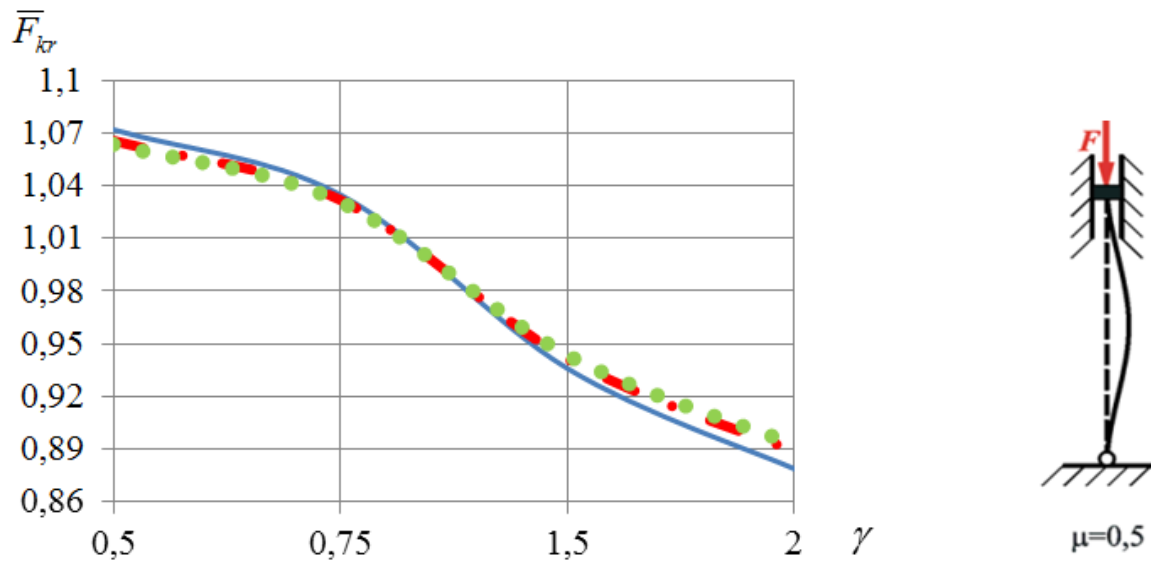
Iš šių (2.55 – 2.57 pav.) matyti, kad tiriant, suvirinto sujungimo su dviem rumbelėmis, santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybę nuo mechaninio nevienalytiškumo vertės bei nuo siūlės kampo ir keičiant mechaninio nevienalytiškumo santykio γ vertę į didesnę pusę, santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} reikšmė mažėja, nepriklausomai nuo įtvirtinimo būdo. Didžiausias santykinės kritinės jėgos pokytis pastebimas, kai siūlės kampas $\alpha = 10^\circ$ prie įtvirtinimo $\mu = 1$. \bar{F}_{kr} sumažėja 1,14 karto – 14,4 %. O mažiausias \bar{F}_{kr} pokytis, kai siūlės kampas $\alpha = 50^\circ$ prie įtvirtinimo $\mu = 2$. \bar{F}_{kr} sumažėja 1,07 karto – 6,9 %. Pavojingiausia santykinė kritinė jėga gaunama prie minkštosios siūlės - $\bar{F}_{kr} = 0,9153$ kN, kai $\gamma = 2,0$; $\mu = 1$; $\alpha = 10^\circ$; (2.56 pav.).



2.58 pav. Santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybė nuo pagrindinės ir siūlės medžiagų tamprumo modulių santykio γ ir siūlės kampo α , kada tiriamas suvirintą sujungimą su viena rumbele (5.6 pav.), kai $\mu = 2$, $\kappa = 1,0$, $h = 10$ mm, čia: (—) – $\alpha = 10^\circ$; (· - - · - - ·) – $\alpha = 40^\circ$; (· · · · ·) – $\alpha = 50^\circ$



2.59 pav. Santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybė nuo pagrindinės ir siūlės medžiagų tamprumo modulių santykio γ ir siūlės kampo α , kada tiriamas suvirintą sujungimą su viena rumbele (5.6 pav.), kai $\mu = 1$, $\kappa = 1,0$, $h = 10$ mm, čia: (—) – $\alpha = 10^\circ$; (· - - · - - ·) – $\alpha = 40^\circ$; (· · · · ·) – $\alpha = 50^\circ$

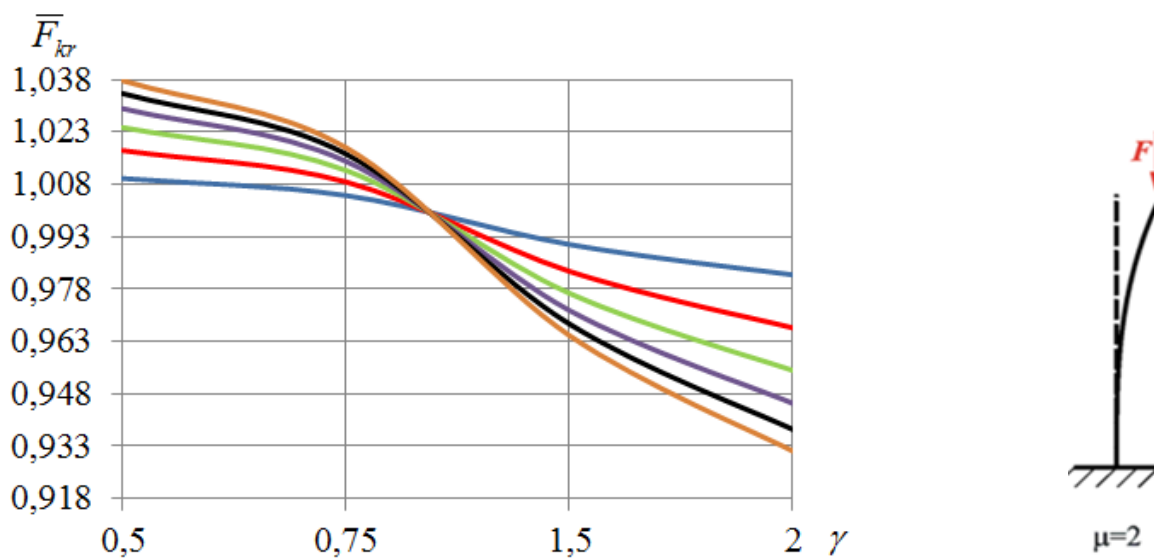


2.60 pav. Santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybė nuo pagrindinės ir siūlės medžiagų tamprumo modulių santykio γ ir siūlės kampo α , kada tiriamas suvirintą sujungimą su viena rumbele (5.6 pav.), kai $\mu = 0,5$, $\kappa = 1,0$, $h = 10$ mm, čia: (—) – $\alpha = 10^\circ$; (· — · — ·) – $\alpha = 40^\circ$; (· · · · ·) – $\alpha = 50^\circ$

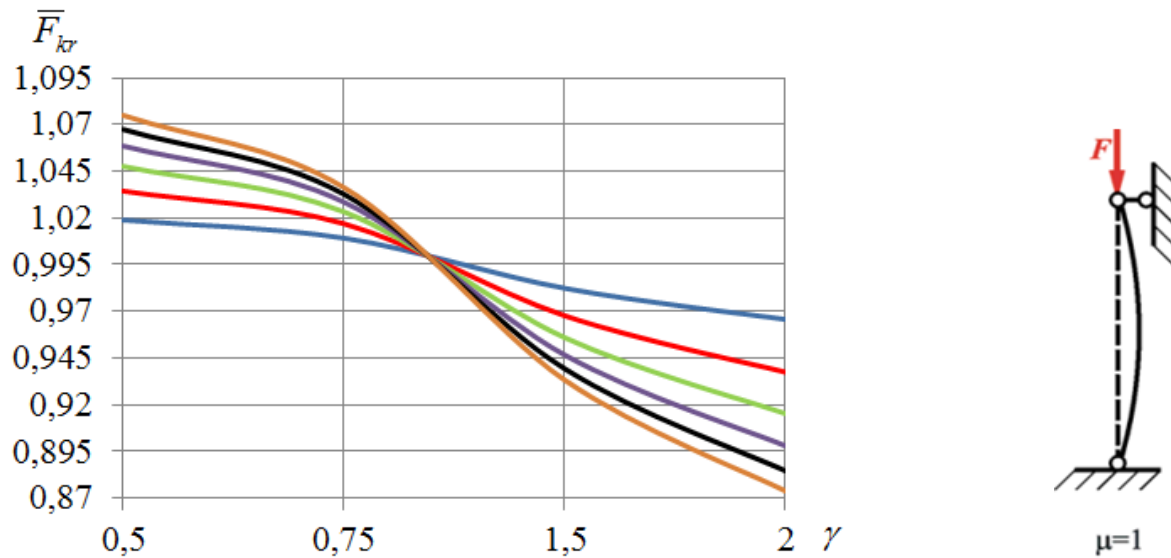
Tiriant suvirinto sujungimo su viena rumbele santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybę nuo mechaninio nevienalytiškumo vertės bei nuo siūlės kampo ir keičiant mechaninio nevienalytiškumo santykio γ vertę į didesnę pusę, santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} reikšmė taip pat mažėja, nepriklausomai nuo įtvirtinimo būdo (2.58 – 2.60 pav.). Didžiausias santykinės kritinės jėgos pokytis pastebimas, kai siūlės kampas $\alpha = 10^\circ$ prie įtvirtinimo $\mu = 1$. \bar{F}_{kr} sumažėja 1,24 karto – 24,5 %. O mažiausias \bar{F}_{kr} pokytis, kai siūlės kampas $\alpha = 50^\circ$ prie įtvirtinimo $\mu = 2$. \bar{F}_{kr} sumažėja 1,1 karto – 10,5 %. Pavojingiausia santykinė kritinė jėga gaunama prie minkštosios siūlės - $\bar{F}_{kr} = 0,8669$ kN, kai $\gamma = 2,0$; $\mu = 1$; $\alpha = 10^\circ$; (2.59 pav.). Abiem atvejais kada tiriamas suvirintą sujungimą su viena rumbele ar su dviejomis rumbelėmis, santykinių kritinių jėgų reikšmės labai artimos vienos kitai, tačiau pavojingesnė santykinė kritinė jėga gaunama kada klupdome suvirintą sujungimą su viena rumbele.

Priklausomybė nuo pagrindinės ir siūlės medžiagų tamprumo modulių santykio bei vidutinio santykinio siūlės aukščio

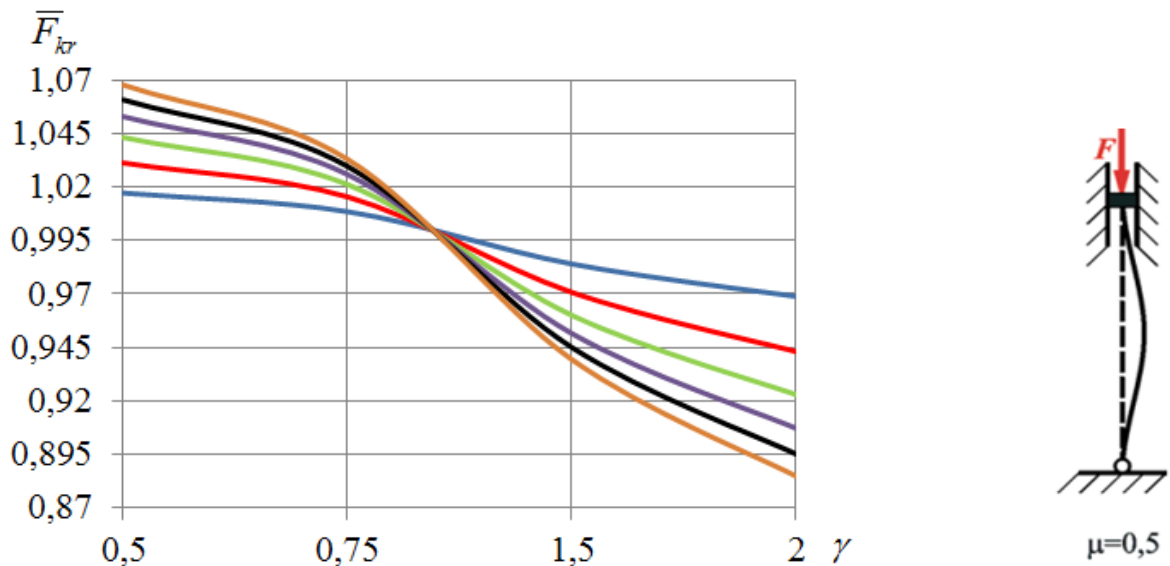
Nagrinėsime kaip santykinė kritinė jėga \bar{F}_{kr} priklauso nuo pagrindinės ir siūlės medžiagų tamprumo modulių santykio γ ir vidutinio santykinio siūlės aukščio κ , kai klupdome suvirintą sujungimą su viena rumbėle ir su dviem rumbelėmis. Keičiamas siūlės kampas α ir galų įtvirtinimas. Siūlės kampą α naudosime 10° , 20° , mechaninio nevienalytiškumo vertes γ priimsime, kai kieta siūlė - 0,5; 0,75, o minkšta siūlė - 1,5; 2,0. Vidutinį santykinį siūlės aukštį κ , keisime ribose nuo 0,2 iki 1,2, žingsniu 0,2. Lakšto storį naudosime $h = 10$ mm.



2.61 pav. Santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybė nuo pagrindinės ir siūlės medžiagų tamprumo modulių santykio γ ir vidutinio santykinio siūlės aukščio κ , kada tiriamas suvirintą sujungimą su dviem rumbelėmis (2.35 pav.), kai $\mu = 2$, $h = 10$ mm, $\alpha = 10^\circ$, čia: (—) — $\kappa = 0,2$; (—) — $\kappa = 0,4$; (—) — $\kappa = 0,6$; (—) — $\kappa = 0,8$; (—) — $\kappa = 1,0$; (—) — $\kappa = 1,2$

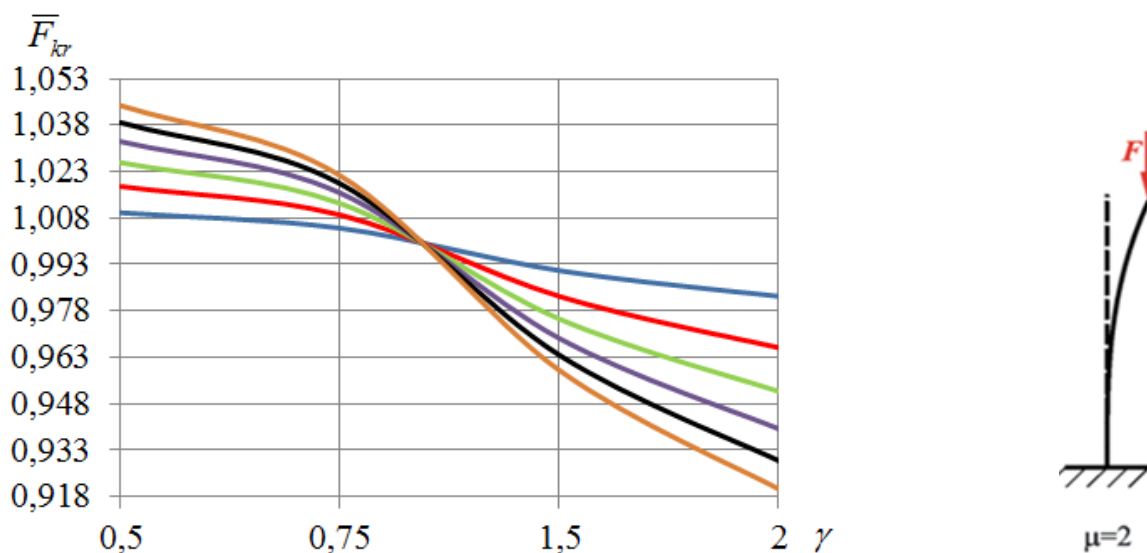


2.62 pav. Santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybė nuo pagrindinės ir siūlės medžiagų tamprumo modulių santykio γ ir vidutinio santykinio siūlės aukščio κ , kada tiriamame suvirintą sujungimą su dviem rumbelėmis (2.35 pav.), kai $\mu = 1$, $h = 10$ mm, $\alpha = 10^\circ$, čia: (—) – $\kappa = 0,2$; (—) – $\kappa = 0,4$; (—) – $\kappa = 0,6$; (—) – $\kappa = 0,8$; (—) – $\kappa = 1,0$; (—) – $\kappa = 1,2$

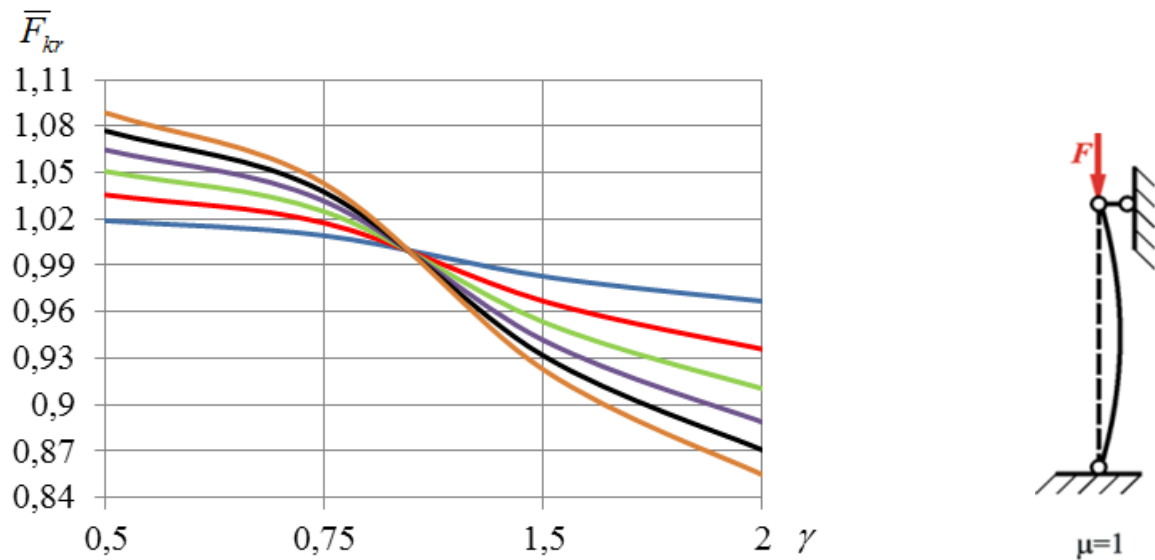


2.63 pav. Santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybė nuo pagrindinės ir siūlės medžiagų tamprumo modulių santykio γ ir vidutinio santykinio siūlės aukščio κ , kada tiriamame suvirintą sujungimą su dviem rumbelėmis (2.35 pav.), kai $\mu = 0,5$, $h = 10$ mm, $\alpha = 10^\circ$, čia: (—) – $\kappa = 0,2$; (—) – $\kappa = 0,4$; (—) – $\kappa = 0,6$; (—) – $\kappa = 0,8$; (—) – $\kappa = 1,0$; (—) – $\kappa = 1,2$

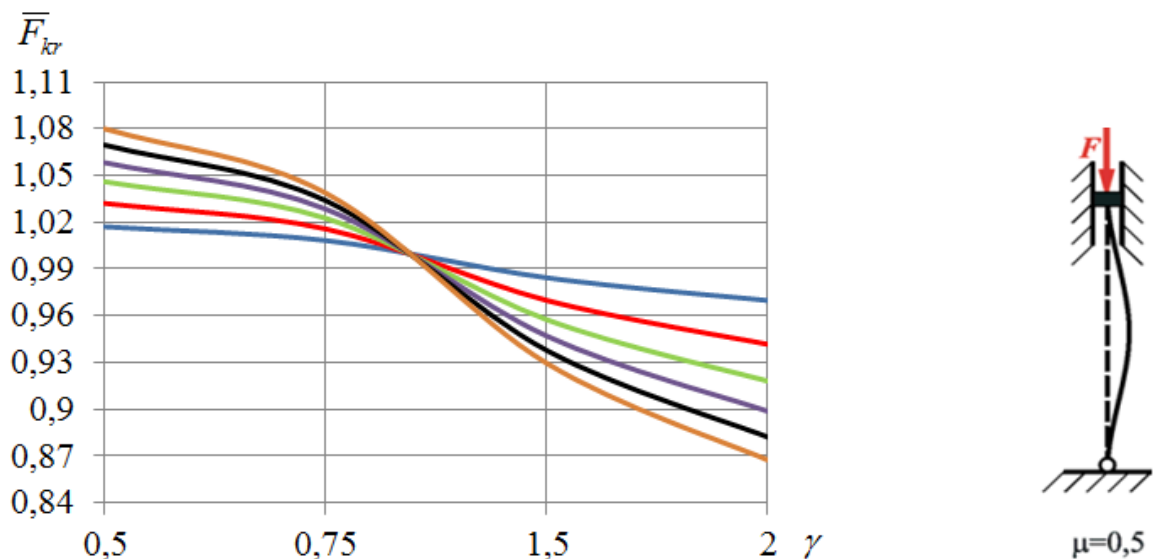
Iš šių (2.61 – 2.63 pav.) matyti, kad tiriant suvirinto sujungimo su dviem rumbelėmis santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybę nuo mechaninio nevienalytiškumo vertės bei nuo vidutinio santykinio siūlės aukščio ir keičiant mechaninio nevienalytiškumo santykio γ vertę į didesnę pusę, santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} reikšmė mažėja, nepriklausomai nuo įtvirtinimo būdo, bei nuo to ar siūlė kieto tipo ar minkšto. Prie didžiausios mechaninio nevienalytiškumo $\gamma = 2,0$ reikšmės, santykinė kritinė jėga gaunama mažiausia, tai reiškia, kad klupdomas suvirintas sujungimas yra arčiausiai suklypimo būsenos. O didžiausia santykinės kritinės jėgos reikšmė gaunama prie kietosios siūlės, kai $\mu = 1$; $\gamma = 0,5$; $k = 1,2$ (2.62 pav.).



2.64 pav. Santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybė nuo pagrindinės ir siūlės medžiagų tamprumo modulių santykio γ ir vidutinio santykinio siūlės aukščio κ , kada tiriamė suvirintą sujungimą su viena rumbėle (2.36 pav.), kai $\mu = 2$, $h = 10$ mm, $\alpha = 10^\circ$, čia:
 (—) — $\kappa = 0,2$; (—) — $\kappa = 0,4$; (—) — $\kappa = 0,6$; (—) — $\kappa = 0,8$; (—) — $\kappa = 1,0$; (—) — $\kappa = 1,2$



2.65 pav. Santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybė nuo pagrindinės ir siūlės medžiagų tamprumo modulių santykio γ ir vidutinio santykinio siūlės aukščio κ , kada tiriamame suvirintą sujungimą su viena rumbele (2.36 pav.), kai $\mu = 1$, $h = 10$ mm, $\alpha = 10^\circ$, čia: (—) – $\kappa = 0,2$; (—) – $\kappa = 0,4$; (—) – $\kappa = 0,6$; (—) – $\kappa = 0,8$; (—) – $\kappa = 1,0$; (—) – $\kappa = 1,2$

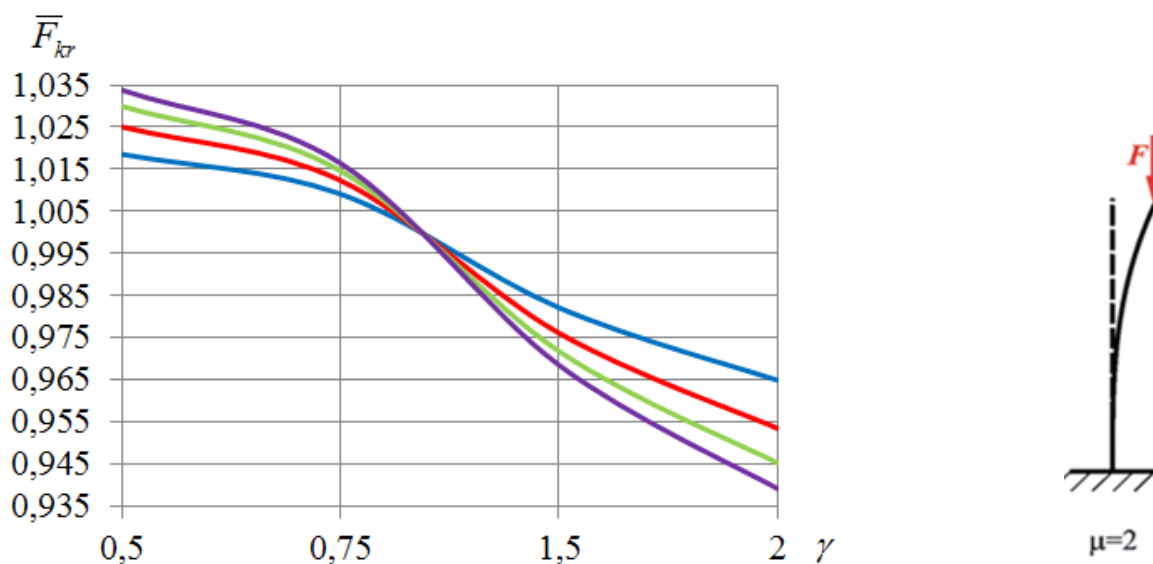


2.66 pav. Santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybė nuo pagrindinės ir siūlės medžiagų tamprumo modulių santykio γ ir vidutinio santykinio siūlės aukščio κ , kada tiriamame suvirintą sujungimą su viena rumbele (2.36 pav.), kai $\mu = 0,5$, $h = 10$ mm, $\alpha = 10^\circ$, čia: (—) – $\kappa = 0,2$; (—) – $\kappa = 0,4$; (—) – $\kappa = 0,6$; (—) – $\kappa = 0,8$; (—) – $\kappa = 1,0$; (—) – $\kappa = 1,2$

Tiriant suvirinto sujungimo su viena rumbėle santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybę nuo mechaninio nevienalytiškumo vertės bei nuo vidutinio santykinio siūlės aukščio ir keičiant mechaninio nevienalytiškumo santykio γ vertę į didesnę pusę, santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} reikšmė taip pat mažėja, nepriklausomai nuo įtvirtinimo būdo, bei nuo to ar siūlė kieto tipo ar minkšto. Santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} reikšmės labai artimos vienos kitai, tiriant klupdomą sujungimą su viena rumbėle ar klupdant lakštą su dviejomis rumbelėmis. Taip pat pastebime iš šių grafikų (2.61 – 2.66 pav.), kad nepriklausomai nuo įtvirtinimo tipo, prie minkštos siūlės, pavojingiausią santykinės kritinės jėgos reikšmę įgyja didžiausia vidutinė santykinė siūlės aukščio vertė $\kappa = 1,2$, o prie kietosios siūlės atvirkščiai. Pavojingiausia santykinės kritinės jėgos reikšmę įgyja mažiausia vidutinė santykinė siūlės aukščio vertė $\kappa = 0,2$.

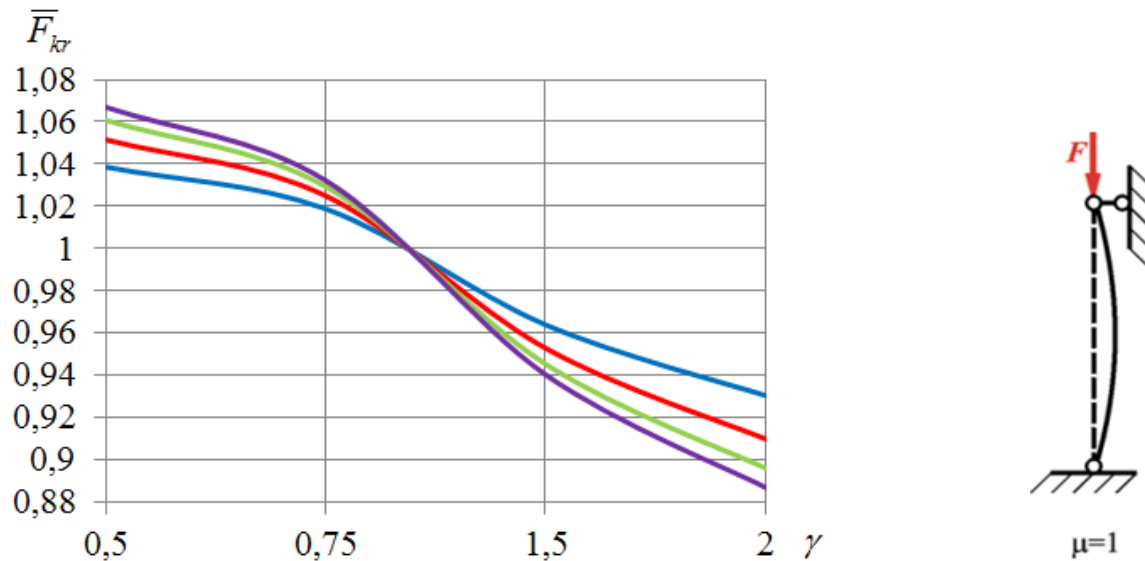
Priklausomybė nuo pagrindinės ir siūlės medžiagų tamprumo modulių santykio bei lakšto storio

Nagrinėsime kaip santykinė kritinė jėga \bar{F}_{kr} priklauso nuo pagrindinės ir siūlės medžiagų tamprumo modulių santykio γ ir lakšto storio h , kai keičiamas siūlės kampas α , galų įtvirtinimas ir rumbelių tipai. Siūlės kampą α naudosime 40° , 80° , mechaninio nevienalytiškumo vertes γ priimsime, kai kieta siūlė - 0,5; 0,75, o kai minkšta siūlė - 1,5; 2,0. Vidutinį santykinį siūlės aukštį naudosime $\kappa = 1,0$. Lakšto storio h vertes naudosime: 4 mm, 6 mm, 8 mm, 10 mm.

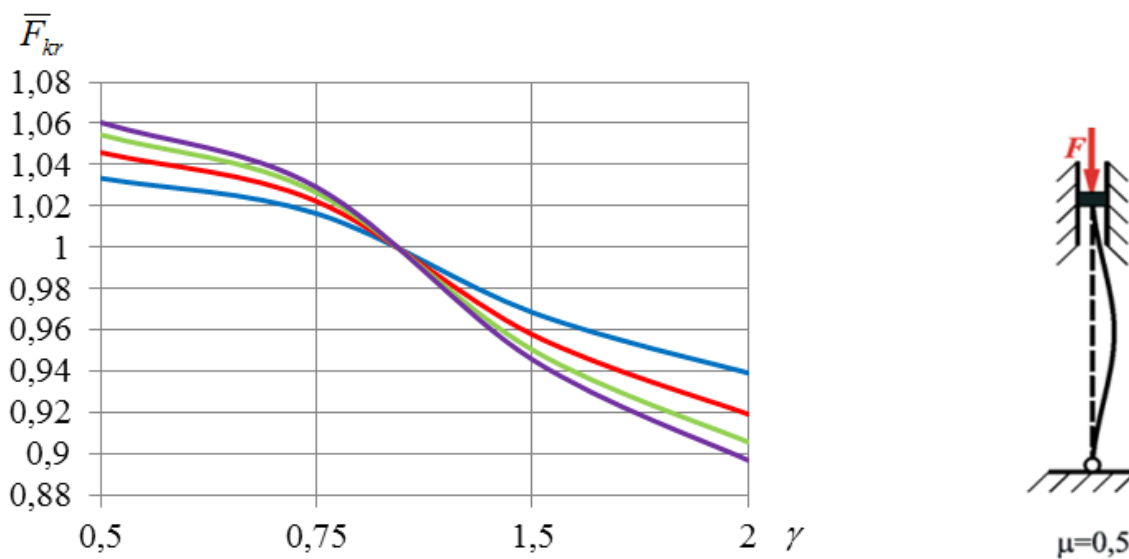


2.67 pav. Santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybė nuo pagrindinės ir siūlės medžiagų tamprumo modulių santykio γ ir lakšto storio h , kada tiriame suvirintą sujungimą su

dviejomis rumbelėmis (2.35 pav.), kai $\alpha = 40^\circ$; $\mu = 2$, $\kappa = 1,0$, čia: (—) – $h = 4$ mm; (—) – $h = 6$ mm; (—) – $h = 8$ mm; (—) – $h = 10$ mm



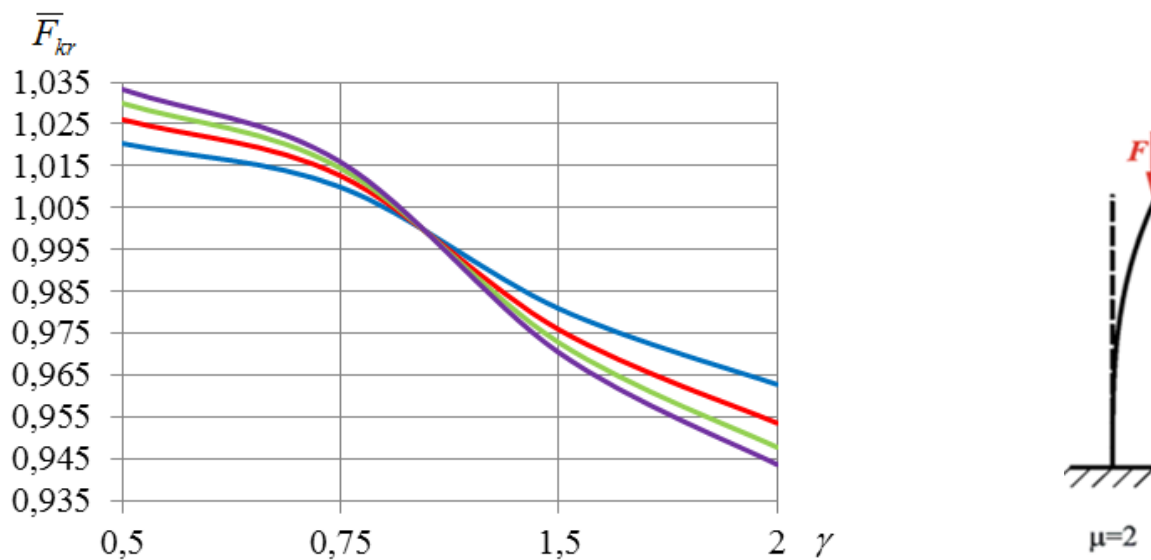
2.68 pav. Santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybė nuo pagrindinės ir siūlės medžiagų tamprumo modulių santykio γ ir lakšto storio h , kada tiriame suvirintą sujungimą su dviejomis rumbelėmis (2.35 pav.), kai $\alpha = 40^\circ$; $\mu = 1$, $\kappa = 1,0$, čia: (—) – $h = 4$ mm; (—) – $h = 6$ mm; (—) – $h = 8$ mm; (—) – $h = 10$ mm



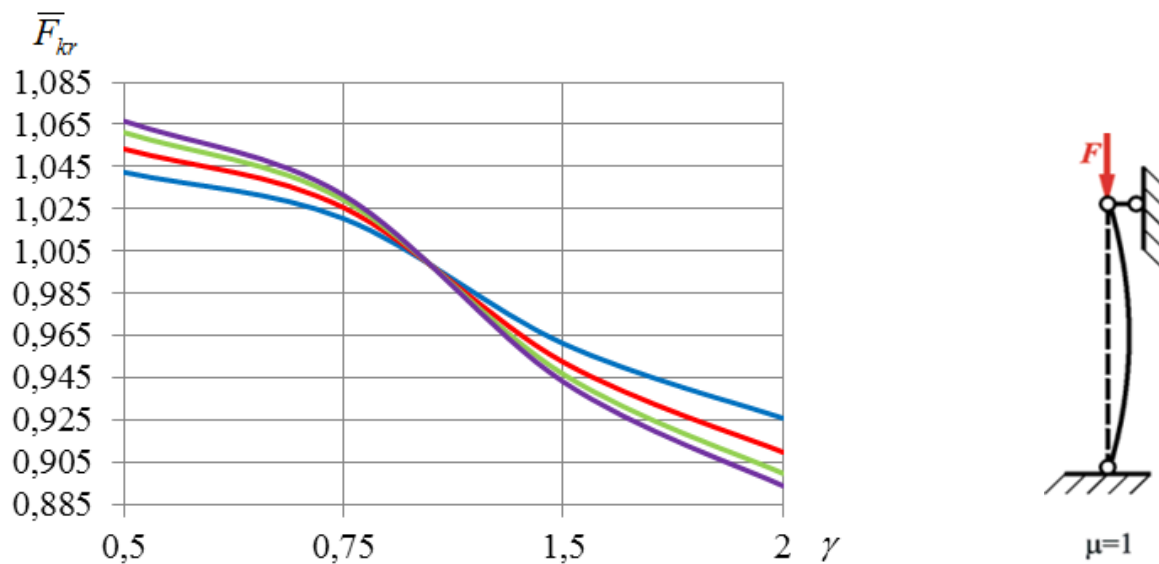
2.69 pav. Santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybė nuo pagrindinės ir siūlės medžiagų tamprumo modulių santykio γ ir lakšto storio h , kada tiriame suvirintą sujungimą su

dviejomis rumbelėmis (2.35 pav.), kai $\alpha = 40^\circ$; $\mu = 0,5$, $\kappa = 1,0$, čia: (—) – $h = 4$ mm; (—) – $h = 6$ mm; (—) – $h = 8$ mm; (—) – $h = 10$ mm

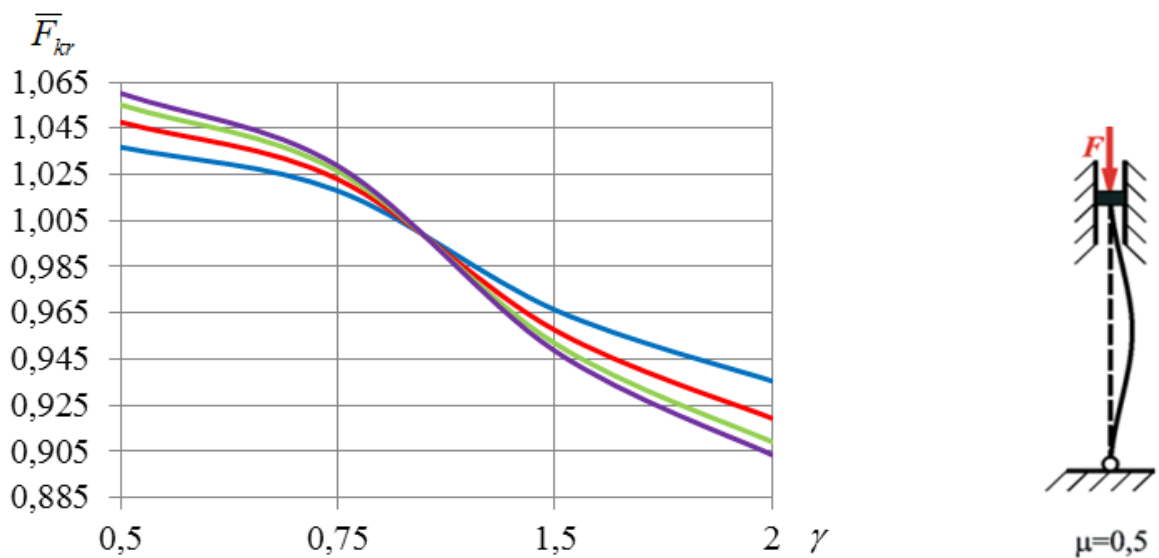
Tiriant suvirinto sujungimo su dviejomis rumbelėmis, santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybę nuo mechaninio nevienalytiškumo vertės bei lakšto storio ir keičiant mechaninio nevienalytiškumo santykio γ vertę į didesnę pusę, santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} reikšmė mažėja, nepriklausomai nuo įtvirtinimo būdo ar lakšto storio. Didžiausias santykinės kritinės jėgos pokytis pastebimas, kai lakšto storis $h = 10$ mm, prie įtvirtinimo $\mu = 1$. \bar{F}_{kr} sumažėja 1,2 karto – 20,3 %. O mažiausias \bar{F}_{kr} pokytis, kai lakšto storis $h = 4$ mm, prie įtvirtinimo $\mu = 2$. \bar{F}_{kr} sumažėja 1,0 karto – 5,5 %. Pavojingiausia santykinė kritinė jėga gaunama prie minkštosios siūlės - $\bar{F}_{kr} = 0,8872$ kN, kai $\gamma = 2,0$; $\mu = 1$; $h = 10$ mm (2.67 – 2.69 pav.).



2.70 pav. Santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybė nuo pagrindinės ir siūlės medžiagų tamprumo modulių santykio γ ir lakšto storio h , kada tiriamas suvirintą sujungimą su dviejomis rumbelėmis (2.35 pav.), kai $\alpha = 80^\circ$; $\mu = 2$, $\kappa = 1,0$, čia: (—) – $h = 4$ mm; (—) – $h = 6$ mm; (—) – $h = 8$ mm; (—) – $h = 10$ mm



2.71 pav. Santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybė nuo pagrindinės ir siūlės medžiagų tamprumo modulių santykio γ ir lakšto storio h , kada tiriamė suvirintą sujungimą su dviejomis rumbelėmis (2.35 pav.), kai $\alpha = 80^\circ$; $\mu = 1$, $\kappa = 1,0$, čia: (—) – $h = 4$ mm; (—) – $h = 6$ mm; (—) – $h = 8$ mm; (—) – $h = 10$ mm



2.72 pav. Santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybė nuo pagrindinės ir siūlės medžiagų tamprumo modulių santykio γ ir lakšto storio h , kada tiriamė suvirintą sujungimą su dviejomis rumbelėmis (2.35 pav.), kai $\alpha = 80^\circ$; $\mu = 0,5$, $\kappa = 1,0$, čia: (—) – $h = 4$ mm; (—) – $h = 6$ mm; (—) – $h = 8$ mm; (—) – $h = 10$ mm

Tiriant suvirinto sujungimo su viena rumbėle, santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybę nuo mechaninio nevienalytiškumo vertės bei lakšto storio ir keičiant mechaninio nevienalytiškumo santykio γ vertę į didesnę pusę, santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} reikšmė taip pat mažėja, kai tiriame suvirintą sujungimą su dviem rumbelėmis, nepriklausomai nuo įtvirtinimo būdo ar lakšto storio. Didžiausias santykinės kritinės jėgos pokytis pastebimas, kai lakšto storis $h = 10$ mm, prie įtvirtinimo $\mu = 1$. \bar{F}_{kr} sumažėja 1,2 karto – 19,3 %. O mažiausias \bar{F}_{kr} pokytis, kai lakšto storis $h = 4$ mm, prie įtvirtinimo $\mu = 2$. \bar{F}_{kr} sumažėja 1,0 karto – 5,9 %. Pavojingiausia santykinė kritinė jėga gaunama prie minkštosios siūlės - $\bar{F}_{kr} = 0,8942$ kN, kai $\gamma = 2,0$; $\mu = 1$; $h = 10$ mm (2.70 – 2.72 pav.). Taip pat pastebime iš šių grafikų (2.67 – 2.72 pav.), kad nepriklausomai nuo įtvirtinimo tipo, prie minkštos siūlės, pavojingiausią santykinės kritinės jėgos reikšmę įgyja storiausia lakšto vertė $h = 10$ mm, o prie kietosios siūlės atvirkščiai. Pavojingiausią santykinės kritinės jėgos reikšmę įgyja ploniausia lakšto vertė $h = 4$ mm.

IŠVADOS

Darbe ištirta mechaniškai nevienalyčio sandūrinio suvirinto sujungimo su V formos siūle, santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybė nuo siūlės kampo α , lakšto storio h , vidutinio santykinio siūlės aukščio κ , mechaninio nevienalytiškumo γ , lakšto galų įtvirtinimo tipo ir gavome tokius rezultatus:

- Nepriklausomai nuo įtvirtinimo tipo ir mechaninio nevienalytiškumo santykio γ , padidinus siūlės kampo α devynis kartus, santykinė kritinė jėga \bar{F}_{kr} kinta labai nežymiai. Pavojingiausia santykinė kritinė jėga gaunama, kai suvirintas sujungimas abiejuose galuose įtvirtintas šarnyriškai ir prie mažiausio siūlės kampo $\alpha = 10^\circ$.
- Ištiria santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybę nuo lakšto storio h taip pat gaunami labai nežymūs pokyčiai. Prie minkštos siūlės keičiant lakšto storį į storenį ir didinant siūlės kampą, santykinės kritinės jėgos reikšmė labai nežymiai didėja, o prie kietosios siūlės santykinė kritinė jėga nežymiai mažėja.
- Nepriklausomai nuo įtvirtinimo ir siūlės tipo, ar siūlė be rumbelės ar su rumbele, tiriant santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybę nuo vidutinio santykinio siūlės aukščio κ prie minkštos siūlės, \bar{F}_{kr} - mažėja. O prie kietos siūlės - \bar{F}_{kr} didėja.
- Ištiria santykinės kritinės jėgos \bar{F}_{kr} priklausomybę nuo mechaninio nevienalytiškumo γ pastebėjome, kad nepriklausomai nuo įtvirtinimo ir siūlės tipo, ar siūlė be rumbelės ar su rumbele ir ar siūlė kieta ar minkšta, santykinės kritinės jėgos reikšmė visais atvejais mažėja.
- Ištirę suvirintą sujungimą su viena rumbele ir su dviejomis rumbelėmis, pastebime kad santykinėi kritinei jėgai didelės įtakos nesudaro rumbelės tipai.

LITERATŪRA

1. Gniuždomų strypų stabilumas. Prieiga internetu: <http://www.freewebs.com/auris10/XII%20skyrius.pdf> [žiūrėta 2015.02.06].
2. Vienalyčių kūnų klumpdymas. Prieiga internetu: <http://en.wikipedia.org/wiki/buckling> [žiūrėta 2015.02.03].
3. **Foedosjevas V.** Medžiagų atsparumas. – Vilnius. Mokslas, 1977. 438 - 444 psl., 457 psl.
4. Mokomoji medžiaga ES šalių inžinieriams – suvirinimo darbų specialistams. Prieiga internet: <https://e-stud.vgtu.lt/user/files/dest/9282/1.%20ivadas.pdf> [žiūrėta 2015.03.09].
5. Bendikas J. Suvirintos konstrukcijos. Skaičiavimas ir projektavimas. – Vilnius, Technika, 2003. 16 – 20 psl.
6. **Зенкевич О.** Метод конечных элементов в технике. – Москва: Мир. 1975. 426 – 463 psl.
7. S. L. Jones, T. D. O'rouke, ir J. A. Mason. Suvirintų sujungimų vamzdžiuose projektavimas, veikiant gniuždomajai apkrovai. Prieiga internetu: http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/13_1625.pdf [žiūrėta 2015.02.10].
8. Baigtinių elementų metodas. Prieiga internetu: http://stud.ppf.ktu.lt/vaiciulis/paskaitos/bemi/bemi_03.pdf [žiūrėta 2015.02.21].