

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

MANTAS VENS LAUSKAS

**ŽMOGAUS KRAUJOTAKOS STIMULIAVIMO MECHANINIAIS
VIRPESIAIS TYRIMAI IR TAIKYMAI**

Daktaro disertacijos santrauka
Technologijos mokslai, mechanikos inžinerija (09T)

2015, Kaunas

Disertacija rengta 2011–2015 metais Kauno technologijos universiteto Mechatronikos institute.

Mokslinis vadovas:

prof. habil. dr. Vytautas OSTAŠEVIČIUS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, mechanikos inžinerija – 09T).

Mechanikos inžinerijos mokslo krypties daktaro disertacijos gynimo taryba:

prof. habil. dr. Arvydas PALEVIČIUS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, mechanikos inžinerija – 09T) - pirmininkas;

habil. dr. Algimantas BUBULIS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, mechanikos inžinerija – 09T);

prof. Vladimir MINCHENYA (Baltarusijos nacionalinis technikos universitetas, Minskas, Baltarusija, technologijos mokslai, mechanikos inžinerija – 09T);

dr. Vincentas VEIKUTIS (Lietuvos sveikatos mokslų universitetas, Biomedicinos mokslai, medicina – 06B).

Disertacija bus ginama viešame mechanikos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje 2015 m. gruodžio 17 d. 10 val. Kauno technologijos universiteto centrinių rūmų disertacijų gynimo salėje.

Adresas: K. Donelaičio g. 73-403, 44249 Kaunas, Lietuva

Disertacijos santrauka išsiųsta 2015 m. lapkričio 17 d.

Su disertacija galima susipažinti internete (<http://ktu.edu>), Kauno technologijos universiteto (K. Donelaičio g. 20, Kaunas) ir Aleksandro Stulginskio universiteto (Studentų g. 11, Akademija, Kauno raj.) bibliotekose.

IVADAS

Temos aktualumas

Pasaulio sveikatos organizacijos priimtoje deklaracijoje „Sveikata visiems XXI a.“ Europos regionui numatytas siekinys: „Sveika senatvė“. Planuojama, kad 2050 metais vyresnių nei 65 metų gyventojų Europoje padaugės 70 procentų, o vyresnių nei 80 metų – 170 procentų. Be to, daugiau nei 10 % populiacijos kenčia nuo tokių ligų kaip cukrinis diabetas ar artritas, kurios sukelia kraujotakos sutrikimus. Patologiniai procesai dažnai sutrikdo arteriolių ir kapiliarų funkciją, tai sukelia kraujospūdžio padidėjimą ir blogina audinio aprūpinimą reikiamomis medžiagomis. Dėl šių priežasčių šiuolaikinis medicinos pasaulis reikalauja unikalių tyrimų ir neinvazinių išmaniųjų technologijų, kurios būtų naudojamos sprendžiant sveiko senėjimo ir kraujotakos sutrikimų problemas.

Dėl identifikuoto metodologijų ir priemonių trūkumo minėtose srityse buvo nuspręsta sukurti inovatyvias priemones, leidžiančias atlikti terapiją neįgaliems žmonėms, sergantiems cukriniu diabetu, artritu, hipertenzija ar kitomis kraujotakos sutrikimų ligomis, žemo dažnio virpesiais intensyvinant kraujotaką žmogaus galūnių kapiliaruose. Atsižvelgiant į reikalavimus ir numatomą taikymo sritį skirtingoms problemoms spręsti, buvo nuspręsta sukurti du atskirus prototipus, pritaikytus plaštakoms ir pėdoms, taip koncentruojantis į labiausiai ligos pažeistas vietas. Nuspręsta naudoti virpesių šaltinius, sudarytus iš dviejų variklių su besisukančiomis disbalansinėmis masėmis, taip sukeliant mušimo reiškinių, kuris leidžia sukurti žemo dažnio virpesius ir pakankamo dydžio apkrovą reikiamam galūnių poslinkiui sukurti. Siūlomas mušimo reiškinių ir vibracinės terapijos panaudojimo metodas yra unikalus medicinos ir žmogaus sveikatinimo įrenginiuose ir moksliniuose tyrimuose. Remiantis literatūros apžvalga ir egzistuojančių technologijų analizės rezultatais, buvo nustatyti tyrimo uždaviniai ir pagrindinis tikslas.

Tyrimo tikslas ir uždaviniai

Tyrimo tikslas – sukurti ir ištirti mechaninių virpesių įtaką kraujo cirkuliacijai žmogaus galūnėse, panaudojant žemo dažnio virpesius generuojančią įrangą. Šiam tikslui pasiekti formuluojami tokie uždaviniai:

1. Sukurti matematinius kraujagyslės, kapiliaro bei raudonojo kraujo kūnelio (eritrocito) modelius, aprašyti jų medžiagos savybes ir identifikuoti savuosius dažnius.
2. Atlikti vibracinio poveikio simuliacijas ir identifikuoti įtaką kraujo judėjimo greičio pokyčiams bei imituoti eritrocito judėjimą iš arteriolės į kapiliarą.
3. Sukurti eksperimentinį kraujotakos sistemą imituojantį stendą, susidedantį iš dirbtinės kraujagyslės, peristaltinio siurblio, vibracinio aktuatoriaus, poslinkio bei slėgio jutiklių ir matavimo įrenginių, atlikti

- eksperimentus, sukeltiant mušimo reiškinį ir stebint kraujo slėgio pokyčius kraujagyslėje.
4. Integruoti mikrodalelių sraute vizualizacijos sistemą (μ PIV) į sukurtą kraujotakos imitacinį stendą ir atlikti tyrimus stebint kraujo greičio pokyčius mikrokanale.
 5. Suprojektuoti ir sukurti vibracinės apyrankės ir vibracinio aktuatoriaus kojoms prototipus, nustatyti kojų įrenginio savuosius dažnius, darbinis režimus ir jų priklausomybę nuo paciento svorio, patikrinti matematinių modelių adekvatumą.
 6. Validuoti vibracinius žadinimo įrenginius, matuojant temperatūros pokyčius žmogaus galūnėse.

Naujumas

Žemiau išvardyti moksliniai pasiekimai aprašomi disertacijoje:

1. Kraujotakos sistemos imitacinis stendas su peristaltiniu siurbliu, vibraciniu aktuatoriumi ir μ PIV įranga, kuris leidžia analizuoti skysčio (kraujo) parametrus mikrokanale esant skirtingų amplitudžių ir dažnių išorinių virpesių poveikiui.
2. Eksperimentais ir teorinio modeliavimo metu pagrįstas žemo dažnio virpesių poveikis kraujotakos stimuliuojimui. Identifikuoti generuojantys pakankamą poslinkį (1–6 mm diapazone) mušimo reiškinio dažniai, kuriems esant smarkiai padidėja kraujo greitis (vidutinis iki 7,7 %, maksimalus iki 4,15kartų) ir slėgis mikrokanale (iki 4 kartų) bei sumažėja maksimalus kontakto slėgis tarp eritrocito bei kapiliario sienelių (iki 2,17 karto).
3. Buvo sukurti unikalūs vibracinės apyrankės ir kojų aktuatoriaus prototipai, eksperimentiškai, registruojant galūnių temperatūrinę nuotrauką po vibracinio poveikio, patvirtintas jų validumas.

Praktinė vertė

Pasiūlytas naujo tipo vibracinės terapijos taikymo metodas, skirtas kraujotakai žmogaus plaštakose bei pėdose sergantiems diabetu, žmonėms su paralyžiuotomis apatinėmis galūnėmis, kenčiantiems nuo artrito sukeliama skausmo, turintiems aukštą kraujospūdį, gerinti. Išgryninus egzistuojančią sprendimų stoką rinkoje, buvo nuspręsta kurti priemones, minėtoms problemoms spręsti.

Skaitmeniniai kraujagyslės, kapiliario ir eritrocito modeliai leidžia sumažinti ilgalaikių ir brangių invazinių studijų poreikį su biologiniu žmogaus audiniu. Sukurti modeliai gali būti modifikuoti atsižvelgiant į taikymo sritį, taip pagerinant projektavimo procesą ir sumažinant tam reikiamas išlaidas.

Tyrimo objektas ir metodologija

Tyrimo objektas yra kraujotakos gerinimas žmogaus galūnėse (rankose bei kojose) vibracinio poveikio metu. Tyrimo metodologija yra paremta mokslinių šaltinių, aprašančių vibracinio poveikio taikymus, analize, išgryninimu ir apibendrinimu. Žemo dažnio virpesių poveikis buvo tiriamas eksperimentiškai matuojant bei teoriškai skaičiuojant kraujo slėgį ir greitį kanale, taip pat maksimalų kontakto slėgį tarp eritrocito ir kapiliaro sienelės. Skaitinis modeliavimas atliktas naudojant „COMSOL Multiphysics“ programinę įrangą, „Acoustic-Solid Interaction Frequency domain“ ir „Fluid-structure Interaction“ modulius, o skaitmeninių modelių adekvatumas buvo tiriamas mikrodalelių sraute pasitelkiant vizualizacijos sistemą ir fiksuojant temperatūrinės galūnių nuotraukas po vibracinio poveikio su sukurtais įrenginių prototipais.

Ginami disertacijos teiginiai

Naujas vibracinio poveikio metodas ir įrenginiai buvo pasiūlyti kraujotakai žmogaus galūnėse gerinti. Įrenginiai buvo sukurti koncentruojantis į kūno dalis, paveiktas tokių ligų kaip cukrinis diabetas ar artritas, taip išvengiant galimo rezonanso su vidiniais organais bei nesukeliant neigiamo poveikio stuburui.

Sukurti skaitmeniniai kraujagyslės, kapiliaro ir eritrocito modeliai supaprastina vibracinio poveikio tyrimus, naudojant dėl įvairių ligų poveikio atsiradusius skirtingus kraujotakos sistemos parametrus bei medžiagos savybes.

Teorinių ir eksperimentinių tyrimų rezultatų taikant žemo dažnio virpesius atradimai, parodo sukurtų įrenginių validumą skatinant kraujotaką.

Darbo apimtis

Disertacija susideda iš įvado, keturių skyrių, galutinių išvadų, literatūros sąrašo ir mokslinių publikacijų disertacijos tema. Disertacijos apimtis yra 112 puslapių, 35 formulės, 81 iliustracija ir 10 lentelių.

Disertacijos aprobavimas

Teoriniai ir eksperimentiniai tyrimai buvo atlikti Kauno technologijos universiteto Mechatronikos institute. Dalis tyrimų rezultatų buvo gauti ir panaudoti įgyvendinant mokslinių tyrimų projektą „In-Smart“ (Nr. VP1-3.1-ŠMM-10-V-02-012), finansuotą iš Europos Sąjungos struktūrinių fondų lėšų.

Disertacijos rezultatai buvo paskelbti 9 mokslo leidiniuose: 3 straipsniuose ISI duomenų bazėje su citavimo indeksu, 2 konferencijų leidiniuose ISI duomenų bazėje ir 4 straipsniuose konferencijų pranešimų medžiagoje.

Rezultatai buvo pristatyti 7 konferencijose:

- „Tarpdalykiniai tyrimai fiziniuose ir technologijos moksluose – 2012“, Vilnius;
- „International conference of Vibroengineering 2013“, Druskininkai;

- „Tarpdalykiniai tyrimai fiziniuose ir technologijos moksluose – 2014“, Vilnius;
- 19th International conference “Mechanika-2014”, Kaunas
- 12th International Symposium „Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering”, 2014, Amsterdam, The Netherlands;
- 20th International scientific conference Mechanika-2015”, Kaunas.
- The 14th IFToMM World Congress, 2015, Taipei, Taiwan.

1. LITERATŪROS APŽVALGA

Remiantis statistika, daugiau nei 50 procentų mirčių Europoje ir Lietuvoje yra nulemtos širdies ir kraujotakos ligų. Pagrindinė kraujotakos sistemos funkcija yra aprūpinti audinį deguonimi ir maistinėmis medžiagomis bei pašalinti anglies dioksidą ir metabolitus. Šie procesai negali vykti be kapiliarinės sistemos. Kapiliarai yra mažiausi kraujo kanalai, kurių diametras yra apie 5-8µm. Mažiausios mikrokraujagyslės yra plačiai pasiskirsčiusios, taip sudarydamos kapiliarų tinklą. Patologiniai procesai dažnai sutrikdo arteriolių ir kapiliarų funkciją, taip nulemdami aukštą kraujospūdį ir audinių maitinimo sutrikimus. Sumažėjusi kraujotaka, kuri yra rezultatas kitų sveikatos problemų, labiausiai paveikia žmogaus galūnes. Dažniausios sutrikusių kraujotaką sukeliančios priežastys yra nutukimas, cukrinis diabetas, artritas, neįgalumas, širdies ligos ir pan. Cukriniu diabetu, artritu ir hipertenzija serga milijonai žmonių visame pasaulyje. Šiuo atveju darbe labiausiai akcentuojamasi į cukrinį diabetą ir artritą, tačiau nepamirštant ir kitų kraujotakos sutrikimus sukeliančių ligų.

Kraujotakos sutrikimus sąlygojančios ligos

Cukrinis diabetas visų pirma sukelia kraujotakos sutrikimus, kurie sukelia mėšlungį, skausmą blauzdose, šlaunyse ar sėdmenyse, žaizdas pėdose ir gali sąlygoti galūnių amputaciją. Šiuo metu pasaulyje yra daugiau nei 366 milijonai žmonių, sergančių cukriniu diabetu ir šis skaičius 2030 metais gali pasiekti 552 milijonus (Tarptautinė diabeto asociacija, 2011). Remiantis statistika, kasmet diagnozuojama per 600 tūkst. diabetinių pėdų ir kasmet amputuojama apie 90 tūkst. kojų. Pagrindinė diabetinės pėdos problema – nepakankama kraujotaka. Cukrinis diabetas turi įtakos kraujagyslių susiaurėjimui ir sustandėjimui, todėl išankstinė diagnostika ir prevencija yra labai svarbi. Naujausi tyrimai rodo, jog žemo dažnio mechaniniai virpesiai gali būti naudojami siekiant paspartinti diabetinės pėdos gijimą.

Beveik 50 milijonų JAV gyventojų ir apie 100 milijonų europiečių kenčia nuo artrito ar kitų reumatinių ligų (Ligų kontrolės centras; Europos mokslų fondas, 2006). Svarbiausiais artrito vystymosi faktorius – nepakankama kraujotaka smulkiosiose kraujagyslėse, kurios perneša deguonį ir maistines medžiagas į sąnarius. Tai sukelia skausmus įvairiuose rankų sąnariuose, taip pat ir pėdose,

keliuose ar klubuose. Vibraciniai įrenginiai jau taikomi šios ligos sukeltam skausmui slopinti, tačiau nėra priemonių, padedančių gerinti kraujotaką, taip paskatinant maistinių medžiagų pernešimą į ligos pažeistas kūno vietas. Dėl šių priešasčių svarbu parenkant tinkamus virpesių dažnius sukurti įrenginius sėkmingai artrito sukeltiems negalavimams gydyti.

Arterinė hipertenzija diagnozuojama kas trečiam lietuviui. Tai yra viena iš didžiausių sveikatos problemų Europos Sąjungoje, kurioje kas antras suaugęs žmogus turi aukštą kraujospūdį. Negydoma ši liga gali neigiamai paveikti kraujagysles, širdį, kepenis ir centrinę nervų sistemą vos per kelerius metus. Pirmojoje hipertenzijos stadijoje rekomenduojama didinti fizinį aktyvumą, taip skatinant kraujotaką organizme, tačiau būtinos ir kitos kraujotaką gerinančios priemonės, galinčios padėti žmonėms išvengti hipertenzijos arba sumažinti jos sukeltus padarinius.

Reino liga sukelia mažųjų arterijų susitraukimą rankose ir kojose, taip sutrikdant kraujotaką. Šia liga JAV serga apie 5 procentai populiacijos, o tinkamų priemonių sutrikimams šalinti nėra (Nacionalinis širdies, plaučių ir kraujo institutas).

Periferinė arterijų liga, taip pat kaip ir anksčiau minėtos, daro įtaką kraujagyslių susitraukimui, taip sutrikdant kraujotaką žmogaus kojose ir audinių maitinimą, kas galiausiai gali lemti galūnių amputaciją.

Kojų nevaldantiems neįgaliems pacientams būtina užtikrinti kraujotaką pažeistose galūnėse. Šiai problemai spręsti bei naudojimui namuose pritaikytų priemonių praktiškai nėra, dėl to vibracinės priemonės galėtų užpildyti šią nišą.

Žaizdų gijimas yra tiesiogiai susijęs su kraujotaka odoje. Deguonies ir maistinių medžiagų tiekimas yra labai svarbūs šiame procese, o atlikti tyrimai su laboratorinėmis pelėmis parodė, jog vibracinis treniravimas gali būti inovatyvus metodas gydant diabetines žaizdas. Tyrimais nustatyta, jog 47 Hz vibracinė terapija pagerino kraujo tekėjimą odoje, tuo pačiu pagerėjo ir žaizdų gijimas.

Anksčiau išvardytos problemos lemia kraujotakos sutrikimus, kurie daro įtaką galūnių atšalimui ir skausmui. Neįgalūs žmonės, diabetikai ar sergantys artritu gali jausti tirpstančias galūnes, blogiausiu atveju jos gali būti amputuojamos.

Išanalizavus vibracinės terapijos taikymo literatūrą buvo pastebėta, jog tai sukelia teigiamus įvairių širdies ir kraujotakos sistemos parametru pokyčius. Taip pat teigiama, kad nuolatinis viso kūno vibracinis treniravimas leidžia sumažinti arterijų standumą. Be to, buvo nustatyta, jog esant vibraciniam poveikiui, kapiliarai yra „atidaromi“, siekiant palaikyti reikiamą širdies našumo lygį. Ankstesniuose tyrimuose pažymima, kad viso kūno virpesiai padidina kraujo greitį arterijose, teigiamai veikia širdies ritmą ir kitus kraujotakos parametrus.

Tyrimai rodo, jog aktyvių kapiliarų tankio sumažėjimas yra tiesiogiai siejamas su hipertenzija (Feihl, 2006; Antonois, 2006; Debbabi, 2006). Cohno (2007) tyrimai parodo, jog aukštas kraujospūdis gali būti sumažėjęsio sveikų

kapiliarų ir arteriolių skaičiaus priežastis. Kitame tyrime aprašyti stebimi kapiliarų tinklai dvejose kontrolinėse grupėse – turinčiųjų aukštą kraujospūdį ir tarp sveikų žmonių. Pastebėta, jog turinčiųjų aukštą kraujospūdį kapiliarų tankis buvo daug mažesnis palyginti su sveikų žmonių.

Kitose apžvelgiamose studijose analizuojama viso kūno virpesių terapijos įtaka širdies ir kraujotakos sistemos parametrams. Vienoje iš jų pažymima, jog dėl vibracinės terapijos padidėjo elektromiografijos amplitudė ir sumažėjo dažnis, o maksimalus kraujo greitis išaugo, dėl to rekomenduojama tirtą metodą naudoti pacientams su Friedricho ataksija (Herrero, 2011). Kitame darbe buvo tiriamas viso kūno virpesių poveikis kraujotakai kojoje atliekant pritūpimus su virpesiais ir be jų. Buvo matuojama kraujo slėgis šlaunikaulio arterijoje ir kraujo kūnelių greitis ilsintis. Rezultatai parodė, jog kraujotaka sistemiškai didėjo esant išorinių virpesių poveikiui. Osawa ir kiti (2011) nustatė, kad viso kūno virpesių terapija daro įtaką arterinės kraujotakos ir kitų kraujotakos sistemos parametrų pagerėjimui. Kitoje studijoje buvo stebimas kraujo greitis atliekant viso kūno virpesių terapiją prie 26 Hz dažnio. Vidutinis kraujo tėkmės greitis pakinklio arterijoje padidėjo nuo 6,5 iki 13,0 cm x s(-1). Galiausiai, Baumas ir kiti (2007) atliko tyrimus su antro tipo cukrinio diabeto pacientais ir, atsižvelgdamas į rezultatus, išvadose nurodė, jog viso kūno virpesiai gali būti efektyvi priemonė, siekiant pagerinti glikemijos lygio kontrolę. Loma Linda universitete atlikti tyrimai parodė, jog 5 minučių 30 Hz arba 50 Hz virpesių poveikis pagerino kraujotaką odos paviršiuje ir tai galėtų būti taikoma cukriniu diabetu sergantiems pacientams. Nepaisant esamų tyrimų šioje srityje, pasigendama skirtingų dažnių virpesių ir amplitudės įtakos analizės kraujotakos galūnių kapiliaruose skatinimui bei šių metodų taikomumo diabetu sergantiems pacientams tyrimo.

Siekiant ištirti virpesių įtaką kraujotakai, iš pradžių buvo apžvelgta susijusi literatūra, kurioje nagrinėjami srautų mikrokanaluose stebėjimo ir analizavimo metodai. Laminarinį tekėjimą tiesiame kanale išsamiai analizavo Silva (2009) ir Puccettis (2014). Rezultatai buvo palyginti su teoriniais skaičiavimais ir nustatyta 4 procentų paklaida tarp šių duomenų. Mikrodalelių sraute vizualizacijos sistemos tikslumas buvo analizuojamas Wango (2009) tyrimuose, panaudojant keturkampį mikrokanalą. Devasenathipathys (2003), Completo (2014) ir Tolouei (2009) taip pat analizavo mikrodalelių sraute vizualizacijos sistemos adekvatumą teoriniams modeliams. Buvo nustatyta, jog ši sistema gali būti naudojama analizuojant kraujo tėkmės parametrų pokyčius esant žemo dažnio virpesiams.

Technologinės priemonės

Bene populiariausias vibracinės terapijos taikymas – viso kūno vibraciniai treniruokliai. Šie įrenginiai dažniausiai pritaikomi raumenų masei ir kaulų tankiui didinti, jėgos bei sąnarių stiprumui gerinti ar atliekant apšilimą prieš fizinį krūvį. Šios virpesių platformos gali būti skirstomos į du tipus – sukuriančios žemesnius pagreičius nei 1 g (žemo intensyvumo) ir didesnius nei 1 g (didelio intensyvumo)

pagreičius. Darbinis įrenginių dažnių diapazonas svyruoja nuo 12 iki 40 Hz, o judesio amplitudė nuo 0,7 iki 5 mm. Technologija paremta įvairiais teigiamą poveikį pagrindžiančiais tyrimais plačiai paplitusi visame pasaulyje, tačiau kai kuriose studijose aprašomas neigiamas viso kūno virpesių poveikis stuburui tada, kai žmogus paveikiamas vertikaloje pozicijoje. Taip pat nėra mokslškai įrodyta, jog sukuriamas teigiamas poveikis ilgaiui išlieka.

Vibracinės pirštinės „Intellinetix“ artritu sergantiems žmonėms padeda sumažinti skausmą plaštakose mechaniniais virpesiais ir šildant riešą. Produktas yra patentuotas, tačiau informacijos apie FDA patvirtinimą nebuvo rasta.

Vienintelis „VibeTech“ įrenginys, kuriame kombinuojama vibracinė terapija su jėgos treniravimu yra sukurtas vyresnio amžiaus žmonių mobilumo problemoms spręsti. Kaip pagrindiniai privalumai, akcentuojama padidėjusi raumenų jėga ir balanso gerinimas. Tai vienas iš nedaugelio FDA patvirtintų įrenginių.

Buvo išanalizuoti patentai, kuriuose aprašomi vibraciniai metodai, skirti širdies ir kraujotakos sistemų parametrams gerinti (US 7909785 B2, US 20080309132 A1, WO 2002065973 A1), masažui (US 5910123 A), vaistų pernešimui (US 20090069728) arba tiesiog virpesiams generuoti (US 4570616 A).

Buvo išanalizuoti ISO reglamentai, aprašantys galimą neigiamą vibracijų poveikį žmogaus organizmui. Identifikuota, jog padidėjusi su stuburu susijusių susirgimų rizika galima esant ilgalaikiam viso kūno virpesių poveikiui vertikaloje pozicijoje. Taip pat yra reglamentuota, jog vibracinė liga dažniau diagnozuojama žmonėms, dirbantiems stovimą darbą su mašinomis, kurių sukeliama vibracijos yra aukštesniame nei 40 Hz dažnyje.

Šiame skyriuje apžvelgtos naujausios publikacijos, technologinės priemonės ir detalai išanalizuota kraujotakos sistema, orientuojantis išskirtinai į kapiliarus ir vibracinio poveikio taikymus gerinant širdies ir kraujotakos sistemos funkciją. Atlikus išsamią literatūros apžvalgą galima teigti:

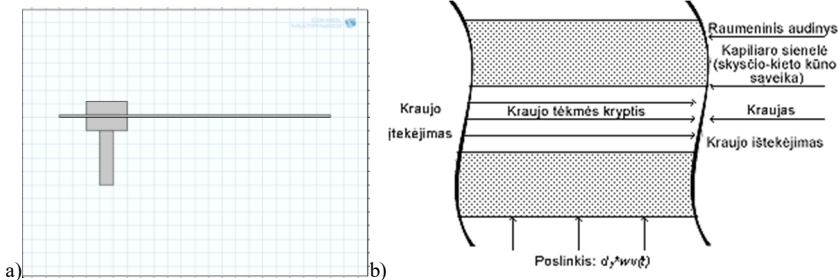
- Apžvelgus ligas, darančias įtaką kraujotakos sutrikimams, išanalizavus esamas vibracinės terapijos priemones, buvo nustatyta, jog rinkoje nėra priemonių, sukuriančių lokalias vibracijas, taip skatinant kraujotaką galūnėse bei eliminuojant galimą neigiamą poveikį vidaus organams ar stuburui.
- Atsižvelgiant į atliktus tyrimus, buvo nuspręsta tolimesnėse kraujotakos pokyčių tyrimo studijose naudoti žemo dažnio virpesius. Buvo nuspręsta sukurti unikalų kraujotaką imituojantį stendą su mikrodalelių sraute vizualizacijos sistema virpesių nulemtiems pokyčiams kraujyje analizuoti. Buvo nuspręsta sukurti skaitmeninius kraujagyslės, kapiliaro mikrokanalo ir eritrocito modelius, taip sumažinant eksperimentinių tyrimų atliekant nuodugnią srautų mikrokanaluose bei eritrocitų analizę poreikį.

- Nuspręsta sukurti žemo dažnio vibracinius aktuatorius plaštakoms bei rankoms atskirai ir šiuose įrenginiuose taikyti naują metodą, panaudojant mušimo reiškinių.

2. TEORINIAI VIBRACINIO POVEIKIO KRAUJO GREIČIUI KAPILIARE TYRIMAI

Kraujotakos mikrokanale modeliavimas

Teoriniams skaičiavimams atlikti buvo pasirinkta „COMSOL Multiphysics“ programinė įranga, kurioje buvo sudaryti 2D bei 3D kraujagyslės, kapiliaro ir eritrocito baigtinių elementų modeliai. Visų pirma, skaičiavimai buvo atliekami su dvimačiu mikrokanalo modeliu, analizuojant išorinių virpesių ir poslinkių įtaką kraujo greičio pokyčiams (1 pav.). 1 mm ilgio ir 8 μm skersmens kanalas buvo suprojektuotas tyrimams, kurio 0,15 mm ilgio dalis buvo patalpinta į žmogaus raumeninį audinį imituojantį modelį išoriniams virpesiams perduoti. Skysčio-struktūros sąveikos (*Fluid-structure interaction*) programinės įrangos įskiepis buvo naudojamas skaičiavimams atlikti. Šio tipo analizė leidžia atlikti sudėtingus skysčio ir kietųjų kūnų sąveikos tyrimus, būtent dėl šių priežasčių ji ir buvo pasirinkta.



1 pav. 2D (a) skysčiu pripildytas „COMSOL Multiphysics“ mikrokanalo modelis, patalpintas žmogaus audinyje; (b) scheminis mikrokanalo brėžinys.

Skysčio-struktūros sąveika gali būti apibūdinama sritimi Ω , įskaitant struktūrinę sritį Ω_s ir skysčio sritį Ω_f , kai išorinės sąlygos aprašomos Γ dydžiu. Skysčio ir struktūros dinamika aprašoma D'Alamberto principu:

$$\rho v_t - \sigma_{i,j,j} + f_i = 0 \quad (1)$$

kur f_i yra kūno jėga, ρ yra masės tankis ir $\sigma_{i,j,j}$ įtempių komponentė. Struktūrinės srities lygtis aprašoma taip:

$$\rho^s \dot{v}_{i,j,j}^s + f_i^s = 0, \text{ in } \bar{\Omega}_s \quad (2)$$

kur s žymi kiekį, susietą su struktūra. Greitis v_i^s yra medžiagos (arba bendras) laiko išvestinė iš poslinkio u_i^s . Lygtis (2) dažniausiai naudojama aprašyti Lagranžo teoremą. Pirmasis šios lygties dėmuo susietas su inercija, o antrasis su įtempiais.

Aprašant tiesinio tamprumo medžiagą, struktūriniai įtempiai išreiškiami Huko dėsnium:

$$\sigma_{ij}^s = \lambda \delta_{ij} \varepsilon_{ll} + 2G \varepsilon_{ij}, \quad (3)$$

kur struktūriniai įtempiai σ_{ij}^s yra įtempių funkcija, ε_{ij} , Lamé konstantos λ ir G , aprašomos lygtimis:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}), \quad (4)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}), \quad (5)$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}, \quad (6)$$

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \quad (7)$$

kur E yra Jungo modulis, o ν yra Puasono koeficientas. Skysčio sričiai lygtis aprašoma taip:

$$\rho^f v_l^f - \sigma_{ij,l}^f + f_l^f = 0, \text{ in } \bar{\Omega}_f \quad (8)$$

Esant inercinėmis sąlygomis, lygtis aprašoma taip:

$$v_l^f = \frac{dv_l^f}{dt} = \frac{\partial v_l^f}{\partial t} + v_j^f v_{l,j}^f \quad (9)$$

Kai naudojamas nespūdus niutoninis skystis, skysčio įtempiai σ_{ij}^f aprašomi pagal:

$$\sigma_{ij}^f = -p \delta_{ij} + \tau_{ij} \quad (10)$$

kur

$$\tau_{ij} = 2\mu \left(e_{ij} - \frac{\delta_{ij} e_{kk}}{3} \right) \quad (11)$$

$$e_{ij} = (v_{j,i}^f + v_{i,j}^f), \quad (12)$$

p yra statinis slėgis, naudojamas sukurti nespūdumo sąlygą, $v_{i,i}^f = 0$.

Šiuo atveju periodiniams virpesiams sukurti, skaičiavimuose buvo naudota poslinkio funkcija Y-ašyje (diapazonas: 0,1–8 mm) ir aprašytas kitimas pagal sinuso bangos funkciją, sukuriant judėjimo dažnį nuo 1 iki 6 Hz. Tinklelio 0 mm poslinkis X-ašyje buvo užduotas skysčio išteklėjimo bei ištekėjimo dalyse. Judamosioms modelio dalims buvo užduota judančio tinklelio sąlyga, leidžianti stebėti skysčio tinklelio judėjimą. Kontakto sąlygos tarp skysčio ir kieto kūno aprašomos lygtimis žemiau:

$$v_{Fluid} = v_{Solid} \quad (13)$$

$$v_{Solid} = \frac{\partial u_{Solid}}{\partial t} \quad (14)$$

$$(\sigma \cdot n)_{Fluid} = (\sigma \cdot n)_{Solid}, \quad (15)$$

kur v yra greičio vektorius, u – poslinkio vektorius, σ įtempių dėmuo, o n normalės vektorius skysčio-struktūros sąveikoje.

Nespūdaus niutonio skysčio tėkmė aprašyta Naviero-Stokso lygtimi laminariniam tekėjimui, kuri įprastai naudojama kraujo tekėjimui apibūdinti:

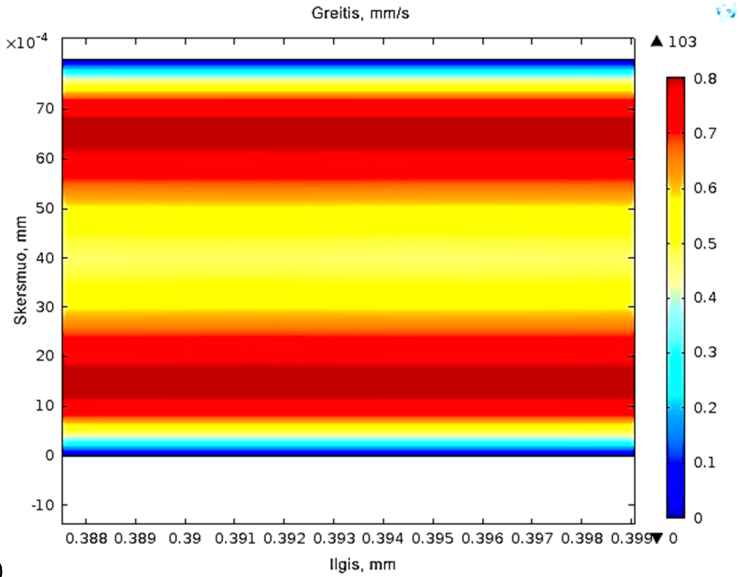
$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \cdot \nabla u - \nabla \cdot (-pI + \eta(\nabla u + (\nabla u)^T)) = F \quad (16)$$

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (17)$$

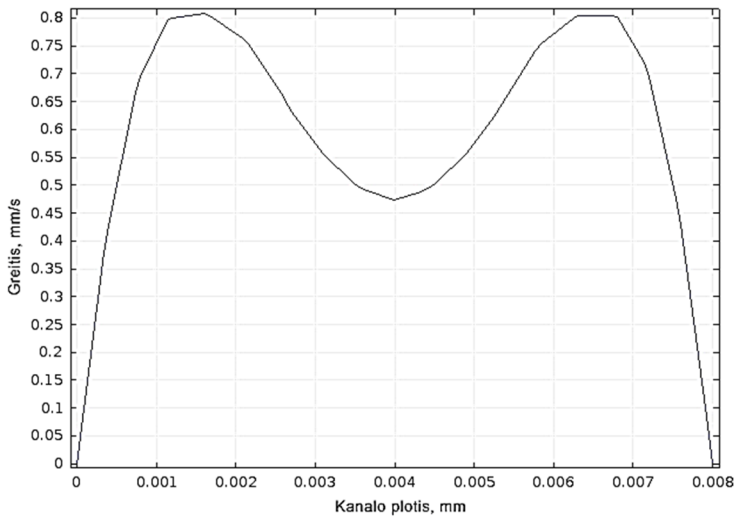
kur ρ yra tankis, $\mathbf{u} = (u, v)$ yra skysčio greitis, p yra slėgis, \mathbf{I} yra įstrižainės matrica, η yra dinaminė klampa, o \mathbf{F} yra tūrio jėga.

Biologinio audinio savybių aprašymas reikalauja specifinių sąlygų. Dideli įtempiai, netiesinė įtempių ir deformacijų sąsaja bei nesuspaudžiamumas yra pagrindinės sąlygos aprašant biologinį audinį. Dėl šių priežasčių buvo naudotas netiesinis struktūrinis medžiagos modulis.

„COMSOL Multiphysics“ terpėje buvo stebimi skysčio pokyčiai skersiniame kanalo pjūvyje, veikiant išoriniams skirtingo dažnio ir amplitudžių virpesiams. Pradinis greitis buvo duotas kanalo pradžioje ir buvo lygus 0,00065 m/s. Tyrimų metu esant 4,3 Hz dažniui užfiksuotas maksimalus greitis buvo lygus 2,74 mm/s, o didžiausias visų matavimų greitis siekė 3,23 mm/s. Vidutinis greitis kanale esant 4,3 Hz virpesiams buvo lygus 0,98 mm/s viso vibracinio poveikio metu. Šiuo atveju, lyginant su pradiniu greičiu, jis išaugo 66,3 %. Rezultatai parodė greičio padidėjimą kiekvieno išorinių virpesių poveikio metu. Taip pat buvo pastebėta, jog kai kuriais atvejais skysčio greičio kryptis tampa priešinga pradinei kryptčiai, kanale galima stebėti turbulentiškumą. Šie reiškiniai priklauso nuo dažnių ir amplitudžių, kuriomis yra veikiamas kanalas ir yra pateikti paveiksluose žemiau (2, 3).

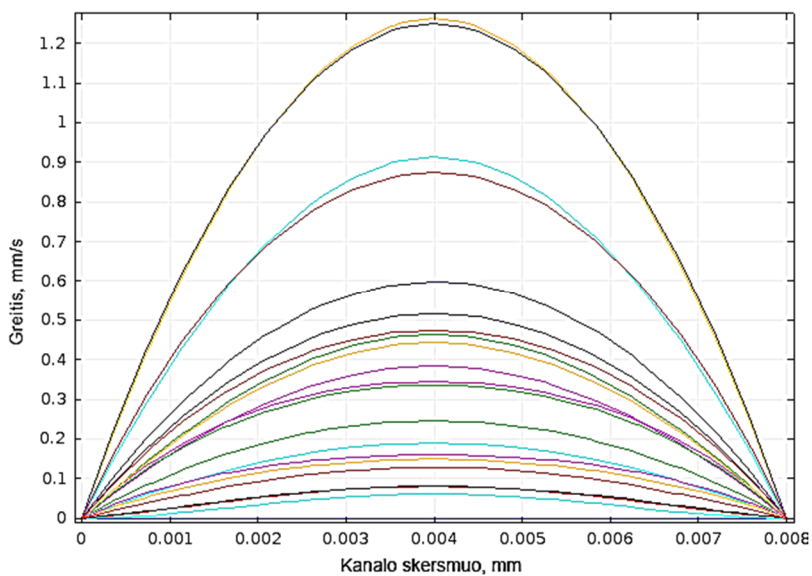
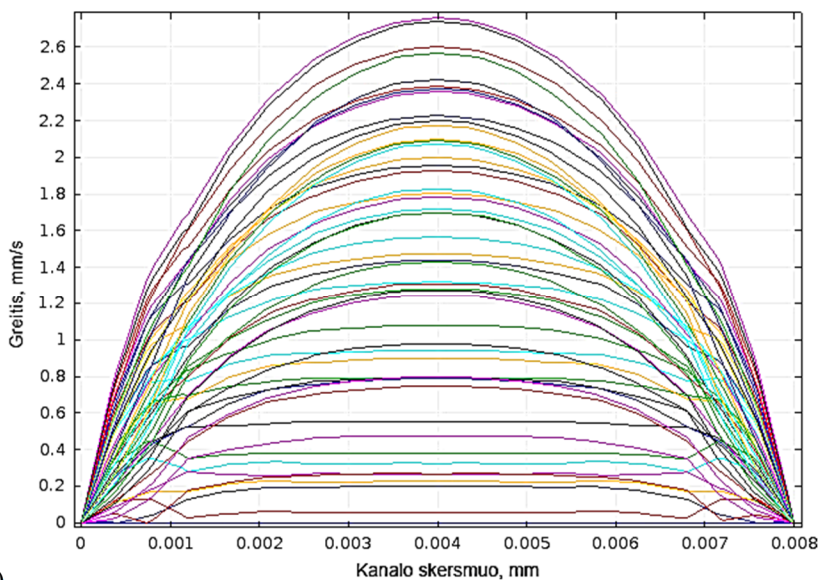


a)



b)

2 pav. Skysčio greičio spektrograma (a) ir pasiskirstymo laukas kanale veikiant 4,3 Hz virpesiams (b)



3 pav. Skysčio greičio pasiskirstymas kanale veikiant 4,3 Hz (a) ir 5,8 Hz virpesiams esant 6 mm poslinkio amplitudei

Tyrimų metu buvo pastebėta, jog siekiant gauti tokį patį rezultatą skirtingo skersmens kanale, reikia naudoti skirtingus dažnius ir skirtingus poslinkio diapazonus. Sukurtas modelis leidžia nesunkiai keisti šiuos dydžius ir pritaikyti bet kokio pobūdžio studijai.

Pastebėta, jog momentinis greitis padidėja iki 4 kartų, o vidutinis greitis padidėja daugiau nei 66 procentais esant 4,3 Hz virpesiams ir 6 mm poslinkiams. Tai leidžia teigti, jog vibracinis poveikis gali būti naudojamas kraujotakai žmogaus organizme gerinti. Apibendrinant šiuos rezultatus galima teigti, jog didžiausi greičio pokyčiai buvo gauti ties 4,3 Hz ir 6 mm poslinkiu, 5 Hz ir 5,4 mm ir 8 mm poslinkiu, 4,8 Hz ir 3,4 mm poslinkiu bei 5,8 Hz ir 6 mm poslinkiu. Tyrimai, kai buvo naudojami aukštesni dažniai nei 20 Hz su mažomis amplitudėmis (iki 1 mm), neparodė jokių didelių greičio pokyčių stebimame mikrokanale.

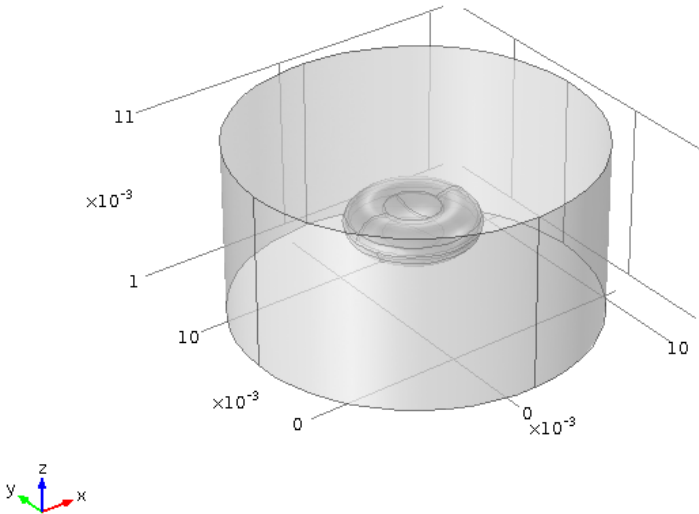
Eritrocito savųjų dažnių tyrimas

Eritrocito forma ir jo mechaninės savybės labiausiai priklauso nuo membranos mechaninių savybių. Eritrocito viduje esantis citozolio kiekis yra pastovus ir membrana apsaugo jį nuo pratekėjimo. Membranos plastiškumas leidžia eritrocitui, kurio vidutinis skersmuo yra 7,34 μm , o storis varijuoja nuo 1,4 iki 2,4 μm , lengvai deformuotis įtekant į kapiliarą, kurio skersmuo siekia 34 μm .

Modeliuojant eritrocitą, buvo apžvelgtos studijos, kuriose aprašomi tyrimai, analizuojant deformacijas, tačiau elgsena nėra galutinai aprašyta, nes vienuose tyrimuose naudojami tiesiniai modeliai, kituose netiesiniai.

Šiuo atveju tyrimuose membrana buvo aprašyta kaip netiesiškai deformuojama medžiaga bei, remiantis literatūra, nurodant abu Lame koeficientus, lygius 10^3 N/m^2 , tankį, lygų 1100 kg/m^3 , Jungo modulį – 4500 Pa, o Puasono koeficientą keičiant 0,49–0,499 diapazone.

Trys skirtingo tipo studijos buvo atliktos analizuojant eritrocito savuosius dažnius. Pirmiausia, buvo identifikuoti membranos savieji dažniai, vėliau eritrocito su citozoliu ir galiausiai į kraują panardinto ir citozoliu užpildyto eritrocito savieji dažniai. Šiems tyrimams atlikti buvo naudojamas „Acoustic-Solid Interaction Frequency Domain“ modulis.



4 pav. Į kraują panardinto eritrocito, trimatis modelis

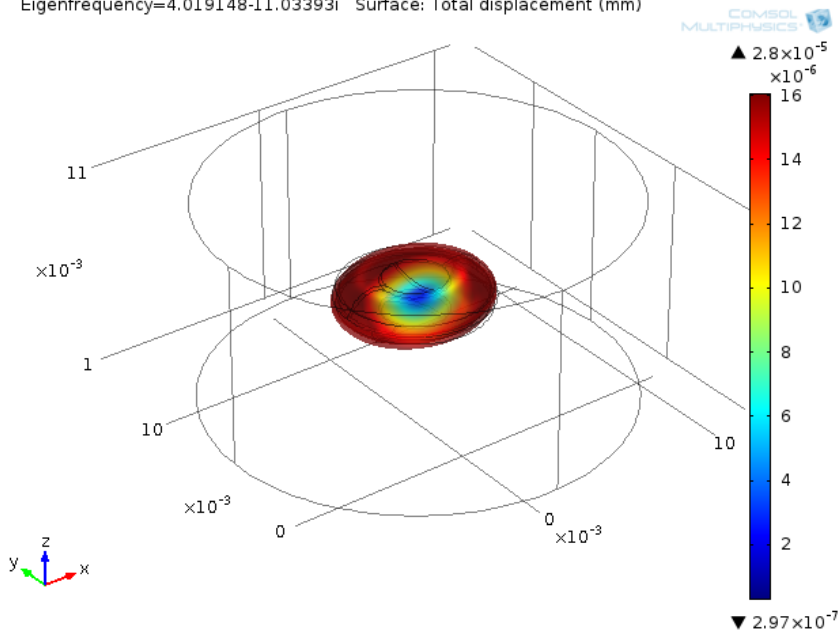
Apžvelgus atliktus tyrimus pastebėta, jog sergančiųjų cukriniu diabetu eritrocitų membranos Jungo modulis padidėja iki trijų kartų. Šiuo atveju susiduriama su problemomis, kurių nėra, kada sveikas eritrocitas, būdamas vidutiniškai $7,5 \mu\text{m}$ skersmens, deformuojasi taip, kad įtekėtų į $3 \mu\text{m}$ kanalą. Atsižvelgus į eritrocito deformacijų ypatumus, buvo nuspręsta atlikti jo savųjų dažnių analizę ir įvertinti artimiausius dažnius, kai deformuojamos atitinkamos eritrocito dalys, palengvinančios pratekėjimą mikrokanalu.

Analizuojant ligos nepažeisto eritrocito savuosius dažnius buvo nustatyta, jog didžiausios deformacijos, galinčios palengvinti pratekėjimą, aptinkamos esant $1,47 \text{ Hz}$ dažniui. Šiuo atveju, padidinus Jungo modulį tris kartus, taip imituojant ligos pažeistą eritrocitą, savieji dažniai padidėjo iki $1,87 \text{ Hz}$ ir išaugo deformuojamas plotas.

Toliau buvo tiriami savieji dažniai, kai citozoliu pripildytas eritrocitas yra panardinamas į kraują (4 pav.). Taip pat, kaip ir anksčiau, pirmiausia buvo atliekama nepažeisto eritrocito analizė, o vėliau, imituojant dėl diabeto padidėjusį standumą. Šiuo atveju, kai skaičiavimuose buvo naudojami sveiko eritrocito parametrai, buvo gautas $2,34 \text{ Hz}$ savasis dažnis, esant pageidaujamos deformuojamos eritrocito zonoms. Padidinus eritrocito standumą buvo

nustatytas 4,02 Hz savasis dažnis (5 pav.), kai deformuojami plotai buvo artimi įtekančio į kapiliarą eritrocito lenkiamoms sritims.

Eigenfrequency=4.019148-11.03393i Surface: Total displacement (mm)



5 pav. Eritrocito deformacijos esant 4,02 Hz saviesiems dažniams

Atlikus eritrocito savųjų dažnių analizę pastebėta, jog išorinės modelio sritys deformuojamos esant žemo dažnio virpesiams. Šie rezultatai leidžia daryti prielaidą, jog esant išorinių virpesių poveikiui galima palengvinti ligos pažeisto eritrocito pratekamumą per kapiliarą. Atsižvelgiant į šiuos rezultatus buvo nuspręsta atlikti eritrocito įtekėjimą į kapiliarą analizuojantį tyrimą, paveikiant modelį išoriniais žemo dažnio virpesiais.

Eritrocito deformacijų ir maksimalaus kontakto slėgio tarp membranos ir kapiliaro sienelės tyrimai veikiant išoriniams virpesiams

Imituojant eritrocito įtekėjimą į kapiliarą, buvo įtrauktas papildomas parametras – kontakto pora tarp eritrocito išorinių sienelių ir kapiliaro vidinės sienelės. Pirmiausia buvo atliktas bandymas su nepažeisto eritrocito medžiagos savybėmis bei neveikiant modelio išoriniais virpesiais. Vėliau buvo atliktas bandymas padidinus eritrocito membranos Jungo modulį tris kartus, o galiausiai ir uždavus išorinių virpesių dažnį su poslinkiu. Skaičiavimų metu buvo stebimas maksimalaus kontakto slėgio pokytis kiekvienu atskiru atveju. Kontakto slėgis yra aprašomas kaip funkcija x ašyje, žemiau pateikta lygtimi:

$$P = \sqrt{\frac{F_n E'}{2\pi R'}} \times \left(1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2\right) \quad (18)$$

$$a = \sqrt{\frac{8F_n R'}{\pi E'}} \quad (19)$$

kur F_n yra jėga per ilgio vienetą, E' yra kompleksinis tamprumo modulis, o R' kompleksinis spindulys. Kompleksinių Jungo modulių ir spindulių lygtys pateiktos žemiau:

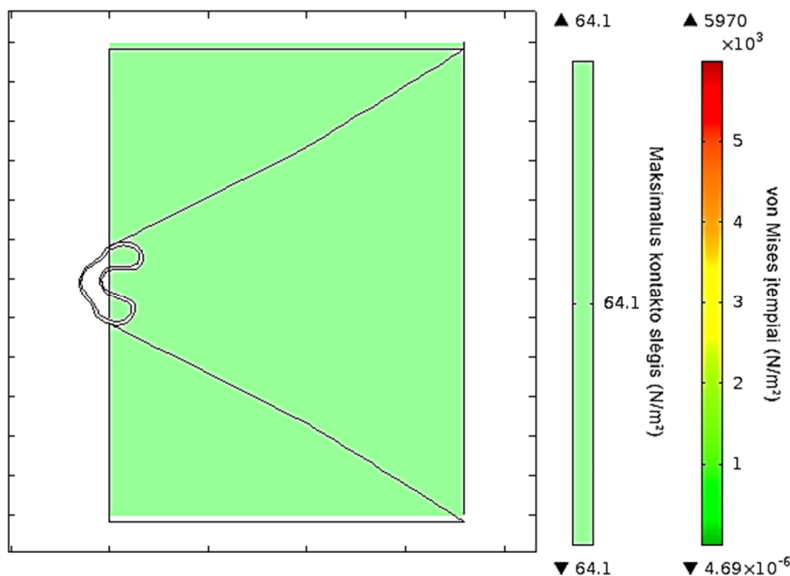
$$E' = \frac{2E_1 E_2}{E_2(1 - v_1^2) + E_1(1 - v_2^2)} \quad (20)$$

$$R' = \lim_{R_2 \rightarrow \infty} \frac{R_1 R_2}{R_1 R_2} = R_1 \quad (21)$$

Eritrocito membranos ir kapiliaro sienelės Jungo moduliai atitinkamai yra E_1 ir E_2 , o R_1 yra eritrocito viršutinės dalies spindulys. Skaičiavimuose buvo naudotas „bausmės“ metodas, taikant apkrovą kontakto paviršiuje. Šis parametras gali būti išreiškiamas naudojant lokaliają kontakto plyšio atstumo kintamojo reikšmę g , pastovų „bausmės“ koeficientą δ ir apskaičiuotą kontakto slėgį T_0 .

$$T_n = \begin{cases} T_0 - E h_{min} \delta g & \text{if } (g \leq 0) \\ T_0 e^{-\frac{E h_{min} \delta g}{T_0}} & \text{arba} \end{cases} \quad (22)$$

Nepažeisto eritrocito maksimalus kontakto slėgis tarp sienelių įtekėjimo metu buvo lygus 29,8 N/m². Padidinus membranos standumą, šis slėgis padidėjo tris kartus, iki 89,4 N/m². Toliau modeliui buvo suteikiamas vibracinis judėjimas, lygus 3 Hz ir esant 5 mm poslinkiui. Kontakto slėgis padidėjo iki 95,9 N/m². Slėgis didėjo ir kai poslinkis buvo lygus 10 mm. Padidinus poslinkį dar 5 mm, gauta mažesnė reikšmė nei nenaudojant išorinių virpesių, ir buvo lygi 87,3 N/m². Kai poslinkis buvo lygus 20 mm, maksimalus kontakto slėgis sumažėjo iki 64,1 N/m² (6 pav.). Šiuo atveju buvo nustatyta, jog esant 3 Hz dažniui, maksimalus kontakto slėgis sumažėja prie 13–22 mm poslinkių. Analogiško pobūdžio studija buvo atlikta ir esant 4 Hz dažniui. Šiuo atveju ryškus kontakto slėgio sumažėjimas gautas esant 0,6–2 mm diapazono poslinkiams ir siekia 41,2 N/m² reikšmę.



6 pav. Ligos paveikto eritrocito įtekėjimas į kapiliarą esant 3 Hz virpesiams ir 20 mm poslinkiams

Sukurti skaitmeniniai kraujagyslės, kapiliaro ir eritrocito modeliai buvo panaudoti skaičiavimams „COMSOL Multiphysics“ terpėje atlikti. Tyrimai buvo suskirstyti į atskiras studijas: i) skysčio tėkmės mikrokanale tyrimai veikiant išoriniams virpesiams; ii) eritrocito savųjų dažnių skaičiavimai įvertinant medžiagos savybių pokyčius; iii) eritrocito pratekėjimo gerinimas paveikiant jį išoriniais virpesiais įtekėjimo į kapiliarą metu.

Pagrindiniai teorinių tyrimų rezultatai pateikiami žemiau:

- „COMSOL Multiphysics“ terpėje sukurti modeliai suteikia galimybę juos naudoti ateityje, tęstiniuose tyrimuose. Tyrimai parodė, jog žemo dažnio virpesiai (nuo 4 iki 8 Hz) ir amplitudės (nuo 3,4 iki 8 mm) gali smarkiai pagerinti kraujo tėkmę. Tačiau didesni nei 20 Hz dažniai kartu su mažesnėmis nei 1 mm amplitudėmis didelės įtakos skysčio tėkmei neturi.
- Analizuojant eritrocito membranas, eritrocito, užpildyto citozoliu ir eritrocito, užpildyto citozoliu ir panardinto į kraują savuosius dažnius, atlikti trijų tipų savųjų dažnių tyrimai. Jie parodė, kad žemo dažnio virpesiai gali būti naudojami siekiant inicijuoti pažeisto eritrocito deformacijas. 4,02 Hz dažnis nustatytas kaip tinkamiausias, paveikiantis pažeisto eritrocito išorinius membranos plotus. Kiekvienu

atveju, siekiant tiksliai nustatyti eritrocito savuosius dažnius, turi būti tiksliai identifikuotos jo membranos savybės..

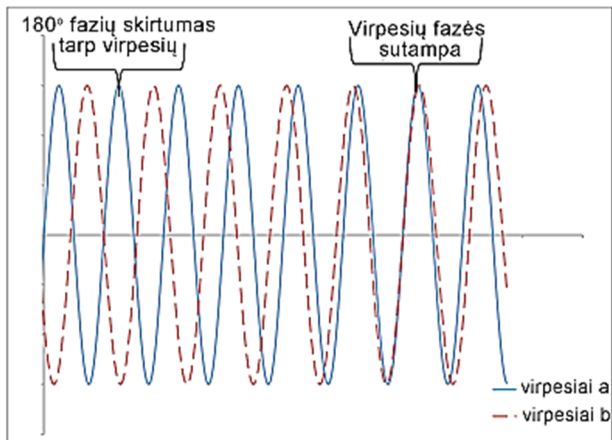
- Nepažeisto ir ligos paveikto eritrocito įtekėjimas į kapiliarą buvo tirtas registruojant maksimalaus kontakto slėgio pokyčius. Rezultatai parodė, jog 3Hz virpesiai esant 13–22 mm poslinkio amplitudžių diapazonui sumažino maksimalų kontakto slėgį 28 procentais. Maksimalus kontakto slėgis padidėjo, kai poslinkis viršijo 22 mm. Atlikus tyrimus, kada modelis buvo virpinamas 4 Hz dažniu bei esant 0,6–2 mm amplitudei, nustatytas maksimalaus kontakto slėgio sumažėjimas buvo lygus 54 %.

3. KRAUJOTAKĄ STIMULIUOJANČIŲ ĮRENGINIŲ SUKŪRIMAS

Išsami literatūros, patentų ir rinkoje esančių vibracinių sveikatos gerinimo priemonių analizė leido išgryninti problematiką ir nišą, kuri dar nėra užpildyta. Šiuo metu prieinamose priemonėse yra naudojamas didesnis nei 20 Hz dažnis ir akcentuojamas šių įrenginių taikymas yra kitose srityse, neišskiriant kraujotakos gerinimo. Taip pat pažymimi šalutiniai veiksniai, galintys sukelti stuburo funkcijos sutrikimus arba neigiamai paveikti žmogaus vidinius organus. Atsižvelgiant į tai, buvo nuspręsta sukurti du atskirus įrenginius, kuriuose būtų naudojami anksčiau teoriniuose skaičiavimuose išgrynintos žemo dažnio virpesių reikšmės, kurias perduodant lokaliai, būtų gerinama kraujotaka žmogaus galūnėse. Taip būtų sprendžiamos cukrinio diabeto ir artrito sukeltų ligų problemos.

Plaštakų aktuatorius

Atsižvelgiant į įrenginių panaudojimo sritį, buvo išskirta mažų gabaritų ir pakankamos jėgos, generuojant žemo dažnio virpesius, problemos. Nuspręsta naudoti mušimo reiškinį, kuris vyksta esant dviem harmoniškai virpantiems šaltiniams ir nedideliam dažnių skirtumui tarp jų (7 pav.).



7 pav. Mušimo reiškinys

Mušimo reiškinys leidžia perduoti energiją į sistemą, kai, panaudojant du aukšto dažnio šaltinius, sugeneruojami žemo dažnio virpesiai. Dviejų neslopinančių švytuoklių judesio lygtis aprašyta žemiau:

$$\begin{bmatrix} 1 & \mu\alpha\mu \\ \alpha & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_1^2 & 0 \\ 0 & \omega_2^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (23)$$

kur μ – masės santykis, ω_1 savasis kūno dažnis ir ω_2 yra slopintuvo savasis dažnis, o x_1 ir x_2 yra sistemų poslinkiai.

Sistemos modaliniai dažniai aprašomi lygtimi:

$$\bar{\omega}_{1,2} = \sqrt{\frac{\omega_1^2 + \omega_2^2(1 + \mu) \pm \Pi}{2(1 + \mu - \alpha^2\mu)}}, \quad (24)$$

kur $\Pi = (\omega_1^2 - \omega_2^2(1 + \mu))^2 + 4\omega_1^2\omega_2^2\alpha^2\mu$.

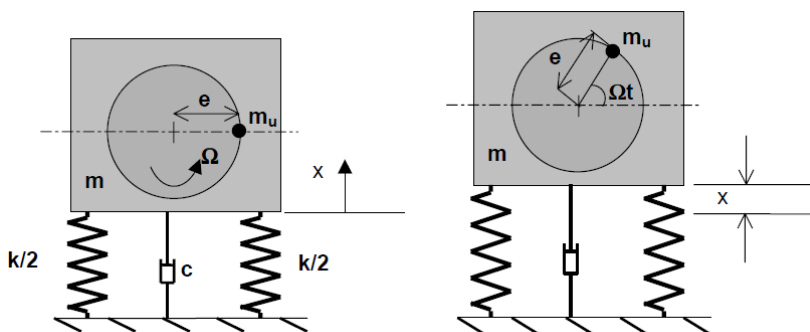
Parametras α apibūdina mušimo reiškinį.

Kuriant vibracinę apyrankę buvo tikslinga parinkti ir įvertinti galimų variklių potencialiai sukuriama jėgą ir jos pakankamumą. Dėl šios priežasties skaičiavimuose buvo priimta naudoti spyruoklės-masės sistemą (8 pav.), galinčią judėti tik vertikalia ašimi ir žadinamą disbalansinėmis masėmis. Šiuo atveju x reiškia poslinkį, m yra ekscentriko masė, o r yra atstumas nuo variklio rotoriaus iki ekscentrinės masės centro, ω yra kampinis greitis, o M yra visos sistemos masė. Judesio lygtis aprašoma taip:

$$(M - m) \frac{d^2x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx = F_0 \sin(\omega t) \quad (25)$$

Sukuriama jėga gali būti išskaičiuota iš paprastos lygties, pateikiamos žemiau:

$$F = mr\omega^2 \quad (26)$$



8 pav. Variklių su disbalansinėmis masėmis schema (kairėje – pusiausvyra sistema ($t=0$); dešinėje – sistemos poslinkis, praėjus laikui t .)

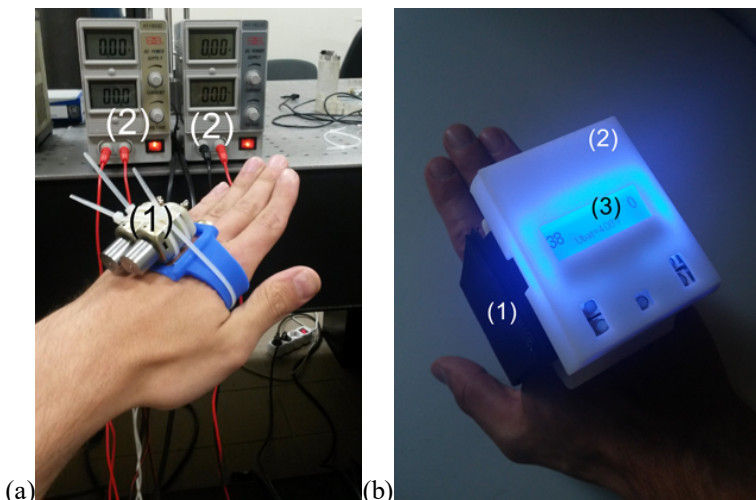
Atlikus skaičiavimus nustatyta, jog variklio kampinis greitis turi būti ne mažesnis nei 2000 apsisukimų per minutę ir siekiantis 5700 apsisukimų per minutę, leidžiančių sukurti pakankamą jėgą (6–42 N) esant žemo dažnio mušimui. Šiuo atveju buvo parinkti elektromechaniniai Johnson 20703 varikliai.

Dinaminiai tyrimai buvo atliekami su eksperimentiniu stendu, kuriame varikliai su disbalansinėmis masėmis buvo pritvirtinti prie stiklo pluošto sijos, viršuje jų pritvirtintas poslinkio jutiklis registravo judėjimo parametrus. Taip buvo identifikuoti pagrindiniai darbo režimai (2–10 Hz diapazone) bei apskaičiuotos sukuriamos jėgos prie skirtingų dažnių diapazonų (pirma: 3,31–11,54 N; antra: 12,32–28,08 N; trečia: 26,29–41,48 N). Pirmoje grupėje virpesiai neviršijo 10 Hz, todėl ši grupė įvardyta kaip saugiausia ir nuspręsta naudoti šio diapazono dažnius.



9 pav. Vibrovarikliai (3) ant sijos (2) su slopinimo elementu (1) ir poslinkio jutikliu (4)

Atsižvelgiant į apibrėžtus reikalavimus, buvo sukurtas dėžutės maketas bei pagaminta elektroninė valdymo schema su autonominiu maitinimu ir cikliškai pakraunamu elementu. Šis įrenginys bus naudojamas tolimesniuose tyrimuose, analizuojant virpesių poveikį žmogaus kraujotakai plaštakose (10 pav.).

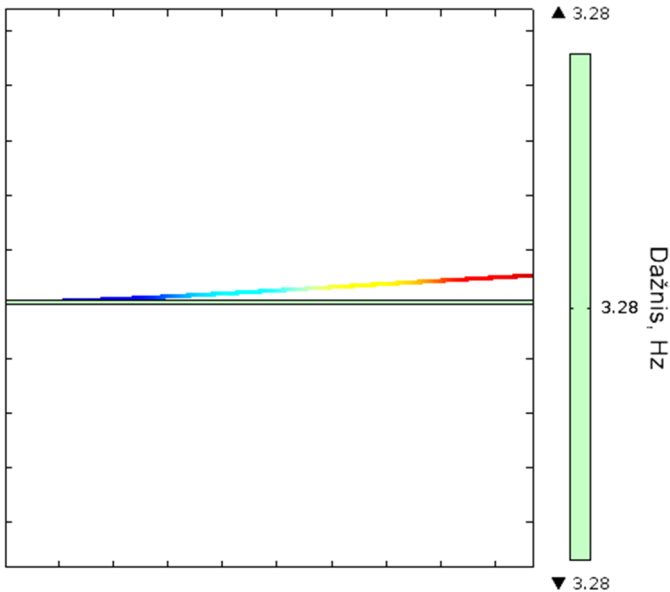


10 pav. Įrenginio pirminis prototipas (1 – vibraciniai varikliai, 2 – laboratoriniai maitinimo šaltiniai) (a) ir (b) autonomiškai veikiantis prototipas (1 – rankos dirželis, 2 – 3D spausdintuvu atspausdintas įrenginio korpusas; 3 – valdymo panelės ekranas)

Kojų kraujotakos stimuliavimo įrenginys

Išskirtinai pėdų kraujotakai gerinti, kas ypač aktualu diabetu sergantiems pacientams, buvo nuspręsta sukurti vibracinį akuatorių kojoms. Įvertinant tai, jog kojų svoris palyginti su plaštakomis didesnis, reikėjo sukurti atskirą įrenginį. Šiuo atveju didesnės jėgos poreikiui patenkinti buvo nuspręsta naudoti didesnės galios elektromechaninius variklius, kuriuos būtų galima pritvirtinti prie lanksčios plokštumos, ant kurios būtų pozicionuojamos testuojamojo kojos. Įvertinus stiklo pluošto plokštės panaudojimo galimybes, buvo nuspręsta suprojektuoti atitinkamą laikinąją konstrukciją su kintamo dydžio kampu ir judamąja kojų atraminės plokštės dalimi. Atsižvelgiant į galios ir dažnių diapazono santykį, buvo nuspręsta sukelti mušimo reiškinių ir jo metu dirbti plokštės rezonansiniuose dažniuose, taip turint didesnio diapazono judėjimo amplitudę. Apskaičiavus teorinę kojų masę testuojamojo svorio diapazone nuo 55 iki 100 kg, „COMSOL Multiphysics“ 2D terpėje buvo suprojektuota analogiška gembė. Apkrovus ją kojų ir variklių svoriu, išskaičiuoti savieji dažniai. Šiuo atveju kojų masė (25,02 kg) parinkta atsižvelgiant į planuojamus bandymus su testuojamuoju realioje aplinkoje, pridodant ir variklių

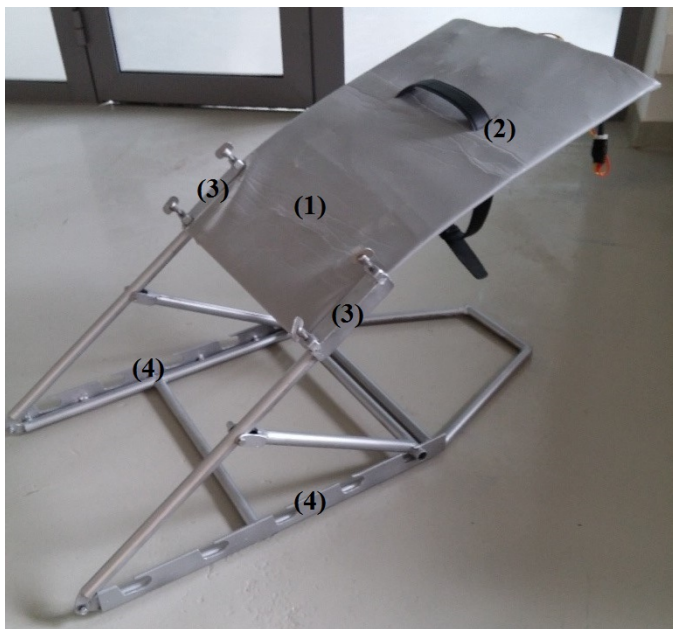
svorį (6,43 kg) kartu su disbalansinėmis masėmis. Apkrovus gembę šiomis masėmis apskaičiuotas jos savasis dažnis buvo lygus 3,28 Hz (11 pav.).



11 pav. Savieji apkrautos gembės dažniai

Toliau buvo atliekami identiški skaičiavimai, keičiant nuo testuojamojo masės priklausomą kojų sukuriamą apkrovą. Išskaičiuoti savieji dažniai testuojamosioms moterims nuo 55 iki 70 kg svorio buvo 3.47–3.25 Hz diapazone, o vyrams, nuo 75 iki 100 kg svorio buvo nuo 3.28 Hz iki 3.02 Hz.

Kojų vibracinis akuatorius (12 pav.) buvo kuriamas atsižvelgiant į ISO 2631-1 gairėse esančias rekomendacijas dėl vibracijų poveikių žmogaus organizmui, eliminuojant vertikalių vibracijų neigiamą poveikį stuburui žmogui stovint ant virpesių šaltinio. Tolimesniuose vystymo etapuose numatyta treniruoklį pritaikyti išskirtinai žmonėms su negalia, padedant paprasčiau pakelti kojas, jas fiksuoti ir atlikti kraujotakos stimuliaciją išoriniais virpesiais. Analogiško tipo elektroninė schema panaudota įrenginiui valdyti, kaip ir vibroapyrankės atveju (10 (a) pav.), tačiau dabar maitinimui naudojant elektros tinklą.



12 pav. Kojų aktuatorius (1 – stiklo pluošto plokštė; 2 – kojas fiksuojantis diržas; 3 – plokštės fiksavimo taškai; 4 – kampo posvyrio nustatymas)

Skyriuje aprašomi sukurti įrenginių prototipai yra unikalūs ir išsiskiria iš rinkoje esančių sprendimų dėl naudojamos metodologijos bei pritaikomumo kraujotakai skatinti. Sukeliant mušimo reiškinių, sugeneruojama pakankamo dydžio jėga plaštakoms ir pėdoms virpinti žemų dažnių diapazone.

Žemiau pateikiamos bendros skyriaus išvados:

- Eksperimentinis stendas buvo sukurtas ištirti bei identifikuoti vibrovariklių darbinius dažnius. Atsižvelgiant į rezultatus, buvo sukurta vibracinė apyrankė, kurioje panaudojami žemo dažnio virpesiai, sukuriama sukeldami mušimo reiškinių. Apyrankę numatoma išskirtinai pritaikyti artritu sergantiems pacientams dėl pasikartojančių skausmų rankose.
- Kojų vibracinis treniruoklis buvo sukurtas skatinti kraujotakai pėdose, tai ypač aktualu sergantiems diabetu ar žmonėms, nevaldantiems kojų.
- Teoriniai skaičiavimai leido identifikuoti savuosius virpančios plokštelės dažnius esant skirtingiems tiriamųjų svoriams, taip parenkant įrenginio darbinius režimus kraujotakos gerinimo studijoms.
- Savieji dažniai 3,47 Hz 3,25 Hz (5570 kg) diapazone moterims ir 3,28 Hz – 3,02 Hz vyrams (75–100 kg) buvo nustatyti siekiant sukurti rezonansinį dažnį, taip sukeldami didesnę judesio amplitudę.

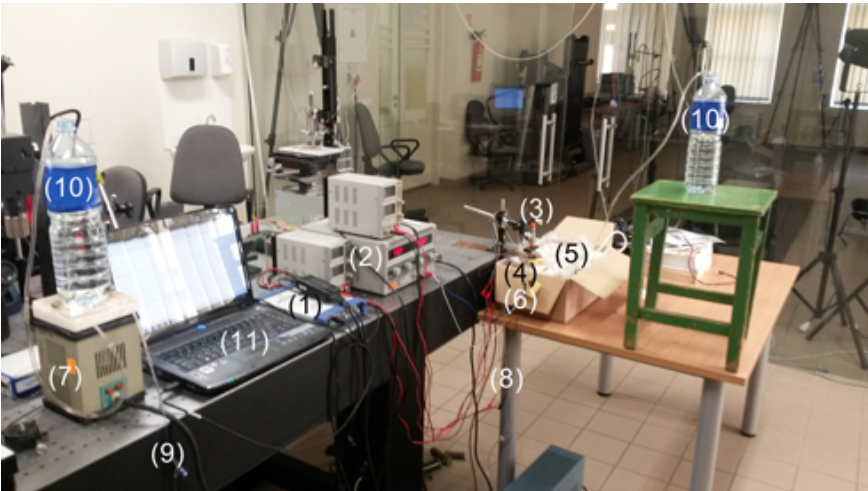
4. EXPERIMENTINIAI KRAUJOTAKOS GERINIMO TYRIMAI VEIKIANT GALŪNES IŠORINIAIS VIRPESIAIS

Šiame skyriuje aprašomi eksperimentiniai vibracinio poveikio tyrimai kraujo tėkmės parametrams. Pagrindinis aprašomų tyrimų tikslas – identifikuoti 0,5–30 Hz vibracijų poveikį tekančio kraujo slėgiui ir greičiui, panaudojant unikalius eksperimentinius stendus ir mikrodalelių sraute vizualizacijos ir judėjimo greičio matavimo įrangą.

Be to šiame skyriuje aprašomi tyrimai, kuriuose buvo vertinamas virpesių poveikis žmogaus fiziologiniams parametrams. Pirmiausia buvo įvertinta žmogaus kūno audinio slopinimo įtaka, esant iš anksto užduotiems virpesiams. Tada buvo atliekami širdies ritmo dažnio, EKG, kvėpavimo dažnio bei galūnių temperatūrų pokyčių matavimai esant išorinių virpesių poveikiui.

Eksperimentinis kraujotakos imitavimo stendas ir slėgio matavimai

Tekančio kraujo slėgio matavimai buvo atliekami sukurtame tyrimų stende (13 pav.), kurį sudarė peristaltinis siurblys, pagamintas slėgio jutiklis, dirbtinė kraujagyslė, vibroaktuatorius.

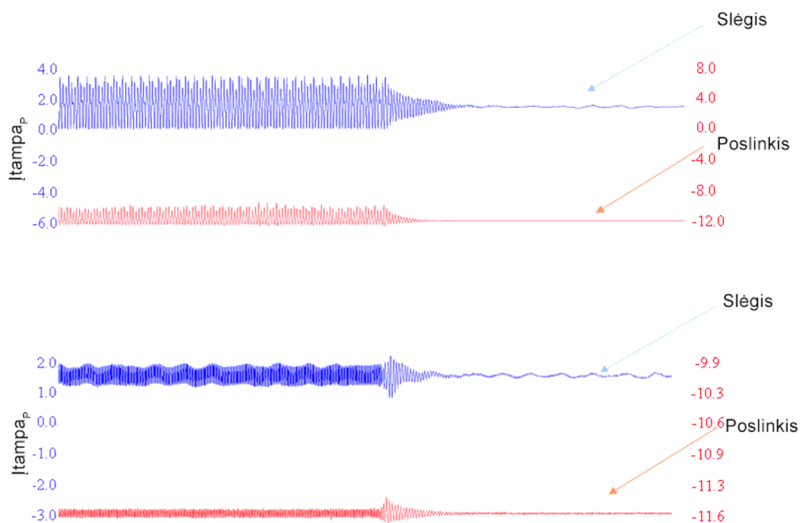


13 pav. Eksperimentinis stendas: 1 – osciloskopas; 2 – maitinimo šaltiniai; 3 – poslinkio jutiklis; 4 – vibroaktuatorius; 5 – slopinimo elementas; 6 – slėgio jutiklis; 7 – peristaltinis siurblys; 8 – dirbtinė kraujagyslė; 9 – medicininiai vamzdeliai; 10 – skysčio talpos; 11 – kompiuteris su „Picoscope“ programine įranga

Iš pradžių tyrimas buvo atliekamas su vienu varikliu, keičiant jo maitinimo įtampą, taip didinant apsisukimų dažnį. Vėliau buvo eksperimentuojama su dviem

varikliais, keičiant įtampą tokiu pačiu diapazonu, nuo 3 V iki 16 V, kas 0,1 V žingsniu. Galiausiai pakartotiniuose bandymuose buvo naudojamas slopinimo elementas. Bandymai buvo atlikti tiek su medicininiais vamzdeliais, tiek ir su dirbtine kraujagysle. Tyrimo pradžioje užduotas 4,5 kPa slėgis yra artimas slėgiui žmogaus kapiliare. Peristaltinio siurblio darbinis režimas buvo lygus 1 Hz, atitinkančiam 60 dūžių per minutę širdies ritmą.

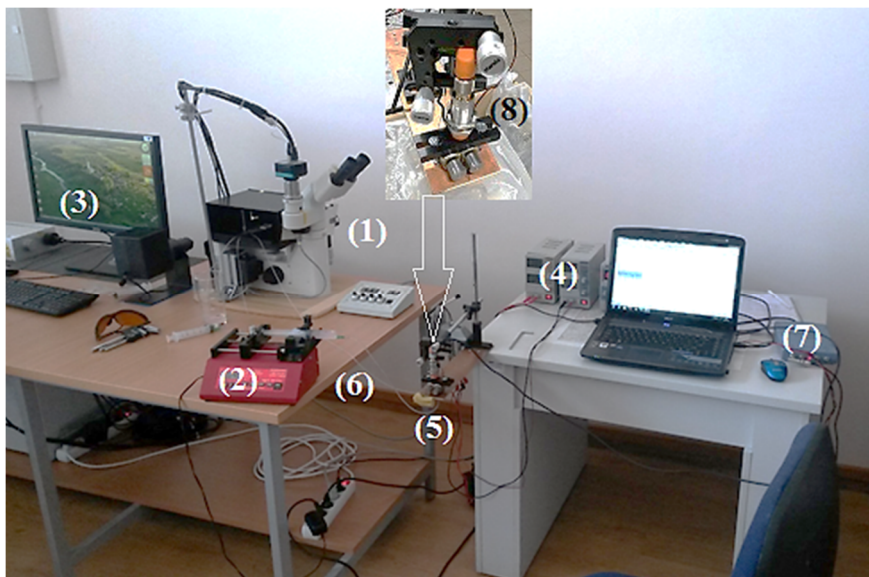
Atliekant tyrimus su vienu varikliu ir naudojant medicininius vamzdelius, didelių slėgio pokyčių nebuvo užfiksuota, tačiau įjungus ir antrą variklį, didžiausias užfiksuotas slėgio pokytis kanale buvo lygus 1 kPa. Esant mušimo reiškiniui aiškiai matosi, jog slėgio pokyčiai tiesiogiai priklauso nuo judesio virpesių ir matomas momentinis slėgio didėjimas arba mažėjimas lygiagrečiai gembės judėjimui. Tyrimo su dirbtine kraujagysle metu, gautas slėgio pokytis padidėjo net ir naudojant tik vieną variklį bei siekė 3kPa esant 6 Hz virpesiams. Naudojant du variklius ir sukeltą mušimą, šis pokytis padidėjo iki 8 kPa (14 pav.).



14 pav. Slėgio pokyčiai naudojant dirbtinę kraujagyslę: 8 kPa slėgio pokytis naudojant du variklius (viršuje); 3 kPa slėgio pokytis naudojant vieną variklį (apačioje)

Eksperimentinis kraujo tėkmės greičio matavimas naudojant mikrodalelių sraute vizualizacijos sistemą

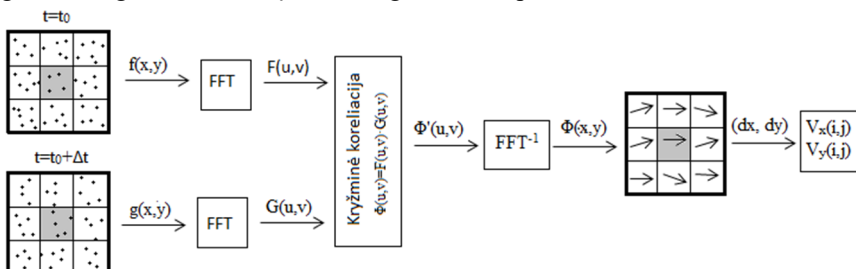
Srautų matavimai mikrokanale buvo atliekami Lietuvos energetikos institute, panaudojant sukurtą eksperimentinį standą bei apjungiant jį su mikro-srautų matavimo įranga.



15 pav. Eksperimentinis stendas: 1 – Leica DM ILM mikroskopas; 2 – švirktinis siurblys; 3 – YAG lazeris; 4 – maitinimo šaltiniai; 5 – vibroaktuatorius; 6 – medicininiai vamzdeliai; 7 – osciloskopas *Picoscope 3424*; 8 – poslinkio jutiklis IFM IG6084

Atsižvelgiant į ankstesnių tyrimų rezultatus, buvo parinktos atitinkamos variklių įtampos reikšmės, leidžiančios sukelti mušimo reiškinių. Vibroaktuatorius buvo naudojamas 1 m atstumu iki matavimo įrenginio. Bandymuose buvo registruojami poslinkiai ir paskaičiuojami judesio dažniai.

Fluorescentinės dalelės skystyje, kurių diametras yra $1,0 \mu\text{m}$ buvo naudojamos greičio bei srautų matavimams atlikti. Principinėje vaizdinės analizės schemoje (pateikta 16 pav.) (naudojama atvirkštinė Furjė transformacija, dėl jos gaunamas greičio vektorių laukas ir greičio komponentės.



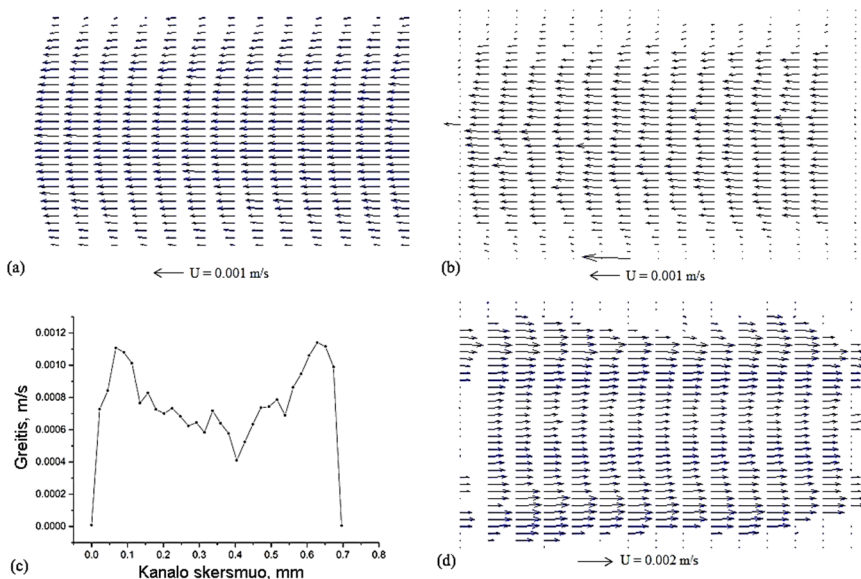
16 pav. Principinė mikrodalelių sraute vizualizacijos sistemos koreliacijos nustatymo schema

Poslinkių skaičiavimai buvo atliekami visoms dalelėms, panaudojant kryžminės koreliacijos metodą su greittąja Furjė transformacija (27).

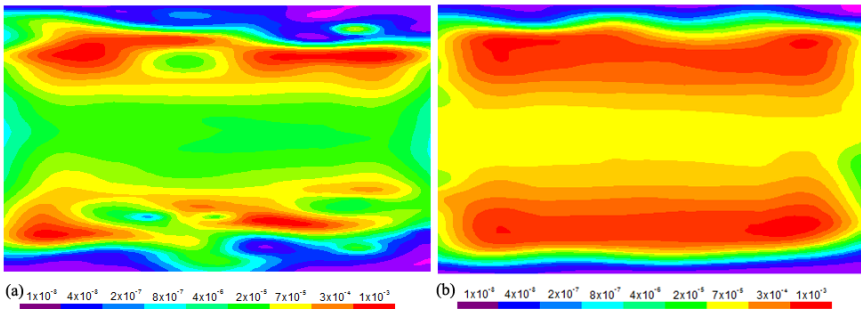
$$\Phi(x, y) = \sum_{x=1}^p \sum_{y=1}^q f(x, y) \cdot g(x + m, y + n), \quad (27)$$

kur p ir q – grynųjų langų matmenys x ir y kryptimis; $f(x, y)$ ir $g(x, y)$ – vaizdų intensyvumo funkcijos pirmame ir antrame kadre; m ir n – poslinkio koordinatės; $\Phi(x, y)$ – koreliacijos funkcija tarp dviejų grynųjų langų ($p \times q$ dydis) su tarpusavio poslinkiu (x, y) .

Analizės metu buvo pastebėtas turbulentiškumas kanale esant tam tikro diapazono virpesiams ir poslinkiams (17, 18 pav.). Atskirais laiko momentais (esant 4,3 Hz dažnio virpesiams), greitis padidėja iki 2,7 mm/s, kai pradinis greitis yra lygus 0,65 mm/s neveikiant išoriniams virpesiams. Kai tyrimuose buvo naudojamas 4,9 Hz, 5 Hz, 5,7 Hz mušimo dažnis, vidutinis greitis matavimų metu išaugo ir siekė 0,8 mm/s. Kitų matavimų metu vidutinis greičio prieaugis buvo mažesnis ir siekė 0,7 mm/s. Trumpi priešingos krypties 1,5 mm/s greičio impulsai buvo pastebėti esant 5 Hz, 5,3 Hz, 5,4 Hz ir 5,8 Hz dažnių virpesiams, tai ir sukelia turbulentiškumą kanale ir padidina skysčio slėgį.



17 pav. (a) Greičio vektorių laukas be virpesių; (b) Greičio vektorių laukas esant mažai amplitudei (2,4 Hz, 0,98 mm); (c) Greičio pasiskirstymas kanale ir (d) greičio vektorių laukas esant aukštesnėms amplitudėms (4,3 Hz, 6 mm).

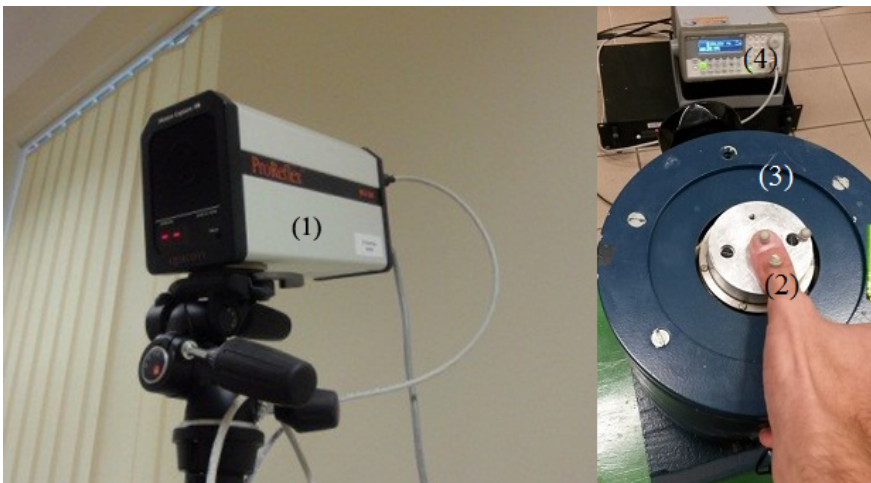


18 pav. (a) Skysčio greičių spektrogramos prie 4,3 Hz dažnio ir 6 mm amplitudės; (b) Skysčio greičių spektrogramos esant 5,8 Hz virpesiams ir 6 mm amplitudei

Analizės metu užfiksuoti ryškūs skysčio greičio pokyčiai esant žemo dažnio virpesiams bei atitinkamoms judesio amplitudėms. Tai leidžia daryti prielaidą, jog mechaniniai virpesiai gali būti naudojami žmogaus kraujotakai intensyvinti.

Žmogaus audinio pagreičių signalo atsako analizė

Žmogaus audinio įtakos išorinių virpesių užduodamam signalui analizės studija buvo atlikta panaudojant vibracinį stendą su iš anksto užduotomis virpesių reikšmėmis bei judesių registravimo įranga (19 pav.).



19 pav. Eksperimentinis stendas: 1 – *ProReflex MCU 500* tipo 170 241 *Qualisys* kamera ir žymekliai (2) and piršto ir *VebRobotron 11077* vibrostendo (3); (4) – dažnių generatorius *Tabor Electronics WW5064 50 Ms/s*

Buvo tiriamas dviejų asmenų, turinčių skirtingą kūno masės (22,0 ir 28,9) indeksą, piršto judėjimo dažnis. Tyrimo metu dažniai buvo keičiami 1 Hz žingsniu nuo 1 Hz iki 10 Hz, registruojant žymeklių judėjimo poslinkius 100 Hz tikslumu. Duomenys apdoroti „Matlab“ programine įranga, naudojant žemų dažnių (20 Hz) filtrą.

Esant 2 Hz dažnio virpesiams, buvo užfiksuotas 0,007 Hz skirtumas tarp piršto ir vibracinio stendo žymeklių. Esant 4 Hz virpesiams, tiriamiesiems buvo užregistruoti 0,138 Hz ir 0,054 Hz dažnių skirtumai. Didžiausi dažnių skirtumai gauti esant 9 Hz virpesiams ir buvo lygūs 0,209 Hz tiriamojo atveju su didesniu kūno masės indeksu bei 0,134 Hz tiriamajam su mažesniu kūno masės indeksu. Šios reikšmės, ypač prie žemų dažnių, nebuvo ženklios, dėl to nuspręsta tolimesniuose tyrimuose neatsižvelgti į galimus rezultatų pokyčius dėl žmogaus kūno audinio..

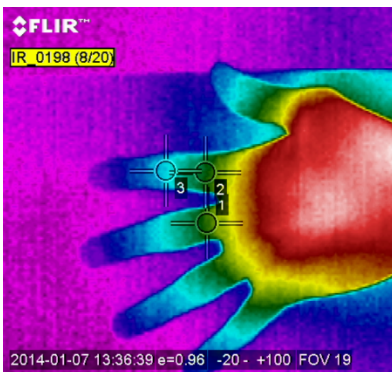
Vibroaktuatorių validavimas

Pirmųjų tyrimų metu buvo identifikuotas natūraliai generuojamas dažnis, jūdinant rankas ir kojas pagal Katsuzo Nishi teoriją bei registruojant judesius su 3D LIS331DLH MEMS akceleromentru. Užregistruotas dažnis vidutiniškai siekė 4 Hz. Toliau su *Schiller MT-101* dviejų kanalų holteriu buvo registruojama elektrokardiograma ir širdies ritmas bei su *Cardiologger* įrenginiu kvėpavimo dažnis, esant vibraciniam poveikiui. Tyrimo metu nustatyta, jog, esant aukštesnėms vibracijoms nei 6 Hz, pastebėtas padidėjęs kvėpavimo dažnis ir pokyčiai EKG kreivėje. Tai parodo, jog aukštesnio dažnio virpesiai sukelia diskomfortą ir tolimesniuose tyrimuose yra vengtini.

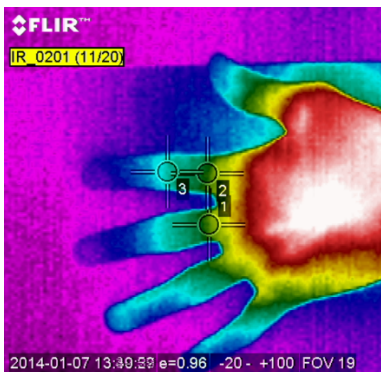
Kito tyrimo metu buvo išmatuotas vidutinis bei maksimalus širdies ritmas ramybės būsenoje ir palygintas su analogiško tipo duomenimis esant išorinių virpesių poveikiui panaudojant sukurtą vibracinės apyrankės prototipą. Visais matavimo atvejais vidutinės ir maksimalios širdies ritmo vertės buvo mažesnės esant išorinių virpesių poveikiui (vid. ŠR ramybėje: 59,25 palyginti su 57; 71,5 palyginti su 69; maksimalus ŠR: 64.5 palyginti su 61,25 ir 78 palyginti su 74,25).

Siekiant nustatyti kraujotakos pokyčius galūnėse buvo pasirinktas temperatūros matavimo metodas prieš vibracinį poveikį ir po jo. Plaštakos ir pėdos buvo virpinamos 1–6 Hz dažnių diapazone. Temperatūriniai pokyčiai buvo stebimi iš anksto pažymėtuose galūnių taškuose.

Matuojant temperatūrą plaštakose, didžiausi pokyčiai buvo užfiksuoti po 4–4:30 minučių po vibracinio poveikio. Didžiausias temperatūros padidėjimas, lygus 0,8 laipsnio pagal Celsijų gautas esant 3 Hz dažniui ant delno esančiame matuojamame taške. Visų matavimų metu buvo užfiksuotas 0,1–0,2 laipsnių pagal Celsijų vidutinis temperatūrinis prieaugis iš karto po pratimo ir 0,3–0,5 laipsnių prieaugis po 5 minučių. Rezultatai parodė, jog ryškūs temperatūros pokyčiai gali būti traktuojami kaip kraujotakos pagerėjimas esant žemo dažnio virpesių poveikiui (20, 21 pav.).

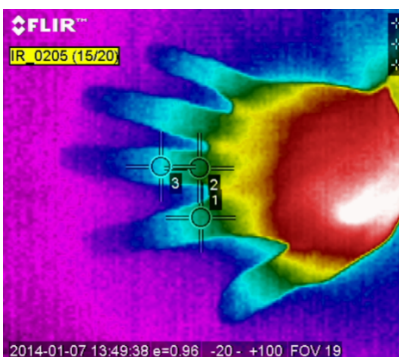


a)

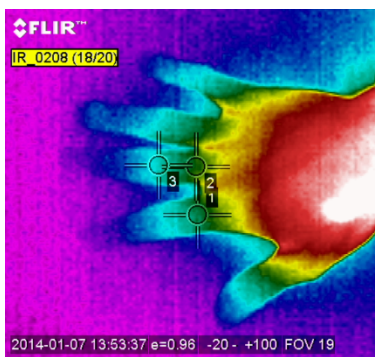


b)

20 pav. Plaštakos delno temperatūros matavimas trijuose taškuose: a) prieš eksperimentą; b) po eksperimento



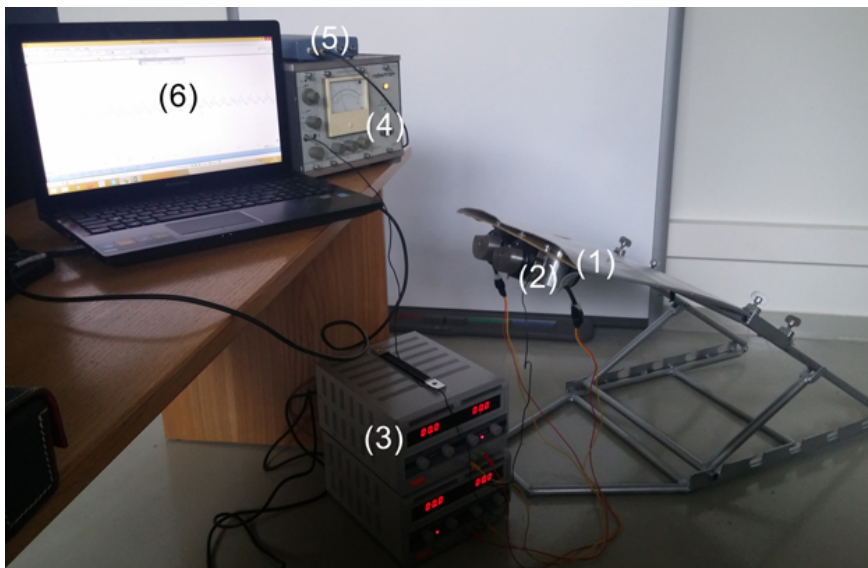
a)



b)

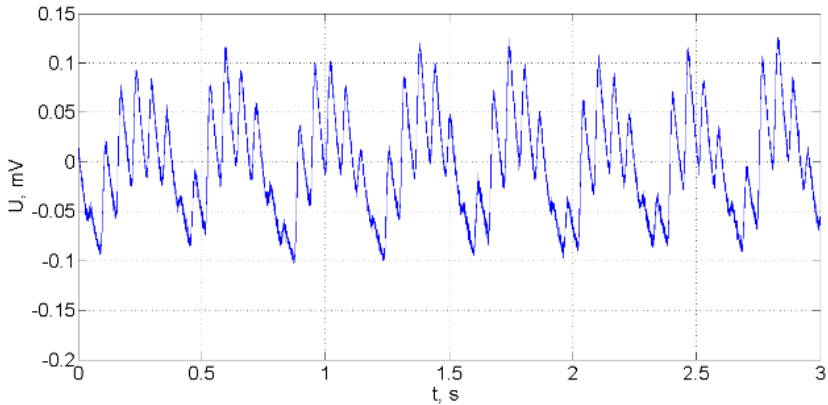
21 pav. Temperatūros matavimas išorinėje plaštakos dalyje: a) prieš eksperimentą; b) po eksperimento

Pėdų temperatūros matavimai buvo atliekami panaudojant sukurta kojų aktuatoriaus prototipą ir registruojant dažnius pagreičio jutikliu (22 pav.).



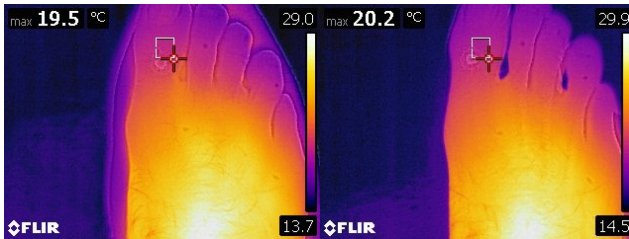
22 pav. Eksperimentinis kraujotakos kojose aktyvinimo stendas: 1 – kojų akuatorius; 2 – pagreičio jutiklis KB12; 3 – maitinimo šaltiniai; 4 – *Robotron 00032*; 5 – *Picoscope 3424*; 6 – kompiuteris su „Picoscope 6“ programine įranga

Vibracijų įtakai pėdų kraujotakai iširti buvo nuspręsta naudoti tokį patį metodą, kaip ir tiriant plaštakų temperatūrinius pokyčius. Buvo matuojami iš anksto pažymėti taškai pėdose su termovizorine kamera. Matavimai buvo atliekami iš karto po pratimo bei palaukus 3 ir 5 minutes. Visų pirma, buvo nustatytas darbinis dažnis, kuriame išgaunamas rezonansinis dažnis, lygus gautam teorinių skaičiavimų metu. Identifikuotos darbinės įtampos 0,5–4,8 Hz mušimo dažnio diapazone bei apskaičiuotos sukuriamos jėgos bandymų metu. Artimiausia reikšmė teoriškai apskaičiuotam rezonansiniam dažniui buvo gauta variklius maitinant 16,9 V ir 13,9 V įtampomis (23 pav.). Šis režimas buvo pasirinktas naudoti tolimesnėse studijose, matuojant temperatūrinius pokyčius pėdose.

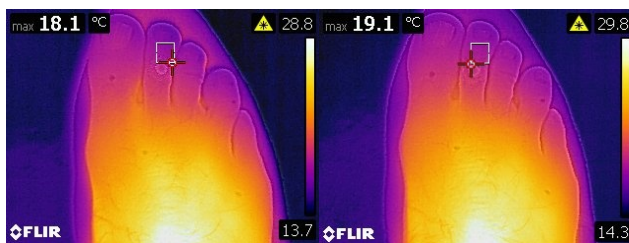


23 pav. Gembės virpesiai esant 16,9 V ir 13,9 V variklių maitinimo įtampoms ir 3,311 Hz mušimo reiškiniui, kai gaunama jėga lygi 180,2 N

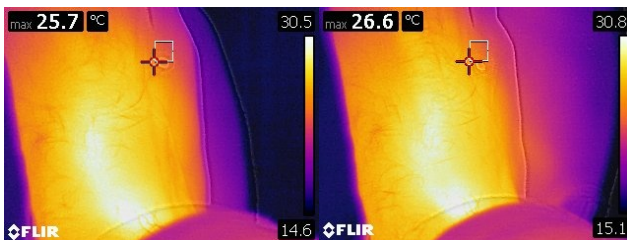
Didžiausi temperatūros pokyčiai buvo užregistruoti praėjus 3 minutėms po vibracinio pratimo ir buvo lygūs 0,7 laipsnio ant didžiojo piršto (24 pav.), 1 laipsniui ant ilgojo piršto (25 pav.), 0,9 laipsnio ant dešiniojo pėdos taško (26 pav.) ir 1,5 laipsnio pagal Celsijų ant kairiojo pėdos taško (27 pav.).



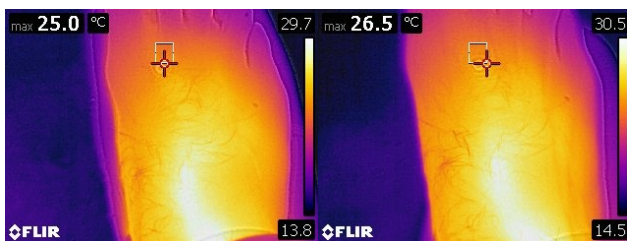
24 pav. Didžiojo piršto temperatūra prieš (kairėje) ir po (dešinėje) bandymo



25 pav. Ilgojo piršto temperatūra prieš (kairėje) ir po (dešinėje) eksperimento



26 pav. Dešiniojo pėdos taško temperatūra prieš (kairėje) ir po (dešinėje) eksperimento



27 pav. Kairiojo pėdos taško temperatūra prieš (kairėje) ir po (dešinėje) eksperimento

Ženklaus temperatūros pokyčiai leidžia daryti prielaidą, jog esant žemo dažnio išoriniams virpesiams, kraujotaka pėdose suaktyvėja. Tolimesni tyrimai numatomi atlikti panaudojant kapiliaroskopinę įrangą ir stebint kraujotakos pokyčius realiu laiku.

Apibendrinant tyrimą gautos tokios išvados:

- Kraujo slėgio pokyčio tyrimai, esant išorinių virpesių poveikiui, parodė didžiausius slėgio pokyčius kanale esant žemo dažnio virpesiams, o esant didesniems nei 10 Hz dažniams, vibracinis poveikis buvo nežymus. Pagal rezultatus, efektyviausi dažniai yra 2–5 Hz diapazone bei esant 4–20 mm judesio amplitudei.
- Mikrodalelių sraute vizualizacijos bandymų metu gauti rezultatai artimai koreliavo su gautais duomenimis panaudojant „COMSOL Multiphysics“ programinę įrangą. Eksperimentiniai rezultatai parodė, kad žemo dažnio virpesiai (nuo 4 Hz iki 8 Hz) bei aukštesnės amplitudės (nuo 3,4 mm iki 8 mm) gali labai padidinti momentinį kraujo tėkmės greitį ir beveik 20 % padidinti vidutinį tėkmės greitį. Studijos su didesnio dažnio virpesiais su mažesnėmis nei 1 mm poslinkio amplitudėmis neparodė didesnių pokyčių.
- Žmogaus kūno audinio įtakos tyrimų metu nenustatytas poreikis korekcijos koeficientui dėl pernelyg mažo reikšmių skirtumo.

- Matuojant širdies ir kraujotakos sistemos parametrus nustatytas ženklus EKG bei kvėpavimo dažnio padidėjimas esant didesniai nei 6 Hz dažniui. Širdies ritmo matavimo metu nustatyta, jog vidutinė vertė sumažėjo 3,75 dūžio per minutę, o maksimali – 2,5 dūžio per minutę, esant išorinių virpesių poveikiui ir palyginus su matavimais be virpesių.
- Matuojant temperatūrą užfiksuoti ženklūs pokyčiai plauštakoje esant 6 Hz bei 3 Hz dažniui, atitinkamai lygūs 0,8 laipsnio bei 0,7 laipsnio pagal Celsijų. Vidutinis temperatūrinis prieaugis užfiksuotas visų matavimų metu, po 4–5 minučių buvo lygus 0,3–0,5 laipsnio pagal Celsijų.
- Identifikavus kojų aktuatoriaus rezonansinį (darbinį) dažnį (3,28 Hz) ir variklių maitinimo įtampas (16,9 V ir 13,9 V), buvo atliekami eksperimentai matuojant testuojamojo pėdos temperatūros pokyčius. Nustatytas vidutinis 1 laipsnio pagal Celsijų temperatūros prieaugis.

IŠVADOS

1. Sukurti universalūs dvimačiai bei trimačiai matematiniai kraujagyslės, kapiliaro ir eritrocito modeliai ir atlikti kraujo greičio pokyčių, deformacijų ir pratekėjimo per mikrokanalą tyrimai, įvertinant medžiagos mechanines savybes ir skirtingo tipo vibracinį poveikį, taip pat atlikta skystyje panardinto bei skysčiu užpildyto eritrocito savųjų dažnių analizė.
2. Teorinių tyrimų rezultatai parodė, jog didžiausias poveikis skysčiui, esančiam mikrokanale, yra veikiant išorinių virpesių dažniams diapazone nuo 4,3 iki 8 Hz ir esant poslinkiui nuo 3,4 iki 8 mm, kai didžiausias maksimalaus kontakto slėgio sumažėjimas tarp eritrocito ir kapiliaro sienelės nustatytas esant 3 Hz vibraciniam poveikiui ir 13–22 mm poslinkiams ir 4–4,5 Hz dažniams bei 0,6–2 mm amplitudėms.
3. Eksperimentiniai supaprastintos imitacinės kraujotakos sistemos tyrimai, panaudojant peristaltinį siurblių, dirbtinę kraujagyslę ir vibracinį aktuatorių parodė ženklus skysčio slėgio padidėjimus, veikiant žemo dažnio mušimo virpesiais 2–5 Hz diapazone ir esant 4–20 mm poslinkio amplitudei, o virpesiai, esant didesniai nei 10 Hz dažniui neparodė jokių didesnių pakitimų registruojamuose dydžiuose.
4. Tyrimai su imitacinės kraujotakos eksperimentiniu stendu, naudojant mikrodalelių sraute vizualizacijos sistemą, parodė eksperimentinių ir teorinių tyrimų rezultatų adekvatumą, kai buvo gautas 7,7 % skysčio greičio prieaugis esant vibraciniams seansams 2,4–5,8 Hz dažnių diapazone ir 0,98–6 mm poslinkiams, kartu užfiksuotas momentinis skysčio tekėjimo greičio padidėjimas buvo lygus 4,15 kartų, užfiksuojant turbulentiškumą kanale.

5. Sukurti vibroapyrankės ir vibroaktuatoriaus kojoms prototipai, leidžiantys sukelti mušimo reiškinių, kurio metu atsirandantys žemo dažnio virpesiai bei ne mažesnė nei statmenai veikianti 6 N jėga į plaštaką ir 44 N jėga į kojas, sukuria modeliavimo metu gautus rekomenduojamus dažnius bei poslinkius.
6. Atlikti eksperimentiniai tyrimai su vibroapyrankės ir vibroaktuatoriaus kojoms prototipais, kuomet esant žemo dažnio virpesiams užfiksuotas temperatūrinis prieaugis buvo lygus 0.3–0.5° C rankoje, 0.7° C ant didžiojo pėdos piršto 1° C ant ilgojo piršto, 0.9° C dešiniajame taške ir 1.5° C kairiajame taške po 4–5 minučių poilsio po vibracinio pratimo, taip darant prielaidą dėl galimo ryšio tarp teoriniais skaičiavimais gautų rezultatų, kada eritrocito pratekėjimo pro kapiliarą metu maksimalus kontakto slėgis ženkliai sumažėjo esant 4 Hz dažniui, kuris yra artimas eritrocito saviesiems dažniams bei deformacijoms, gerinančioms pratekėjimą kapiliaru. Be to, sukurtų priemonių validumas buvo patvirtintas registruojant vidutinį (3,75 dūžiai per minutę) ir maksimalų (2,5 dūžiai per minutę) širdies ritmo verčių sumažėjimą po vibracinio poveikio.

AUTORIAUS PUBLIKACIJŲ SĄRAŠAS

- Mokslinės informacijos instituto (ISI) pagrindinio sąrašo leidiniuose:
1. Benevičius, Vincas; Ostaševičius, Vytautas; Venslauskas, Mantas; Daukševičius, Rolanas; Gaidys, Rimvydas. Finite element model of MEMS accelerometer for accurate prediction of dynamic characteristics in biomechanical applications // Journal of Vibroengineering / Vibromechanika, Lithuanian Academy of Sciences, Kaunas University of Technology, Vilnius Gediminas Technical University. Vilnius: Vibromechanika. ISSN 1392-8716. 2011, Vol. 13, no. 4, p. 803-809. [Science Citation Index Expanded (Web of Science); INSPEC; Academic Search Complete; Central & Eastern European Academic Source (CEEAS); Computers & Applied Sciences Complete; Current Abstracts; TOC Premier]. [0,283]. [IF (E): 0,346 (2011)]
 2. Venslauskas, Mantas; Ostaševičius, Vytautas; Jūrėnas, Vytautas. Development of vibrating bracelet for the actuation of the blood circulation at capillaries // Journal of Vibroengineering / Vibromechanika, Lithuanian Academy of Sciences, Kaunas University of Technology, Vilnius Gediminas Technical University. Kaunas :Vibroengineering. ISSN 1392-8716. 2014, Vol. 16, no. 3, p. 1535-1542. [Science Citation Index Expanded (Web of Science); INSPEC; Academic Search Complete; Central & Eastern European Academic Source (CEEAS); Computers &

Applied Sciences Complete; Current Abstracts; TOC Premier]. [0,333]. [IF (E): 0,617 (2014)]

3. Venslauskas, Mantas; Ostaševičius, Vytautas; Jūrėnas, Vytautas. Novel training machine for stimulation of blood circulation in feet // *Mechanika / Kauno technologijos universitetas, Lietuvos mokslų akademija, Vilniaus Gedimino technikos universitetas*. Kaunas : KTU. ISSN 13921207. 2015, t. 21, nr. 3, p. 201206. DOI: 10.5755/j01.mech.21.3.11758. [Science Citation Index Expanded (Web of Science); INSPEC; Compendex; Academic Search Complete; FLUIDEX; Scopus; 0,333].

Kituose Mokslinės informacijos instituto (ISI) duomenų bazėse referuojamuose leidiniuose:

1. Venslauskas, Mantas; Ostaševičius, Vytautas; Marozas, Vaidotas. Limb's vibrations exercise monitoring with MEMS accelerometer to identify influence of cardiovascular system // *Vibroengineering PROCEDIA: international conference "Vibroengineering- 2013"*, Druskininkai, Lithuania, 17-19 September 2013. Kaunas: Public Establishment "Vibroengineering". ISSN 2345-0533. 2013, Vol. 1, p. 48-52. [0,333]
2. Venslauskas, Mantas; Ostaševičius, Vytautas. Vibrating devices for stimulating blood circulation in limbs' capillaries // *Proceedings of the 14th World Congress in Mechanism and Machine Science // 2015* (accepted for publishing).

Trumpai apie autorių

Mantas Venslauskas gimė 1985 spalio 17 dieną Kaune. 2004 metais baigė Garliavos Juozo Lukšos gimnaziją ir pradėjo studijas Kauno technologijos universitete, kur 2009 metais įgijo mechanikos inžinieriaus bakalauro laipsnį (specializacija: sporto inžinerija), o 2011 metais įgijo mechanikos inžinieriaus magistro laipsnį (specializacija: mechaninių sistemų projektavimas. Su pagyrimu). 2011–2015 metais Kauno technologijos universiteto doktorantas. Nuo 2013 metų jaunesnysis mokslo darbuotojas Mechatronikos institute.

RESUME

The aim and objectives of the thesis

The aim of this research is to develop and investigate the influence of mechanical vibrations on blood circulation with low-frequency vibrational expose prototypes for human limbs.

In order to reach this aim, the following objectives were determined:

I. Develop mathematical models of blood vessel connected to the capillary, including red blood cells, define its material properties and identify values of Eigenfrequencies’.

II. Simulation of vibrational excitation and identification of the influence on the blood velocity changes and red blood cells movement from the arteriole to the capillary.

III. Develop experimental setup of imitational blood circulation comprising of artificial blood vessel, peristaltic pump, vibrating element, displacement and pressure sensors and measurement equipment and conduct experiments by initiating a beating phenomenon and monitoring blood pressure changes inside the vessel.

IV. Adapt experimental setup by the Micro-Particle Image Velocimetry (μ PIV) system and conduct research by monitoring blood velocity changes in the microchannel.

V. Design and develop a prototype of vibrating bracelet and legs actuator, identify Eigenfrequencies’ of legs’ vibration machine depending on different human weight and confirm adequacy of the created theory models to physical ones.

VI. Verify the influence of vibrational excitation on the improvement of blood circulation in limbs by evaluating temperature measurements.

Statement of novelty

The following scientific novelties are presented in the thesis:

1. Experimental setup of an imitational blood circulation system; consisting of a peristaltic pump, vibration actuator and μ PIV equipment, which enables researchers to analyse alterations of fluid (blood) parameters in the microchannel during the vibrational excitation at various frequencies and amplitudes.
2. Experimental and theoretical proof of low-frequency’s vibrational excitation influence on blood flow improvement. Prescribed frequencies of induced beating phenomenon in conjunction with sufficient displacement range significantly increase blood flow velocity

- and pressure in the microchannel and reduces maximum contact pressure between the erythrocyte and the capillary wall.
3. Unique prototypes of a vibrating bracelet and a vibrating machine for legs were designed and experimental proof of capturing thermal imagery of temperature increase in limbs after the vibrational excitation has been conducted.

Practical value

The new type of vibrational excitation approach to the human body is proposed, which is intended exclusively for the improvement of the blood flow; thus feeding the human body tissue for diabetics and people with disabilities, relieving the arthritis caused pain and lowering high blood pressure. Blood circulatory disorders could lead to the amputation of diseased limb and a lack of existing solutions has therefore been identified and fulfilling the market with unique means are proposed.

The numerical models of blood vessel, capillary and erythrocyte enables the reduction of the need for time-consuming and expensive invasive studies with biological tissues of the human body. The developed models could be modified depending on the application field, thus improving the design process and reducing costs.

The subject of research and methodology

The subject of research is the blood flow improvement in human limbs' with the effect of vibration exposure.

The research methodology is based on the analysis, purification and generalization of scientific sources of vibration exposure on the human body. The influence of low-frequency vibrations were investigated; monitoring blood pressure and velocity parameters, as well as maximum contact pressure, between the erythrocyte's and capillary's walls. The numerical analysis was conducted with the Comsol Multiphysics software 'Acoustic-Solid Interaction Frequency domain and Fluid-structure Interaction modules' while the adequacy of numerical models was investigated with the Micro-particle Image Velocimetry equipment and capturing thermal imagery of handbreadth and foot after the vibration exposure with the designed actuators.

Defended dissertation statements

The novel approach and devices of vibration exposure was proposed that improves blood flow in human limbs. The devices were designed considering diseased parts of the body affected by diabetes mellitus, arthritis and other circulatory disorders, thus eliminating conceivable resonance with internal organs and the negative effect to the spine.

The developed numerical models of blood vessel, capillary and erythrocyte simplifies the research of vibration exposure influence on different cardiovascular parameters, as well as material property changes as a result of various diseases.

The significant findings of numerical and experimental investigations provide the validity of the designed devices in the area of blood flow improvement using low-frequency vibrations.

Document structure

The thesis consists of an introduction, four sections, general conclusions and a list of literature and scientific publications on the topic of dissertation. The volume of the dissertation is 111 pages in total; 35 numbered formulas, 81 figures and 10 tables are used in the main body. The list of references contains 106 sources.

CONCLUSIONS

1. Universal 2D and 3D numerical mathematical models of blood vessel, capillary and erythrocyte were developed to commit investigations on blood velocity alterations, deformability and flow through the micro-channel depending on the mechanical properties of the materials and different types of vibrational exposure, along with the Eigenfrequency analysis of immersed and fluid contained erythrocyte was conducted.
2. The results of the numerical studies of the vibrating microchannel have showed the highest impact on blood flow velocity at frequencies ranging from 4.3 to 8 Hz and with a displacement of 3.4–8 mm, while the significant reduction of the inlet maximum contact pressure between the RBC's and capillary's wall on vibrational exposure of 3 Hz with a displacement range of 13–22 mm and 4–4.5 Hz with a displacement range of 0.6–2 mm was obtained as the most influential.
3. Experimental studies of a simplified imitational blood circulatory system, consisting of the main parts of peristaltic pump, artificial blood vessel and vibrational actuator, disclosed a significant fluid pressure increase in the range of low-frequencies' beating phenomenon vibrational bouts of 2–5 Hz and 4–20 mm amplitudes, while the oscillations of higher frequencies than 10 Hz did not generated any significant changes.
4. Investigations by using an adapted experimental setup including the Micro-Particle Image Velocimetry (μ PIV) equipment have indicated the adequacy of experimental and theoretical studies by obtaining an average increase in fluid velocity of 7.7 % during the vibrational bouts ranging from 2.4 Hz to 5.8 Hz and displacement range of 0.98–6 mm, herewith the momentum fluid velocity increase of 4.15 times and turbulent flow have been noted.

5. Prototypes of a vibrating bracelet and a vibrating machine for legs have been designed to induce the beating phenomenon with the purpose of giving low-frequency vibrational exposure and sufficient perpendicular force of at least 6 N to the handbreadth and 44 N to the legs by using small size components and relevant frequencies in coupled with a displacement range, according to the results of numerical studies.
6. Experimental studies with the designed prototypes have shown a significant increase in limb temperatures after the low-frequency vibrational excitation where the average increase of $0.3 - 0.5^{\circ} \text{C}$ of the hand, increases of 0.7°C on the Hallux toe, 1°C on the Long toe, 0.9°C on the right foot point and 1.5°C on the left foot point were registered after a 4 – 5 minute period. It also considered the potential influence of the relation between the numerically obtained natural frequency value of RBC of 4 Hz and the range of frequencies of external vibrations. Furthermore, the validity of the designed means of vibrational excitation was confirmed by registering the decrease of average (3.75 BPM) and maximum (2.5 BPM) values of heart rate after the vibrational exposure.

UDK 615.823 (043.3)

SL344. 2015-11-11, 2,75 leidyb. apsk. I. Tiražas 50 egz. Užsakymas 407.

Išleido Kauno technologijos universitetas, K. Donelaičio g. 73, 44249 Kaunas
Spausdino leidyklos „Technologija“ spaustuvė, Studentų g. 54, 51424 Kaunas