



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS

Sandra Liorančaitė

SKAITINIS IR EKSPERIMENTINIS AUSIES BŪGNELIO
PROTOTIPO TYRIMAS

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas
dr. Virginija Gylienė

KAUNAS, 2017

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS

SKAITINIS IR EKSPERIMENTINIS AUSIES BŪGNELIO
PROTOTIPO TYRIMAS

Baigiamasis magistro projektas
Gamybos inžinerija (M5126N21)

Vadovas

(parašas) dr. Virginija Gylienė
(data)

Recenzentas

(parašas) Prof. habil. dr. Arvydas Palevičius
(data)

Konsultantas

(parašas) doc. Giedrius Janušas
(data)

Projektą atliko

(parašas) Sandra Liorančaitė
(data)



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Mechanikos inžinerijos ir dizaino

(Fakultetas)

Sandra Liorančaitė

(Studento vardas, pavardė)

Gamybos inžinerija M5126N21

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

„Skaitinis ir eksperimentinis ausies būgnelio prototipo tyrimas“

AKADEMINIO SĄŽININGUMO DEKLARACIJA

20 17 m. sausio 11 d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano, **Sandros Liorančaitės**, baigiamasis projektas tema „Skaitinis ir eksperimentinis ausies būgnelio prototipo tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir 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)

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS

Tvirtinu:

Gamybos inžinerijos

katedros vedėjas

Kazimieras Juzėnas

MAGISTRANTŪROS STUDIJŲ BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS

Studijų programa GAMYBOS INŽINERIJA

Magistrantūros studijų, kurias baigus įgyjamas magistro kvalifikacinis laipsnis, baigiamasis darbas yra mokslinio tiriamojo ar taikomojo pobūdžio darbas (projektas), kuriam atlikti ir apginti skiriama 30 kreditų. Šiuo darbu studentas turi parodyti, kad yra pagilinęs ir papildęs pagrindinėse studijose įgytas žinias, yra įgijęs pakankamai gebėjimų formuluoti ir spręsti aktualią problemą, turėdamas ribotą ir (arba) prieštaringą informaciją, savarankiškai atlikti mokslinius ar taikomuosius tyrimus ir tinkamai interpretuoti duomenis. Baigiamuoju darbu bei jo gynimu studentas turi parodyti savo kūrybingumą, gebėjimą taikyti fundamentines mokslo žinias, socialinės bei komercinės aplinkos, teisės aktų ir finansinių galimybių išmanymą, informacijos šaltinių paieškos ir kvalifikuotos jų analizės įgūdžius, skaičiuojamųjų metodų ir specializuotos programinės įrangos bei bendrosios paskirties informacinių technologijų naudojimo įgūdžius, taisyklingos kalbos vartosenos įgūdžius, gebėjimą tinkamai formuluoti išvadas.

1. Darbo tema Skaitinis ir eksperimentinis ausies būgnelio prototipo tyrimas Patvirtinta 2016 m. gruodžio 8 d. dekanu įsakymu V25-11-20
2. Darbo tikslas sudaryti ausies būgnelio prototipo skaitinius modelius, kurie tarpusavyje skiriasi geometrija ir medžiagų savybėmis. Sudaryti jų baigtinių elementų modelius. Atlikti būgnelio savųjų virpesių bei dažnių skaitinę analizę taip pat eksperimentinius tyrimus su ausies būgnelio prototipais, kurio tikslas išsiaiškinti, kokiems dažniams esant, randamos būdingos būgnelio prototipų savųjų virpesių formos.
3. Darbo struktūra: Literatūros analizė, skaitinis ir eksperimentinis ausies būgnelio prototipo tyrimas, rezultatai, išvados ir rekomendacijos.
4. Reikalavimai ir sąlygos: Atlikti egzistuojančių ausies būgnelio tyrimų analizę, išanalizuoti esmines baigtinių elementų modelio charakteristikas, sudaryti skirtingų geometrijų ausies būgnelio modelius, sudaryti ausies būgnelių baigtinių elementų modelius, kurie tarpusavyje skiriasi geometrija ir medžiagų savybėmis, sukurti ausies būgnelio prototipą ir atlikti eksperimentinius savųjų virpesių formų tyrimus, pateikti atitinkamas išvadas ir rekomendacijas.
5. Darbo pateikimo terminas 2016m. gruodžio mėn. 21 d.
6. Ši užduotis yra neatskiriama baigiamojo darbo dalis

Išduota studentui Sandra Liorančaitė

Užduotį gavau Sandra Liorančaitė
(studento vardas, pavardė)

(parašas, data)

Vadovas dr. Virginija Gylienė
(pareigos, vardas, pavardė)

(parašas, data)

Liorančaitė, Sandra. Skaitinis ir eksperimentinis ausies būgnelio prototipo tyrimas. *Magistro* baigiamasis projektas vadovas. dr. Virginija Gylienė; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Mokslo kryptis ir sritis: Technologiniai mokslai Gamybos Inžinerija

Reikšminiai žodžiai: *ausies būgnelis, baigtinių elementų modelis, ausies būgnelio prototipas, savieji virpesiai, holografinė interferometrija.*

Kaunas, 2017, 60 p.

SANTRAUKA

Magistro baigiamajame projekte tiriamos literatūroje identifikuotos esminės ausies būgnelio mechaninės savybės. Remiantis literatūros duomenimis apibūdinamos svarbiausios baigtinių elementų modelio charakteristikos. Sudaromi sveikos ausies būgnelio skaitiniai modeliai, kurie tarpusavyje skiriasi geometrija. Parenkamas tinkamiausias baigtinių elementų tipas ir sudaromi baigtinių elementų modeliai, tarpusavyje besiskiriantys geometrija ir medžiagų savybėmis. Atliekama modelių savyjų virpesių ir dažnių skaitinė analizė, priklausomai nuo geometrijos ir medžiagų savybių. Nustatyta, kaip kinta būgnelio poslinkių amplitudės priklausomai nuo membranos kūgiškumo laipsnio. Sudaryti skirtingų formų ausies būgnelio prototipai ir holografinės interferometrijos metodu identifikuotos būdingos prototipų savyjų virpesių formos ir dažniai. Tarpusavyje lyginami skaitinės ir eksperimentinės analizės rezultatai. Eksperimentiniais metodais patvirtintas sudaryto BE modelio tinkamumas skaitinei analizei atlikti.

Liorančaitė, Sandra. *Numerical and Experimental study of Tympanic Membrane Prototype*. Master's / supervisor dr. Virginija Gylienė; The Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Research area and field: Technological sciences Production Engineering

Key words: tympanic membrane, finite element model, tympanic membrane prototype, eigenfrequencies, holographic interferometry.

Kaunas. 2017. 60 p.

SUMMARY

In Master's final project significant tympanic membrane mechanical properties identified in literature were analysed. Most important characteristics of the finite element model were described by referring to the literature. Healthy tympanic membrane numerical models that differ in geometry were modeled. Selection of the most appropriate type of finite element was made and finite element models were formed, with each differing in geometry and material properties. Eigenfrequencies of the model used and the frequency of numerical analysis were carried out, depending on the geometry and material properties. The variation in displacement amplitude of eardrum depending on the cone angle of the membrane was determined. Different prototypes of tympanic membrane were created and using method of holographic interferometry forms of eigenfrequencies were acquired. Comparison of numerical and experimental analysis was made. Experimental techniques approved FE model suitability for numerical analysis.

TURINYS

ĮVADAS	8
1. ŽMOGAUS KLAUSOS SISTEMA	10
1.1 Išorinė ausis ir jos funkcija	11
1.1.1 Ausies kaušelis	11
1.1.2 Išorinė klausomoji landa.....	12
1.1.3 Ausies būgnelis.....	12
1.2 Vidurinė ausis ir jos funkcija	14
1.3 Vidinė ausis ir jos funkcija	15
2. EGZISTUOJANČIŲ AUSIES BŪGNELIO TYRIMŲ APŽVALGA.....	16
2.1 Ausies būgnelio storio nustatymo eksperimentiniai tyrimai jam enant natūralioje aplinkoje..	16
2.1.1 Optinė koherentinė tomografija.....	17
2.1.2 Prispaudimo testas	20
2.2 Ausies būgnelio tyrimas holografine interferometrija	22
3. EKSPERIMENTINIAI LITERATŪROS DUOMENYS BAIGTINIŲ ELEMENTŲ MODELIO SUDARYMUI	25
3.1 Geometrija	25
3.2 Medžiagų mechaninės savybės	26
4. SKAITINĖ IR EKSPERIMENTINĖ AUSIES BŪGNELIO PROTOTIPŲ ANALIZĖ.....	28
4.1 Būgnelio modelių sudarymas SolidWorks programine įranga	28
4.2 Ausies būgnelio virpesių skaitinė analizė Comsol Multiphysics 3.5a programine įranga	28
4.2.1 Savųjų virpesių skaitinė analizė	29
4.2.2 Dažnių skaitinė analizė.....	32
4.3 Eksperimentinė būgnelio prototipų analizė	36
4.3.1 Prototipų savųjų virpesių formų tyrimas holografinės interferometrijos metodu	36
4.3.2 Žmogaus ausies būgnelio skaitinio modelio koregavimas pagal prototipo parametrus ...	40
4.3.3 Rezultatai ir jų aptarimas	42
IŠVADOS	44
LITERATŪROS SĄRAŠAS	45
PRIEDAI	47

IVADAS

Žmogaus ausis yra sudėtinga biomechaninė sistema, skirta garso suvokimui, kurią sudaro šios pagrindinės dalys: išorinė, vidurinioji ir vidinė ausis. Tamprose terpėse vykstantys mechaniniai svyravimai, kuriuos gali just žmogaus ausis, vadinami garsais. Garsinių dažnumų diapazonas, kuriame oro virpesiai geba dirginti žmogaus klausos receptorių, apima dažnius nuo 20 Hz iki 20 kHz. Garsai, kurių dažnis žemesnis nei 20 Hz vadinami infragarsais, o aukštesnio nei 20 kHz dažnio garsai vadinami ultragarsais. Žmogaus ausis pastarųjų diapazonų garsams nejautri. Įprastai normaliai girdimas žmogaus balso dažnis yra nuo 500 Hz iki 2 kHz. Girdimų dažnių diapazonas siaurėja žmogui senstant, prarandamas gebėjimas girdėti aukšto dažnio garsus [1].

Ausies būgnelis yra kūgio formos skaidulinio audinio plokštelė, sustiprinanti garso bangas ir skirianti išorinę ausį nuo vidurinės. Jame akustinė garso energija paverčiama mechanine ir perduodama į vidurinėje ausyje esančius klausomuosius kauliukus [2]. Natūrali ausies būgnelio mikrostruktūra daro jį nepaprastai stiprų, nepaisant mažo jo storio, 30 – 120 μm, jis pasižymi geromis akustinėmis savybėmis, kartu išlaikant mechaninį stiprumą. Šios savybės dažniausiai prarandamos dėl ausies būgnelio perforacijos, galinčios atsirasti dėl traumos, suspausto oro poveikio, ūminio vidurinės ausies uždegimo ir daugelio kitų priežasčių, ko pasekoje atsiranda klausos sutrikimai, o kai kada net ir klausos praradimas. Kai perforavęs būgnelis, neužgyja savaime, taikoma nesudėtinga chirurginė procedūra – miringoplastika. Atliekant operaciją, plyšusio būgnelio defektas pridengiamas riebaliniu audiniu, smilkininio raumens fascija, oda, gelio plėvelėmis, mechaniškai apdorotomis kremzlėmis ar kitomis medžiagomis. Seniau būgnelio skylės pridengimui buvo naudojamas popierius [3]. Šiuo metu būgnelio perforacijos gydymui naudojamos medžiagos turi įvairių trūkumų: medžiagos, kurios pasižymi geromis akustinėmis savybėmis gali būti nepakankamai mechaniškai stiprios ir atvirkščiai. Jeigu būgnelis bus pernelyg tvirtas ar elastingas, garso bangos nepasieks vidurinėsios ar vidinės ausies todėl, kad būgnelis bus priverčiamas virpėti tuo pačiu garso bangos dažniu [4].

Dažniausiai ausų perforacijų gydymui naudojami žmogaus audiniai, prieš tai juos atitinkamai paruošiant ir apdorojant mechaniškai. Nepriklausomai nuo to ar tai būtų riebalinis sluoksnis ar mechaniškai išplonintas kremzlės sluoksnis, pakinta ausies būgnelio geometrija. Po tokios operacijos, sugijęs būgnelis tampa storesnis, pakinta jo mechaninės savybės, tačiau galutinis rezultatas – būgnelis atgauna funkcines savybes ir atstatoma klausa. Neišspręstas klausimas yra kodėl net ir būgneliui sustorėjus žmogaus klausa po tam tikro laiko visiškai atstatoma.

Todėl baigiamojo darbo tikslas sumodeliuoti žmogaus ausies būgnelį ir skaitiniais metodais, nustatyti kokia yra būgnelio elgsena po miringoplastikos, kartu įvertinant platų medžiagos savybių ir būgnelio formų pasiskirstymo diapazoną. Esminių ausies būgnelio mechaninių savybių

identifikavimas bei tikslaus, simuliuojančio akustinį – mechaninį garso perdavimą, modelio sudarymas galėtų potencialiai pagerinti įvairių būgnelio patologijų gydymą [5]. Vollandri su bendraautoriais netgi teigia, kad Baigtinių Elementų (BE) modeliavimo rezultatai gali padėti chirurginių intervencijų metu [6].

Tyrimai su žmonėmis dažnai neatliekami dėl etinių sumetimų. O ausies būgnelio elgsenai nustatyti sudaryti BE modeliai ausies būgnelio geometrijos ir mechaninių savybių atžvilgiu (kurios skiriasi ir pagal žmogaus individualumą ir pagal nustatymo metodus).

Kitas šio baigiamojo projekto tikslas – padaryti ausies būgnelio prototipą, kai membranai imituoti naudojamas skirtingo storio popierius, ir atlikti eksperimentinius tyrimus skaitinio modelio validavimui.

Tikslams pasiekti išskelti uždaviniai:

1. Skirtingų geometrijų būgnelio modelių sudarymas SolidWorks programine įranga.
2. Skirtingų medžiagų savybių ausies būgnelio baigtinių elementų modelio sudarymas Comsol Multiphysics 3.5a programine įranga.
3. BE modelio savųjų virpesių formų ir dažnių skaitinė analizė Comsol Multiphysics 3.5a programine įranga.
4. Ausies būgnelio prototipų eksperimentinis savųjų virpesių formų tyrimas holografinės interferometrijos metodu.

Gauti rezultatai apibendrinami bei pateikiamos atitinkamos išvados.

1. ŽMOGAUS KLAUSOS SISTEMA

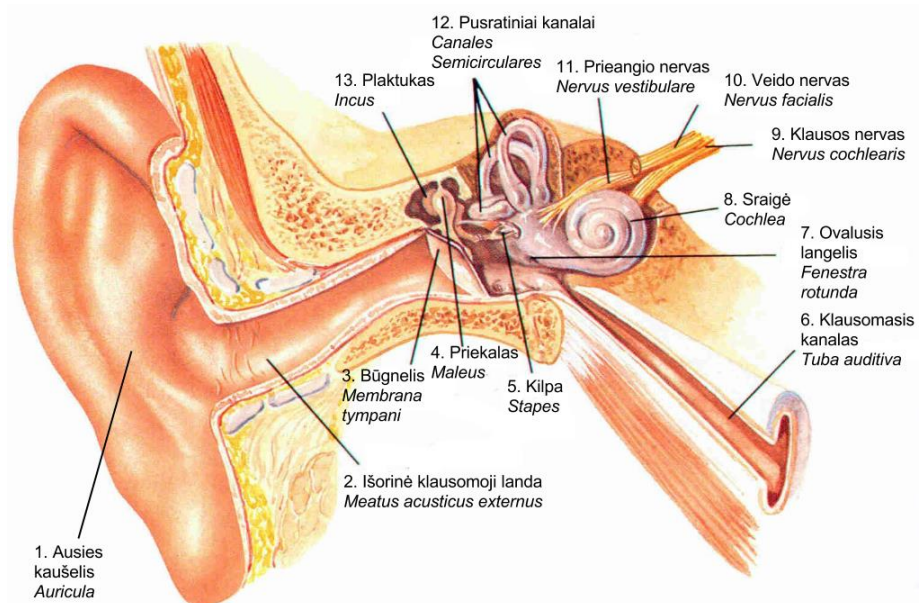
Žmogaus ausis tai nepaprasto inžinerinio dizaino objektas, kuris pasižymi skirtingomis geometrijomis, medžiagų savybėmis ir skirtingomis dinaminėmis priklausomybėmis transformuojant akustinį įėjimo signalą į žmogui suprantamą elektrinį išėjimo signalą. Ausis yra tik maža dalis sudėtingos klausos sistemos [6]. Pastaroji reikalinga ne tik girdėjimui, bet ir pusiausvyros palaikymui. Girdėjimo procesas susideda iš garso bangos mechaninės energijos transformavimo į biocheminius signalus stimuliuojančius specifinius receptorių, kurie sukelia nervinius impulsus, suvokiamus centrinėje nervų sistemoje. Šis procesas prasideda nuo garso slėgio perdavimo į ausies būgnelį, taip sužadinant jo virpesius. Būgnelio virpesiai perduodami ir sustiprinami per klausomuosius kaulelius. Galiausiai, vidinės ausies skysčio judesiai sužadina sraigės plaukelių mechanoreceptorių ir garsas suvokiamas [7].

Žmogaus klausos sistema dėl nepaprasto tikslumo ir jautrumo bei jos periferijoje esančio biologinio mikrofono, atitinka signalų apdorojimo mechanizmą. Norint įvertinti, kaip aplinkos garsas suvokiamas tiek normaliai girdinčių individų tiek turinčių klausos sutrikimų, būtina suprasti anatomines, biomechanines ir fiziologines periferinės klausos savybes [8].

Žmogaus klausos sistema turi atlikti tris pagrindines funkcijas [9]:

- Nukreipti garo bangas į viduriniąją ausį;
- Jausti oro slėgio svyravimus;
- Išversti šiuos svyravimus į smegenims suprantamus elektrinius signalus.

Bendras žmogaus ausies sandaros vaizdas pateikiamas 1.1 paveiksle.



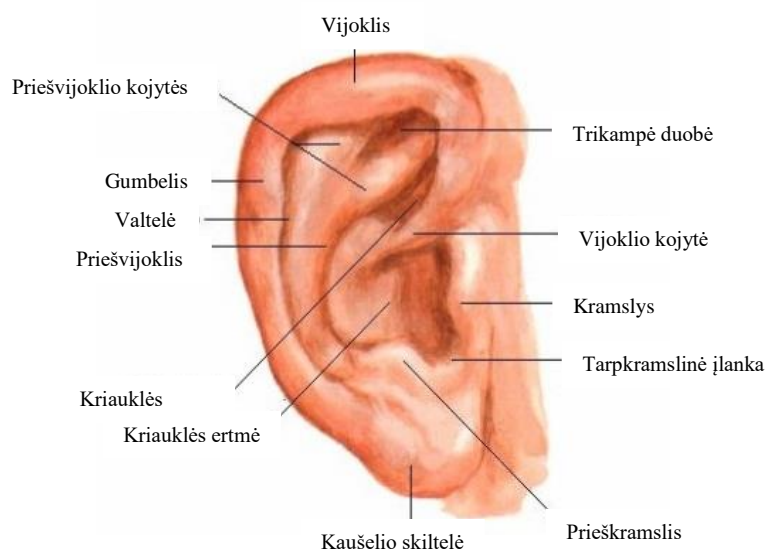
1.1 pav. Bendras ausies sandaros vaizdas. <http://med-handbook.com>

1.1 Išorinė ausis ir jos funkcija

Garsas, tamprus oro molekulių svyravimas, pasiekia ausies kaušelių ir yra nukreipiamas į išorinę klausomąją landą. Pastaroji baigiasi ausies būgneliu, kuris atskiria išorinę ausį nuo vidurinės. Kaušelis surenka garso bangas. Dėl savo asimetrijos jis svarbus garso krypties nustatymui, nes tam tikri garso dažniai yra susiprinami arba slopinami, priklausomai nuo to kokia kryptimi jie pasiekia ausį. Išorinė ausis sudaryta iš garso bangas surenkančio ir į klausomąją landą perduodančio ausies kaušelio ir virpesius iki būgnelio praleidžiančios išorinės klausomosios landos [10].

1.1.1 Ausies kaušelis

Ausies kaušelio paviršius netaisyklingai įgaubtas, šiek tiek palinkęs į priekį, su daugeliu įlinkimų ir išgaubimų. Bendras vaizdas pateikiamas 1.2 paveiksle. Laisvasis iškilus kraštas vadinamas vijokliu (*helix*). Pastarojo galinės dalies viršuje yra ausies kaušelio gumburėlis (*tuberculum auriculare*). Priekyje vijoklio yra kitas išlenktas iškilimas – priešvijoklis (*antihelix*). Įdubusią trikampę duobę (*fossa triangularis*), apsupa dvi priešvijoklio kojytės (*crura antihelices*) į kurias viršuje pasidalija priešvijoklis. Įdubimas, tarp vijoklio ir priešvijoklio, vadinamas valtele (*scapha*). Vijoklio kojytės apačioje yra kramslys (*tragus*) – išlenktas iškilimas, iš dalies uždengiantis išorinės klausomosios landos angą. Po pastaruoju yra kaušelio skiltelė (*lobus auriculæ*), kuri yra minkšta, nes ją sudaro skaidulinis ir riebalinis audinys. Didžioji ausies kaušelio dalis yra sutvirtinama elastinga kremzle, dėl šios priežasties didžioji ausies kaušelio dalis yra kieta. Elastingoji kremzlė yra padengta odos sluoksniu, o prie galvos pritvirtinama raumenimis ir raiščiais. Ši kremzlė nenutrūksta pereinama į išorinę klausomąją landą, kartu su ją dengiančiu plonu odos sluoksniu. [11].



1.2 pav. Ausies kaušelis. <http://med-handbook.com>

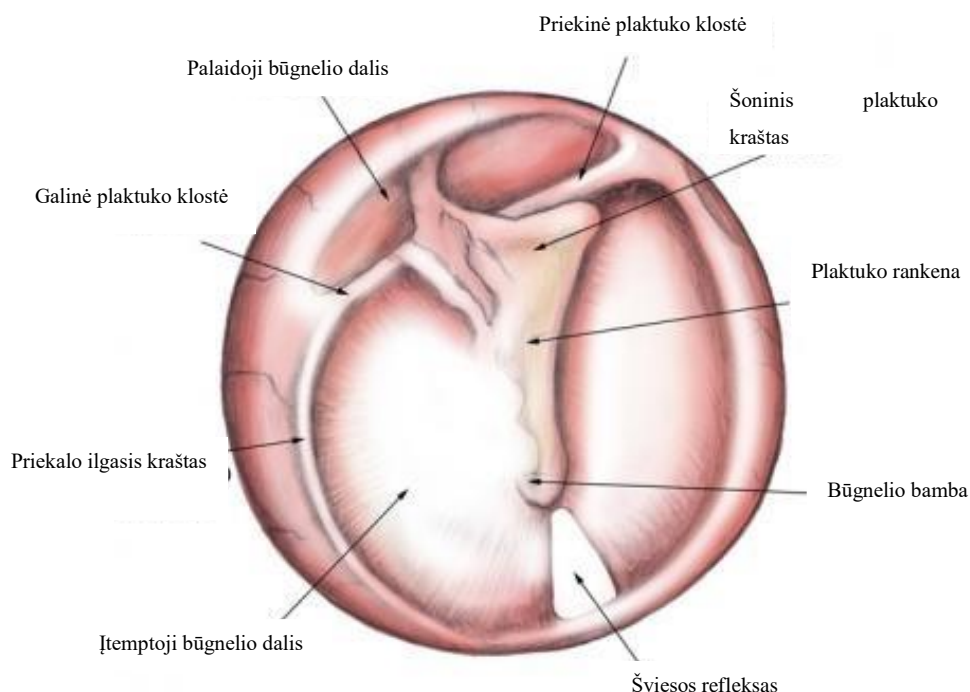
1.1.2 Išorinė klausomoji landa

Klausomosoji landa arba klausos kanalas, yra ovalaus spindžio, apie 7 – 9 mm skermens ir apie 2,5 cm ilgio. Vidinį jos galą užengia įstrižai įstatytas būgnelis. Išorinė kremzlinė dalis apie 8 mm ilgio, ausies kaušelio kremzlės tęsinys kuris skaiduliniu audiniu prisitvirtina prie kaulinės dalies krašto. Kaulinė dalis yra siauresnė už kremzlinę dalį, bet ilgesnė apie 16 mm. Kaulinės dalies gale yra būgninė įlanka (*incisura tympanica*), kur tvirtinasi būgnelis bei landos kremzlė. Klausomoji landa apsaugo vidines ausies dalis ir veikia kaip rezonatorius suvokiant garsą [10], [11]

1.1.3 Ausies būgnelis

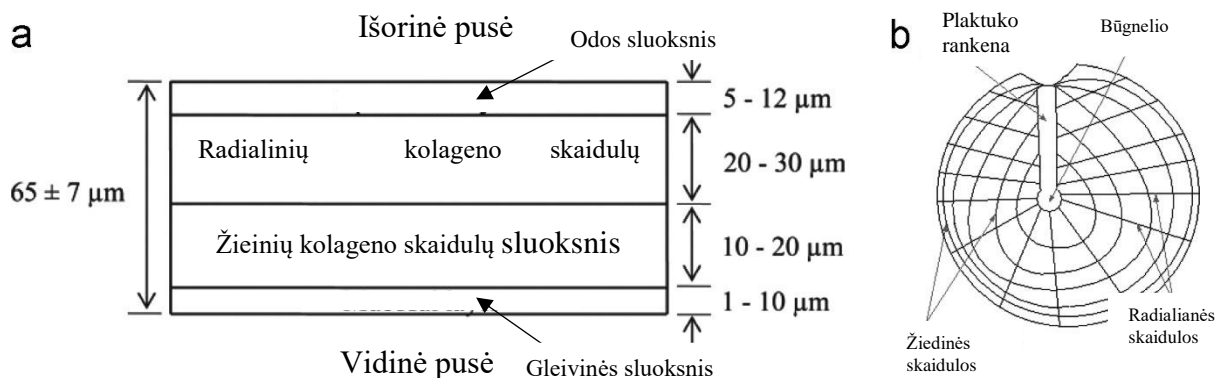
1.3 paveiksle pateikimas bendras ausies būgnelio vaizdas. Jis atskiria būgninę ertmę nuo klausos kanalo. Ausies būgnelis yra truputį pasviręs, ovalo formos, plonas ir pusiau permatomas, prisitvirtinęs prie kremzlinio jungiamojo audinio žiedo, kuris ir sudaro didžiąją dalį jo perimetro ir prisitvirtina prie būgninės įlankos. Būgnelio ilgiausias skersmuo 9 – 10 mm, trumpiausias – 8 – 9 mm. Viršuje yra palaidoji būgnelio dalis (*pars flaccida*), o apačioje įtemptoji (*pars tensa*).

Ausies būgnelis yra elastigas, bet labai jautrus, menkiausias oro slėgio pokytis, ausies kanale, priverčia jį vibruoti. Virpesiai nuo ausies būgnelio perduodami perduodami į ovalinį langą [11].



1.3 pav. Ausies būgnelis. <http://emedicine.medscape.com>

Ausies būgnelio storio skerspjūvyje galime matyti, kad jis yra daugiasluoksnė pluoštinė struktūra, susidedanti iš skirtingų įvairaus tankio, storio, sudėties ir savybių sluoksnių. Tai trisluoksnė membrana (1.4 pav. a) susidedanti iš: vidinio gleivinės sluoksnio, kurio storis 1 – 10 μm ; vidurinio skaidulinio sluoksnio 10 – 30 μm , kuris dar dalijamas į du sluoksnius iš kurių vieną sudaro žiedinių kolageno skaidulų sluoksnis 10 – 20 μm , o kitą radialine krypimi išsidėsčiusių kolageno skaidulų sluoksnis; 20 – 30 μm storio ir išorinio odos sluoksnio, kurio storis – 5 – 12 μm [12].



1.4 pav. Schematiškas ausies būgnelio įtemptosios dalies (*pars tensa*) skerspjūvis a – skirtingų sluoksnių išsidėstymas bei jų storis; b – ausies būgnelio skaidulų orientacijos vaizdas [12].

Vidinį gleivinės sluoksnį daugiausia sudaro suragėjusios ląstelės, kurios atlieka maistinių medžiagų mainų ir apsauginę funkcijas. Gleivinės sluoksnis yra atsparus vandeniui taip pat apsaugo vidurinį sluoksnį nuo bakterijų ir kitų kenksmingų medžiagų, kurios galėtų patekti į būgninę ertmę.

Vidurinis sluoksnis sudarytas daugiausia iš laisvojo jungiamojo audinio, kuriame yra kolageno ir elastino skaidulų, pastarosios suteikia membranai tvirtumo ir nuo jų priklauso daugelis unikalių būgnelio savybių. Bendras membranos storis pasiskirstęs netolygiai, jis didėja nuo periferijos link centrinės būgnelio dalies. Taip yra todėl, kad radialinių kolageno skaidulų gausiausia būgnelio centrinėje dalyje, o žiedinių skaidulų sluoksnis sustorėja link periferijos, link membranos centro jis mažėja [12].

Anatominės ir fizinės ausies būgnelio savybės idealiai pritaikytos garso perdavimui įvairaus dažnio diapazonuose, todėl analizuojami ausies būgnelio judesiai gali būti naudingi diagnozuojant įvairius vidurinės ausies sutrikimus.

1.2 Vidurinė ausis ir jos funkcija

Vidurinę ausį sudaro būgninė ertmė, klausomieji kauliukai (plaktukas, priekalas, ir kilpa) būgninės ertmės raumenys ir ausies vamzdis. Šie judrūs kauliukai, išsidėstę būgninėje ertmėje, jungia būgnelį su vidne ausies dalimi bei perduoda jo vibracijas į vidinę ausį. Būgninę ertmę su nosiarykle jungia ausies vamzdis, kuris yra apie 36 mm ilgio sudarytas iš kaulinės 12 mm ilgio ir kremzlinės 24 mm ilgio dalių. Rijimo metu šis vamzdis atsidaro ir būgninėje ertmėje esantis oro slėgis suvienodinamas su išoriniu atmosferos slėgiu, tam, kad būtų sužadinti ausies būgnelio virpesiai.

Plaktukas (*malleus*) prisitvirtinęs prie būgnelio, jis yra apie 8 – 9 mm ilgio. Sudarytas iš rankenos, kaklelio, galvutės, priekinės ir šoninės ataugų. Priekalas (*incus*) sudarytas iš kūno ir dviejų ataugų. Kūno priekinis paviršius sudaro sąnarį su plaktuko galvute. Kilpa (*stapes*) sudaryta iš pamato, galvutės ir dviejų kojų. Galvutė sudaro sąnarį su lęšine prikalo atauga. Pamatas žiediniu raiščiu prisitvirtina prie prieangio langelio kraštų [11].

Pagrindinė vidurinės ausies funkcija yra perduoti santykinai silpnų elastingo, susispaudžiančio oro vibracijų energiją į vidinės ausies inertiškus, nesusispaudžiančius. Oro ir vandens tankis ir kompleksinė akustinė varža yra skirtingi, todėl šių terpių riboje didelė dalis garso bangų energijos būtų atspindima. Vidurinės ausies garso laidumo sistema padeda išvengti šių nuostolių. Klausomųjų kauliukų anatomija padeda mažinti rezonansą ir vienodai perduoti visus garso dažnius, rezonanso savybių beveik neturinčiam ausies būgneliui. Žemi dažniai slopinami didėjant klausomųjų kauliukų grandinės standumui, dėl refleksiškai susitraukinėjančių vidurinės ausies raumenų. Šis refleksas neapsaugo nuo staigių ir stiprių kauliukų judesių, sukeltos traumos, kuri gali būti patiriama dėl sprogo bangos sukeltos impulsinio triukšmo. Šis refleksiškas raumenų susitraukinėjimas labiau padeda slopinti savojo balso girdėjimą [10].

Kilpą, prisitvirtinusią prie ovaliojo langelio membranos, už kurios yra skysčio pripildyta vidinė ausis, per priekalą judina prie būgnelio prisitvirtinęs plaktukas. Skysčio suvirpinimui reikalingi daug stipresni svyravimai negu oro suvirpinimui. Vidurinėje ausyje skysčio ir oro akustinė varžos suderinamos dėka dviejų veiksnių: 1 – daug didesnis būgnelio plotas negu kilpos pagrindo plotas. Kiek kartų būgnelio plotas didesnis už kilpos pagrindo plotą, tiek kartų slėgis į ovalųjį langelį yra didesnis, kadangi slėgis yra jėga tenkanti paviršiaus ploto vienetui. 2 – klausomieji kauliukai sudaro svertų sistemą, kuri taip pat didina virpesių jėgą. Galiausiai į ovalųjį langelį perduodamas slėgis yra 20 kartų didesnis už slėgį kuriuo veikiamas būgnelis. Šių dviejų veiksnių pakanka vidinės ausies skysčių sujudinimui [10], [11].

1.3 Vidinė ausis ir jos funkcija

Vidinė ausis tai sudėtingas anatomicinis darinys smilkinkaulio piramidėje. Ją sudaro pausiausvyros organas ir sraigė, priimanti garso signalus, nes joje išsidėstę klausos nervai. Vidinės ausies struktūra labai sudėtinga ir sudaryta iš dviejų kaulinio bei plėvinio labirintų. Pastaruosius atskiria perilimfinis tarpas, pripildytas perilimfos.

Kaulinis labirintas sudarytas iš prieangio, gale pereinančio į pusratinius kanalus, priekyje – į sraigę. Sraigėje yra klausos organas, o prieangis ir pusratiniai kanalai priklauso pausiausvyros jutimo organui. Sraigę sudaro 32 mm ilgio 2 mm skersmens kaulinis kanalas, kuris lanksčiomis membranomis padalijamas į tris dalis. Viršutinę dalį nuo vidurinės skiria prieanginė siena, o vidurinę nuo apatinės – pamatinė plokštelė, kuri laikoma pagrindine sraigės membrana. Išilgai sraigės išsidėčiusios nervinės šaknelės, kurias sužadina pamatinės plokštelės prisilietimai. Sraigėje garso virpesiai paverčiami elektriniais impulsais, kurie klausos nervu nukeliauja į smegenis, kur atliekama jų analizė, kurios dėka žmogus suvokia garsą.

Svyravimai nuo ausies būgnelio per ovalųjį sraigės langelį sukelia skysčio slėgio bangas, plintančias per ploną prieanginę sieną skersai sraigės lataką ir lanksčią pamatinę plokštelę apvaliojo langelio link. Kai ausis veikiama garso, garso energija yra perduodama prieangio laipto perilimfai per ovalųjį langelį. Tuo metu sraigės apvaliojo langelio membrana išsigaubia į būgninę ertmę, o po to įdumba atgal. Pamatinė plokštelė einant nuo sraigės pagrindo link viršūnės darosi lankstesnė. Ties sraigės pagrindu ją išlenkia aukšto dažnio garso bangos. Žemesnio dažnio bangos turi nueiti ilgesnį kelią, kol pasiekia lankstesnę pamatinės plokštelės dalį kur gali ją įlenkti. Kiekvienas pamatinės plokštelės pluoštas rezonuoja tam tikru ir jam pastoviu dažniu. Tai reiškia, kad aukšto dažnio garsai didžiausi ten, kur pamatinė plokštelė labiausiai įtempta – arčiausiai ovaliojo langelio. O galinėje sraigės dalyje išsidėsto žemo dažnio garsai. Šiais reiškiniais galima paaiškinti žmogaus sugebėjimą atskirti skirtingų dažnių garsus [10],[13].

2. EGZISTUOJANČIŲ AUSIES BŪGNELIO TYRIMŲ APŽVALGA

Vienas iš efektyviausių metodų, tiriant vidurinės ausies mechaniką, yra baigtinių elementų metodas. Šis metodas leidžia įvertinti sudėtingos formos ir kraštinių sąlygų vidurinės ausies dalis. Tai kompiuterinio modelavimo metodas, naudojamas inžinerinei ir biomechaninei analizei. Metodas leidžia imituoti vidurinės ausies anatomines struktūras, suskaidant jas į daugybę nesudėtingų elementų. Kiekvieno atskiro elemento funkcionalumas, gali būti aprašomas nesudėtingomis lygtimis.

Baigtinių elementų metodo privalumai:

- Metodas leidžia įvertinti sudėtingas struktūras ir įvairias jų kraštines sąlygas;
- Skirtingos formos elementų panaudojimas tame pačiame modelyje;
- Automatinis duomenų sudarymas, kai naudojami tik geometriniai įvaizdžiai;
- Galimybė sutankinti tinklus vietose kur fiksuojami didžiausi įtempiai.

Tačiau, kad būtų galima sudaryti tikslius baigtinių elementų modelius, prieš tai reikia įvertinti pagrindines, modeliui sudaryti naudojamas savybes. Atliekant tyrimus su ausies būgneliais esminės savybės yra būgnelio storis, geometrija, Jungo modulis, Puasono santykis, kraštinės sąlygos ir kt.

2.1 Ausies būgnelio storio nustatymo eksperimentiniai tyrimai jam enant natūralioje aplinkoje

Literatūroje aprašoma daugybė skirtingų metodų taikomų ausies būgnelio tyrimams atlikti. Dažnai tiriami imitaciniai ausies būgnelio modeliai arba bandymams naudojami preparuoti žmonių arba įvairių gyvūnų būgneliai. Daugeliu atvejų, kai tiriami žmonių ausies būgneliai jie yra atskiriami nuo pirminės savo padėties. Tačiau kai kada tyrimai atliekami būgneliui esant *in situ* (esant natūralioje aplinkoje). Tokiems tyrimams naudojamas visas smilkinkaulis, kurio vidinę būgninę dalį iš išorės dengia ausies būgnelis. Šie tyrimai pasižymi keletu privalumų: minimalus bandinio paruošimas, nereikalingas būgnelio atskyrimas, kurio metu atsiranda galimybė pažeisti mėginį, lengviau imituoti natūralias sąlygas, didesnis bandymų efektyvumas bei rezultatų tikslumas.

Būgnelio storis laikomas kritiniu parametru, nusakančiu membranos masės pasiskirstymą ir turi didelę įtaką membranos standumui, todėl labai svarbu storio nustatymo testų patikimumas ir gautų rezultatų tikslumas.

2.1.1 Optinė koherentinė tomografija

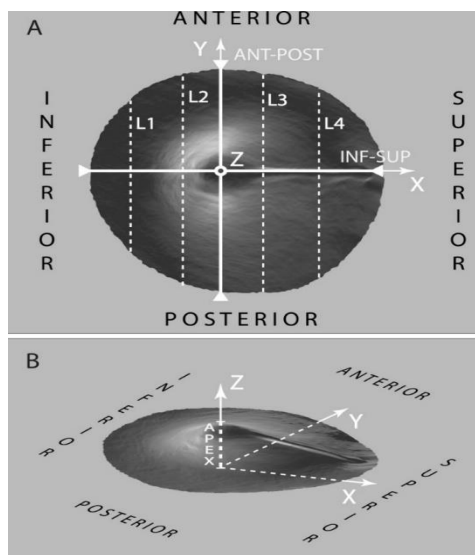
Optinė koherentinė tomografija (OKT) – optinė technologija, kuri skirta įvairiems medicinos, biologijos ir medžiagų tyrimams atlikti. OKT vienas iš metodų, kuris leidžia tyrimus atlikti natūralioje aplinkoje. Tyrimams naudojama mažo koherentiškumo šviesa, kai matuojamas audinio išsklaidytas atgaline kryptimi šviesos intensyvumas, gaunami būgnelio skersinio pjūvio nespaltoti vaizdai. Nuo skirtingų būgnelio paviršiaus taškų atsklidusios šviesos kontrasto skirtumo pokyčiai matomi mikronų tikslumu. Tikslus storio nustatymas yra būtinas kuriant realius matematinius dinaminės ausies būgnelio elgsenos modelius, kurie yra panaudojami aktyvių bei pasyvių implantų konstrukcijoms sudaryti. Dėl tokių duomenų trūkumo dažnai sudarant baigtinių elementų modelius yra priimta taikyti vieną, storio vertę visai membranai.

OKT yra efektyvus būdas sudaryti didelės skiriamosios gebos viso membranos paviršiaus storio pasiskirstymo žemėlapius. Daugiausiai dėmesio skiriama įtemptosios būgnelio dalies tyrimui, nes tai yra pagrindinė būgnelio dalis perduodant garsą ir sudarant biomechaninius modelius. Didelis ausies būgnelio skersmuo 10 mm, lyginant su jo storio intervalu 50 – 150 μm , apriboja jo vaizdavimo technikos pasirinkimo galimybes. Pirma, skenavimo gylis turi būti pakankamai didelis, kad būtų galima nustatyti visus storio variantus. Antra, sistema turi būti pritaikyta, kad gebėtų užfiksuoti visą būgnelio plotą tuo pačiu išlaikydama didelę šoninę skiriamąją gebą, kai būgnelis skenuojamas nuo vieno krašto iki kito. OKT šoninė ir ašinė skyra yra atskirtos viena nuo kitos, tai leidžia išlaikyti aukštą rezoliuciją skenuojant bandinį per visą jo tūrį. Svarbūs OKT vaizdo gavimo privalumai yra tie, kad tai neinvazinis, nepasižymintis ardomuoju poveikiu metodas, kuriame taip pat netaikoma jonizuojanti spinduliuotė. Trūkumai: apribotas, kelių milimetrų gylio įsiskverbimas į bandinį, priklausomai nuo centrinio naudoto šviesos šaltinio bangos ilgio. Tam, kad būtų galima sudaryti storio pasiskirstymo žemėlapius, būgneliui esant jo buvimo vietoje, ašinis skenavimo gylis turi būti ne mažesnis kaip 2 mm. Todėl šiame tyrime buvo pasirinktas šviesos šaltinis, kurio spindulio bangos ilgis 1,050 nm, tai leidžia pasiekti maksimalų skenavimo gylį 2,36 mm kartu išlaikant ašinio ir šoninio skenavimo rezoliuciją $<10 \mu\text{m}$. Tai OKT daro viena iš patikimiausių priemonių atliekant tikslius ir pilnus būgnelio storio pasiskirstymo tyrimus [14].

Tyrimams naudojami 5 (TM1 – 5) sveikų ir 1 (TMP) turinčio patologinių sutrikimų, žmonių ausies būgneliai. Trys būgneliai dešinėsios ausies (TM1, TM3 ir TM5) ir trys kairiosios (TM2, TM4 ir TMP). Ausies kanalas išgėžiamas, kad pilnai būtų matomas ausies būgnelio šoninis paviršius, kuris apšviečiamas OKT spinduliu. Per visą būgnelio plotą atliekami optiniai pjūviai naudojant Furje OKT sistemą suderintą su galvanometru. Linijinis skenavimas sukuria dvimatį duomenų rinkinį, kuris atitinka būgnelio išilginio pjūvio vaizdą (x-z ašinis nuskaitymas), o ploto

skenuojant dvimačius vaizdus ir keičiant atraminio veidrodžio padėtį leidžia surinkti trimatį duomenų rinkinį, atitinkantį tūrinį bandinio skenavimą (x-y-z) – viso lauko OKT metodika.

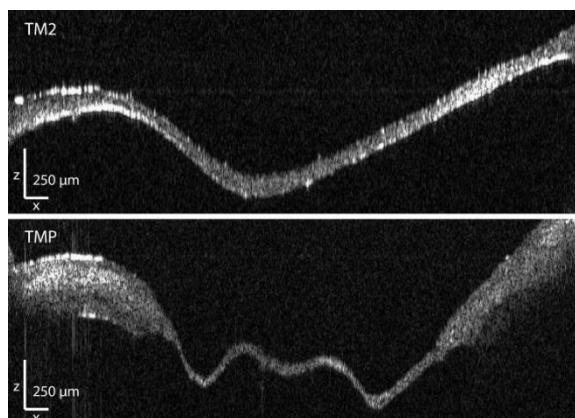
Gauti rezultatai apdorojami specialia programine įranga ir sukuriama ausies būgnelio modelis. Prieš atliekant skaitinius matavimus, gauti modeliai TM1 – 5 suderinami koordinatinių sistemoje pateiktoje 2.1 paveiksle.



2.1 pav. Ašių nustatymai iliustruojantys membranos orientaciją [14]

2.1 paveiksle A pateikiamas 3D modelio vaizdas iš viršaus, iš kurio lengvai gali būti nustatomi būgnelio matmenys XY plokštumoje. Ausies būgnelio ilgis iš kairės į dešinę vertinamas išilgai X ašies. Linijos L1 – 4 nurodo vietas, kuriose bus padaryti skerspjūviai, norint parodyti išsamų membranos storio kitimą. Paveiksle B iliustruojama teigiamos Z ašies orientacija, pagal kurią apibrėžiamas būgnelio viršūnės aukštis.

Atliekami optiniai koherentiniai ausies būgnelio matavimai, ašiniai ausies būgnelio skerspjūviai pateikiami 2.2 paveiksle.



2.2 pav. TM2 viršuje ir TMP apačioje, optiniai pjūviai išilgai linijos L2 [14]

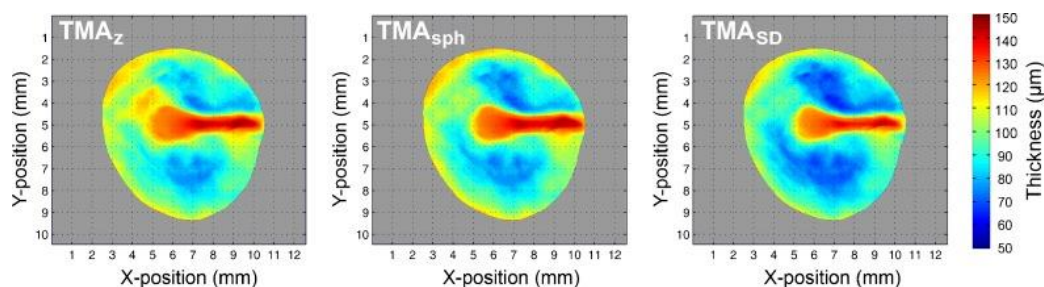
2.2 paveiksle pateikiami sveiko ausies būgnelio TM2 ir turinčio patologinių sutrikimų TMP, ašiniai skerspjūviai. Tokie ašiniai nuskaitymai buvo atliekami su kiekvienu bandiniu. Po neapdorotų duomenų segmentavimo dvejetainėje koordinacių sistemoje ir geometrinių savybių kalibravimo sukuriama visų šešių ausies būgnelių 3D modeliai. 2.1 lentelėje pateikiama keletas iš sudarytų modelių morfologinių ir geometrinių savybių.

2.1 lentelė. Skaitinės 3D modelių, iš OKT gautų duomenų, geometrinių savybių reikšmės [14]

Bandinys	Membranos skersmuo X ašies kryptimi, mm	Membranos skersmuo Y ašies kryptimi, mm	Būgnelio paviršiaus plotas išmatuotas statmenai Z ašies, mm²	Būgnelio paviršiaus plotas, atsižvelgiant į aukščio variacijas Z ašies kryptimi, mm²	Višūnės aukštis, mm	Vidutinis membranos storis pasirinktoje įtemptosios dalies vietoje, μm
TM1	8,86	8,11	60,58	67,95	1,72	95,98
TM2	7,73	8,36	51,92	58,76	1,49	80,25
TM3	7,96	7,55	43,57	49,84	1,51	82,91
TM4	8,21	8,73	52,97	61,55	1,75	89,80
TM5	8,05	8,47	53,13	60,44	1,53	81,72
TMP	7,91	8,50	55,06	68,51	1,58	85,49

Naudojant 2.1 lentelėje pateiktus skaitinius duomenis gali būti vertinami statistiniai ryšiai tarp geometrinių ir vidutinio storio savybių. Svarbiausia modelio tikimo duomenims charakteristika R^2 (determinacijos koeficientas), kuo ši reikšmė arčiau 1 tuo modelis labiau tinka duomenims. Skaičiuojant determinacijos koeficientą tarp vidutinio membranos storio ir membranos skersmens X ašies kryptimi, Y ašies kryptimi, būgnelio paviršiaus ploto išmatuoto statmenai Z ašies bei būgnelio paviršiaus ploto atsižvelgiant į aukščio variacijas, gaunamos R^2 reikšmės – 0,97, 0,01, 0,45 ir 0,44, atitinkamai. Kas rodo tiesinį sąryšį tarp vidutinio būgnelio storio ir skersmens X ašies kryptimi, bei mažesnę vidutinio storio sąryšį su kitais geometriniais parametrais.

Penkių sveikų ausies būgnelių storiai suvidurkinami interpoliacijos būdu ir pateikiami jų storio, nustatyto trimis skirtingais storio įvertinimo metodais, pasiskirstymo žemėlapiai. Gauti rezultatai pateikiami 2.3 paveiksle.



2.3 pav. TM1 – 5 storio pasiskirstymo žemėlapis nustatytas trimis skirtingais storio įvertinimo metodais [14]

Vidutinė įtemptosios būgnelio dalies storio vertė, nustatyta iš OKT gautų duomenų, taikant tris skirtingas metodikas, $89,2 \pm 3,8$; $86,7 \pm 3,2$ ir $82,6 \pm 3,1$ μm , atitinkamai, kaip pateikiama 2.3 paveiksle. Vidutinis centrinės srities storis 50 – 70 μm , storis padidėja iki 120 μm aplink būgnelio rankeną.

2.1.2 Prispaudimo testas

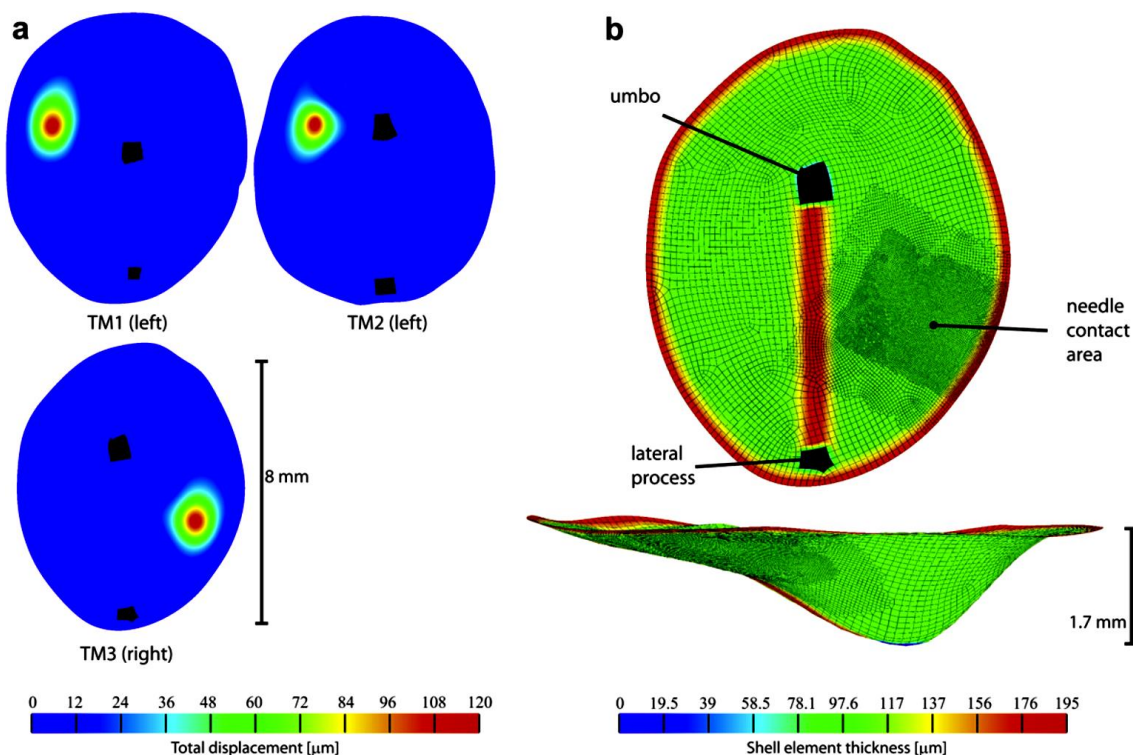
Bandymas atliekamas siekiant gauti rezultatus reikalingus BE modelio optimizavimui. Tyrimui naudojami klausos sutrikimų neturinčių 83 metų moters bei 76 ir 64 metų vyrų smilkinkauliai, kuriuose išitvirtinę ausies būgneliai, toliau žymimi B1, B2, B3, atitinkamai. Bandiniai fiksuojami taip, kad būtų gaunamos gerai apibrėžtos ribinės sąlygos ir nepakistų pirminė forma. Bandinių paruošimo metu ir atliekant prispaudimo bandymą analizei drėkinami ultragarsiniu drėkintuvu (BIONAIRE BU1300 W). Su kiekvienu mėginiu atliekamas virpesių prispaudimo testas, kai dažnis keičiamas 0,2 Hz žingsniu, išlaikant prispaudimą 120 s. Bandinys įstatomas į mėgintuvėlio laikiklį, stūmokliu prispaudžiamas, apskaičiuojama veikianti jėga. Stūmoklio judesiai valdomi grįžtamojo ryšio kontrolės sistema. Triukšmo signalo lygis laikomas pastovus 20dB. Testas atliekamas horizontaliajam būgnelio paviršiui, nes tai leidžia tirti visą būgnelio paviršių ir lengvesnis mėginio paruošimas. Stūmoklis, kurio galas išgaubto cilindro formos, leidžiamas iki membranos paviršiaus, kol gaunamas nežymus jėgos pokytis, tuomet atleidžiamas, kad jėgos vertė taptų nulinė. Dėl ribotų pozicionavimo galimybių, kiekvienam bandiniui, prispaudimo bandymas atliekamas tik viename membranos taške. Taškas pasirenkamas pakankamai toli nuo žiedinės pusės ir būgnelio rankenos, siekiant išvengti kraštinių sąlygų poveikio ir vietinių įtempimų. Bandinius kondicionuojant užfiksuojamas tikslus įdubos gylis (120 μm), kurį atitinka svyravimų amplitudė, registruojamas tikslus poslinkis. Minėtas įdubos gylis yra pakankamas, kad sužadinti matuojamas jėgas, išlaikant deformaciją mažesnę nei 1,5 %.

Ausies būgnelio BE modelio sudarymas labai priklauso nuo jo mechaninių savybių. Kaip ir daugelis biologinių audinių, būgnelis pasižymi tamprumu. Vidurinioji trisluoksnės membranos dalis

yra kolageno skaidulos, kurios lemia standumo savybes. Tyrimais nustatyta, kad trisluoksnė ortotropinė membrana akustinę perdavimo funkciją atlieka geriau negu vienalytė izotropinė membrana. Tačiau, šiame tyrime priimta būgnelį modeliuoti, kaip izotropinę medžiagą, kurią apibūdina du pagrindiniai parametrai: Jungo modulis ir Puasono santykis. Modelis sudaromas naudojant programinės įrangos paketą FEBio. Programoje įvedamos bandinių geometrinės charakteristikos ir ribinės sąlygos – kraštai įtvirtinami nejudamai. Gauti rezultatai pateikiami 2.4 paveiksle. Statinis Jungo modulis apskaičiuojamas pagal tam tikrą metodiką, gauti rezultatai pateikiami 2.2 lentelėje. Tyrimo metu taip pat nustatyta Jungo modulio priklausomybė nuo būgnelio storio. Mažėjant būgnelio soriui Jungo modulis didėja ir atvirkščiai. Ši priklausomybė rodo, kad sudarant baigtinių elementų modelius labai svarbus teisingas storio pasirinkimas [15].

2.2 lentelė. Būgnelio storis išmatuotas įspaudimo vietoje ir apskaičiuotas Jungo modulis [15]

Bandinio numeris, Nr	Storis, μm	Jungo modulis, MPa
B1	97±16	2,1
B2	61±6	4,4
B3	110±22	2,3

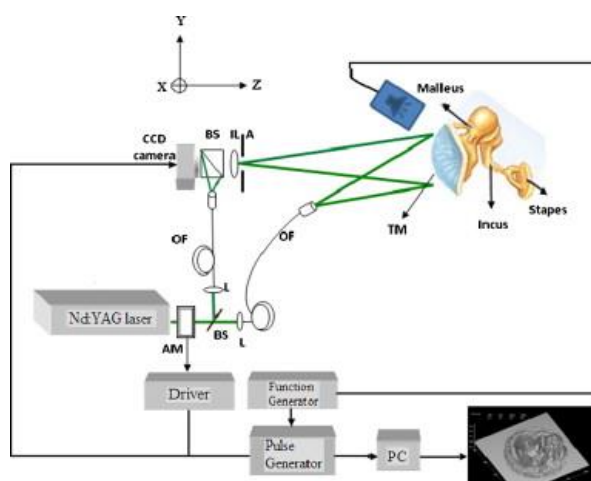


2.4 pav. Konkretaus bandinio baigtinių elementų modelis. a – būgnelio vaizdas iš priekio. Spalvinė legenda rodo suminių poslinkių pasiskirstymą, kai membrana visiškai prispausta. b)– būgnelio B3 vaizdas iš priekio ir iš šono. Spalvinėje legendoje pateikiamas kevalo tipo elementų storio pasiskirstymas [15]

Prispaudimo testo metu nustatytas Jungo modulis gerokai skiriasi nuo kituose literatūros šaltiniuose nustatyto Jungo modulio. Rezultatai nesutampa galimai dėl skirtingų deformacijų ar analizės atlikimo skirtinguose dažnių diapazonuose. Taip pat daugeliu atveju, kai nustatytas didesnės Jungo modulio reikšmės (25, 38, 40 MPa ir kt.), bandymai buvo atliekami būgnelių išpjaunant, o šis eksperimentas buvo atliekamas *in situ* (buvimo vietoje) [15].

2.2 Ausies būgnelio tyrimas holografine interferometrija

Mechaninių ausies būgnelio savybių tyrimai yra būtini jų detaliam klinikiniam įvertinimui, kiekybiniai tyrimai labai svarbūs, nes ausies būgnelis yra viena iš svarbiausių struktūrų viduriniojoje ausyje. Tiriant būgnelio virpesių formas ir vertinant atsiradusius poslinkius galima apibūdinti ir nustatyti jo fiziologinę būklę. Tiriant biologinių audinių mechanines savybes, skaitmeninė holografinė interferometrija yra patikimas optinis bekontaktis metodas, kuriuo poslinkių pokyčius galima nustatyti realiu laiku. Tai technika padedanti geriau suprasti ausies būgnelio veikimo mechanizmą.

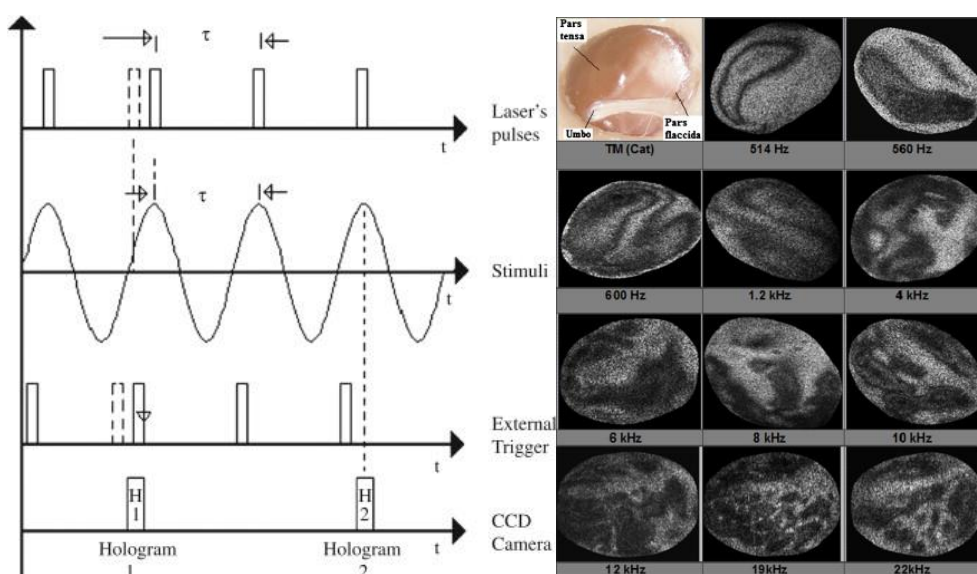


2.5 pav. Skaitmeninės holografinės interferometrijos matavimo schema: BS – objektinis spindulys, BC – atraminis spindulys, L – lęšis, IL – vaizdo gavimo lęšis, A – diafragma, OF – šviesolaidis, TM – ausies būgnelis, AM – akustinis optinis moduliatorius.

2.5 paveiksle pateikiama principinė ausies būgnelio poslinkių matavimo, skaitmeninės holografinės interferometrijos metodu, schema, kai būgnelis veikiamas akustinėmis bangomis. Lazerio spindulys ($\lambda = 532 \text{ nm}$, 40 mW) padalijamas į objektinį ir atraminį spindulius. Objektinis spindulys apšviečia būgnelio paviršių. Nuo objekto išsklaidytas spindulys surenkamas vaizdo gavimo lęšių sistemoje ir taip gaunama informacija apie objekto poslinkius. Kameroje interferuoja objektinis ir atraminis spinduliai ir suformuojama vaizdo holograma. Hologramų registravimui

naudojama 1392×1024 pikselių CCD kamera, kurios jautri zona $8,97 \times 6,6 \text{ mm}^2$. Tyrimo metu garsiakalbis, varomas žemų amplitudžių dažnių generatoriumi, per stiprintuvą, žadina būgnelio virpesius.

Norint iširti garso poveikį ausies būgneliui, akustinis optinis modulatorius yra susinchronizuojamas su garso signalo maksimalios amplitudės signalu, tam kad lazeris dirbtų stroboskopiniame režime. Tokiu būdu nustatyta, kad lazerio impulso plotis gali būti $1/10$ akustinio periodo trukmės visuose dažnių diapazonuose. Išoriniai žadinimo impulsai, kurie yra generuojami impulsų generatoriumi ir naudojami CCD kamerasi ir akustiniam – optiniam generatoriui, gali būti suvėlinti ir jų fazė gali sutapti su akustiniu stimulų plėtiniumi.



2.6 pav. a – Sinchronizacijos schema, kurioje matoma kokie nepertarukiami impulsai reikalingi norint gauti hologramas H1 ir H2; b – ausies būgnelio rezonansinių dažnių virpesių formos, kai garso lygis 100 dB

2.6 paveiksle a matome, kad esant pasirinktam signalų dažniui (514 Hz ir 22kHz) fiksuojami du holografiniai vaizdai H1 ir H2. Pirmasis vaizdas H1 fiksuojamas, kai garso signalo fazė 0° , kitas holografinis vaizdas H2 užfiksuotas maksimaliame akustinio signalo amplitudės lygyje (90°). Paveiksle 2.6 b stebimos ausies būgnelio rezonansinių dažnių virpesių formų hologramos, kai garso lygis 100 dB. Matome, kad esant žemiems dažniams būgnelio virpesių formos yra pakankamai paprastos, didėjant dažniui gaunamos vis sudėtingesnės virpesių formos. Šis tyrimas buvo atliktas siekiant tiksliai ir greit nustatyti virpesių formas nustatytame dažnių diapazone. Gauti preliminarūs rezultatai rodo, kad žadinant būgnelio virpesius žemos amplitudės garso slėgio banga gaunami žemos amplitudės ausies būgnelio poslinkiai. Pastarieji didėja atitinkamai didinant garso slėgio bangos amplitudę.

Ausies būgnelio tyrimas holografinės interferometrijos metodu suteikia galimybę gauti konkrečias virpesių formas. Šis metodas turėtų padėti atsakyti į dar neatsakytus klausimus susijusius su ausies būgnelio virpesių ir judesių tarpusavio sąveika bei jų kontrolės priemonės. Kai būdinga būgnelio virpesių struktūra yra žinoma galima geriau suprasti ausies būgnelio funkciją. Šių mokslinių tyrimų metu gauti rezultatai labai naudingi vertinant ausies membranos mechaninę elgseną, jie gali padėti atskirti ir patikslinti esamus ausies būgnelio biomechaninius modelius. Šio metodo taikymas labai naudingas medicinos srityje, kadangi tyrimams atlikti reikia mažiau įrangos ir komponentų. Kitas svarbus privalumas yra tai, kad skaitmeninėje holografinėje interferometrijoje užtenka dviejų vaizdų, kad būtų galima padaryti atitinkamas išvadas [18].

3. EKSPERIMENTINIAI LITERATŪROS DUOMENYS BAIGTINIŲ ELEMENTŲ MODELIO SUDARYMUI

Literatūroje randama daug skirtingų ausies būgnelio baigtinių elementų modelių, kurie skiriasi geometrija, elementų bei tinklelių tipais, ribinėmis elementų suvaržymo sąlygomis ir medžiagų savybėmis. Lentelėje 3.1 pateikiamos pagrindinės baigtinių elementų modelio sudarymo charakteristikos.

3.1 lentelė. Pagrindinės ausies būgnelio baigtinių elementų modelio charakteristikos [16]

Nr.	Storis, μm	Jungo modulis, MPa		Tankis ρ , 10^3 , kg/m^3	Puasono santykis	Slopinimo koeficientas $R(\alpha, s^{-1}; \beta, s)$	BE tipas (mazgų skaičius)	Dažnių diapazonas, kHz
		<i>Pars tensa</i>	<i>Pars flaccida</i>					
1	50	32	32	1,2	0,3	R (0; 0,0001)	Kevaliniai (3)	0,1 – 10
2	100	20	20	1,2	0,3	R (0; 0,0001)	Kevaliniai	< 0,6
3	50 – 100	33,4	11,1	1,1	0,33	R (260; $3,7 \times 10^{-5}$)	Strypiniai (8)	0,1 – 10
4	100	40	26	1,2	0,3	R (0; $0,75 \times 10^{-4}$)	Tūriniai (4)	0,2 – 8
5	100 – 800	32	10	1,2	0,3	R (0; $0,75 \times 10^{-4}$)	Kevaliniai (8)	0,2 – 10
6	$74 (50 - 100)$	32 – 40	11 – 14	1,2	0,3/0,4	R (0; 0,0001)	Tūriniai (8)	0 – 4,5
7	50	85,7	45,6	1,2	0,35 – 0,43	R (260; $3,7 \times 10^{-5}$)	Kevaliniai (4)	0,1 – 10

3.1 Geometrija

Būgnelio storis svarbiausias parametras, kuris aptariamas daugelyje tyrimų, kaip turintis didžiausią įtaką rezultatams. Nors būgnelio storis skirtingose jo vietose yra nevienodas, svyruoja nuo 30 iki 150 μm , daugelio mokslininkų susitarimu priimta vidutine būgnelio storio verte laikyti 74 μm .

Remiantis daugeliu autorių storių yra susijęs su Jungo modulių, nusakančiu tamprumo savybes, skirtingose būgnelio vietose, todėl analizei taikant skirtingas storio ir elastingumo kombinacijas, gal būti gaunami panašūs rezultatai [16].

3.2 lentelė. Eksperimentiniais metodais nustatytos pagrindinės ausies būgnelio geometrinės charakteristikos [16]

Eksperimento numeris, Nr	Ilgiausias skersmuo, mm	Trumpiausias skersmuo, mm	Kūgio aukštis, mm	Pavišiaus plotas, mm^2	Storis, mm
1	10,98	9,22	1,5	79	0,074 – 0,169
2	9,10	9,07	1,42	64,81	0,43
3	10,86	9,24	1,46	72,01	0,05 – 0,1
4	8,93	8,76	1,46	66,3	0,05 – 0,074
5	8,0 – 10,0	7,5 – 9,0	2,0	55,8 – 86,0	0,04 – 0,1

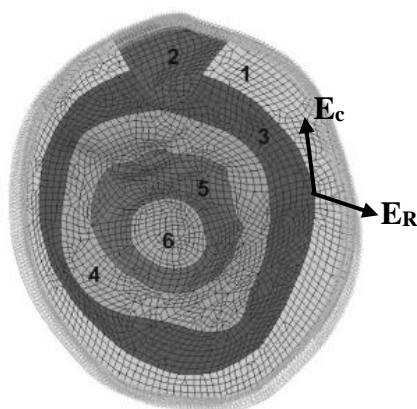
Lentelėje 3.2 pateikiamos skirtingų atorių eksperimentiniais metodais nustatytos pagrindinės žmogaus ausies būgnelio geometrinės charakteristikos. Iš pateiktų duomenų matome, kad ilgiausias būgnelio skersmuo svyruoja nuo 8 iki 10,98 mm, trumpiausias nuo 7,5 iki 9,24 mm, būgnelio kūgio aukštis kinta intervale 1÷2 mm, pavišiaus plotas – 55,8÷79 mm², o būgnelio storis kinta nuo 0,04 mm iki 0,43 mm.

3.2 Medžiagų mechaninės savybės

Daugelio autorių atliktuose tyrimuose keliamas klausimas apie ausies būgnelio medžiagų mechanines izotropines/ anizotropines savybes ir jų vienodumą, tačiau šiuo klausimu vis dar sunku padaryti kiekybines išvadas. Slopavimo koeficientas yra esminis izotropinių /anizotropinių medžiagų skirtumas – apibūdinantis modelio tamprumo (elastingumo) savybes.

Įtemptoji būgnelio dalis su daugiasluoksne pluoštine ultrastruktūra, laikoma anizotropine medžiaga, dėl kolageno skaidulų išsidėstymo išilgai radialinės ir žiedinės krypties. Palaidoji būgnelio dalis tiriami, kaip vienalytė izotropinė medžiaga, nors ji sudaryta iš daugelio kelių skirtingų sluoksnių, tamprumo savybėmis ji pasižymi dėl atsitiktinai išsidėsčiusių elastino gijų; taisyklingai ir glaustai išsidėsčiusios kolageno skaidulos nepatenka į palaidąją būgnelio dalį.

Manoma, kad skaidulų sluoksnio tamprumo modulis mažėja nuo būgnelio centro link periferijos. Kaip matome iš 3.1 lentelėje pateiktų duomenų, Jungo modulis sudarant ausies būgnelio modulį svyruoja nuo 20 iki 86 MPa įtemptoje būgnelio dalyje ir nuo 11 iki 46 MPa laisvojoje būgnelio dalyje.



3.1 pav. Būgnelio baigtinių elementų modelis suskirtant į 6 sritis besiskiriančias Jungo modulio reikšmėmis [16],[17]

3.1 paveiksle pateikiamas, žmogaus ausies būgnelio BE modelis, kur pateikiamas būgnelio segmentavimas į 6 sritis, kurių kiekviena skiriasi Jungo modulio reikšme. Pastarosios pateikiamos 3.3 lentelėje.

3.3 lentelė. Laisvosios (*pars flaccida*) ir įtemptosios (*pars tensa*) būgnelio sričių Jungo modulis

[17]

Srities numeris, Nr	Jungo modulis, MPa	
	Žiedinių skaidulų kryptimi, E_c	Spinduliškai išsidėsčiusių skaidulų kryptimi, E_R
1	40	20
2	10	10
3	33,3	26,6
4	26,6	33,3
5	20	40
6	40	40

3.3 lentelėje pateikiama, kaip skiriasi Jungo modulio reikšmės, numeriu 2 pažymėta laisvoji ausies būgnelio sritis ir joje Jungo modulis tiek žiedinių tiek radialinių kolageno skaidulų sluoksnyje 10 MPa. Įtemptojoje būgnelio srityje Jungo modulis svyruoja nuo 20 iki 40 MPa žiedinių skaidulų sluoksnyje ir nuo 10 iki 27 MPa radialinių kolageno skaidulų sluoksnyje.

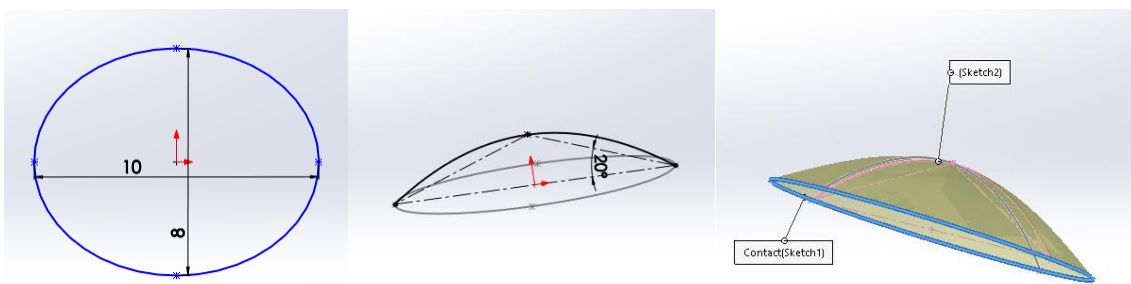
Puansono santykio vertė svyruoja nuo 0,3 iki 0,45, sudarant baigtinių elementų modelį priimta taikyti 0,3 vertę. Daugelio autorių bendru sutarimu ausies būgnelio tankį priimta laikyti $1,2 \times 10^3$ kg/m³.

4. SKAITINĖ IR EKSPERIMENTINĖ AUSIES BŪGNELIO PROTOTIPŲ ANALIZĖ

4.1 Būgnelio modelių sudarymas SolidWorks programine įranga

Atlikus literatūros analizę ir išsiaiškinus svarbiausias ausies būgnelio mechanines charakteristikas, SolidWorks programine įranga sudaromi būgnelio modeliai turintys skirtingą geometriją, būgnelio kūgio kampas kinta nuo 0° iki 40° , mažiausias kitimo žingsnis 5° . Pasirenkami pastovūs parametrai: būgnelio trumpasis skersmuo 8 mm, ilgis – 10 mm, visas kraštinis perimetras įtvirtinamas nejudamai.

SolidWorks programine įranga sudaromi ausies būgnelio modelio šablonai be storio, nes storis bus įvedamas toliau atliekant bandymus COMSOL Multiphysics programine įranga.



4.1 pav. Ausies būgnelio modelio šablonas be storio, kai kūgio kampas 20°

Pagal 4.1 paveiksle pateiktą ausies būgnelio prototipo modelio šabloną, atitinkamai keičiant kūgio kampą nuo 0° iki 40° , mažiausias kitimo žingsnis 5° , sukuriami prototipo modeliai, kurie toliau bus tiriami COMSOL Multiphysics programine įranga.

4.2 Ausies būgnelio virpesių skaitinė analizė Comsol Multiphysics 3.5a programine įranga

Dauguma sistemų, tarp jų ir ausies būgnelis, tam tikrame dažnių diapazone virpa savuoju dažniu be papildomo išorinės jėgos poveikio. Kai būgnelis veikiamas garso bangomis, kurių dažnis tiksliai atitinka savuosius dažnius, pasiekama didžiausia galima virpesių amplitudė. Šis reiškinys vadinamas rezonansu. Ausies būgnelis turi savųjų virpesių formas (atitinkamus dažnius), kurios priklauso nuo daugelio savybių, kaip pavyzdžiui elastingumo, diametro, storio. Ausies būgnelio prototipo BE modelis sudaromas ir virpesių skaitinė analizė atliekama Comsol Multiphysics 3.5a

programine įranga. Baigtinių elementų analizė yra kompiuterinio modeliavimo metodas, naudojamas inžinerinei ir biomechaninei analizei. Jis suteikia galimybę imituoti vidurinėsios ausies anatomins struktūras, suskaidant jas į daugybę nesudėtingų elementų. Kiekvieno atskiro elemento funkcionalumas, gali būti aprašomas nesudėtingomis lygtimis [14].

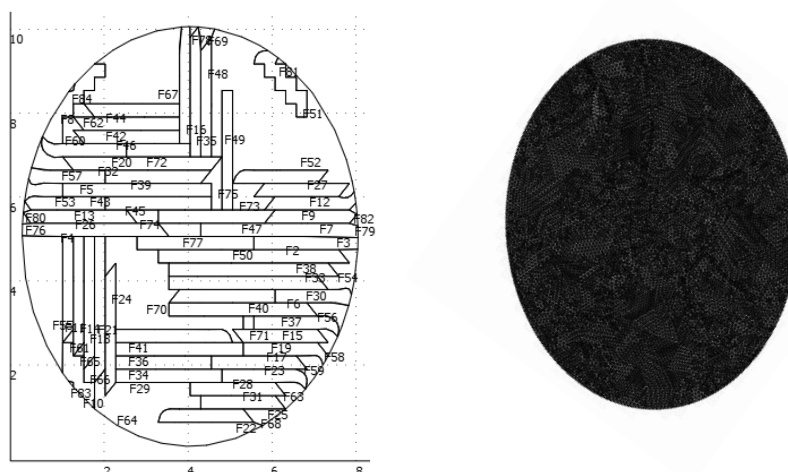
4.2.1 Savųjų virpesių skaitinė analizė

Analizė atliekama siekiant nustatyti ausies būgnelio savųjų virpesių formas. Kai jų struktūra yra žinoma, galima geriau suprasti ausies būgnelio funkciją. Analizės metu, virpesių formos nustatomos kiekvienai geometrijai keičiant Jungo modulį nuo 20 iki 40 MPa, mažiausias kitimo žingsnis 5 MPa. Analizės parametrai pateikiami 4.1 lentelėje.

4.1 lentelė. Pastovūs analizės parametrai

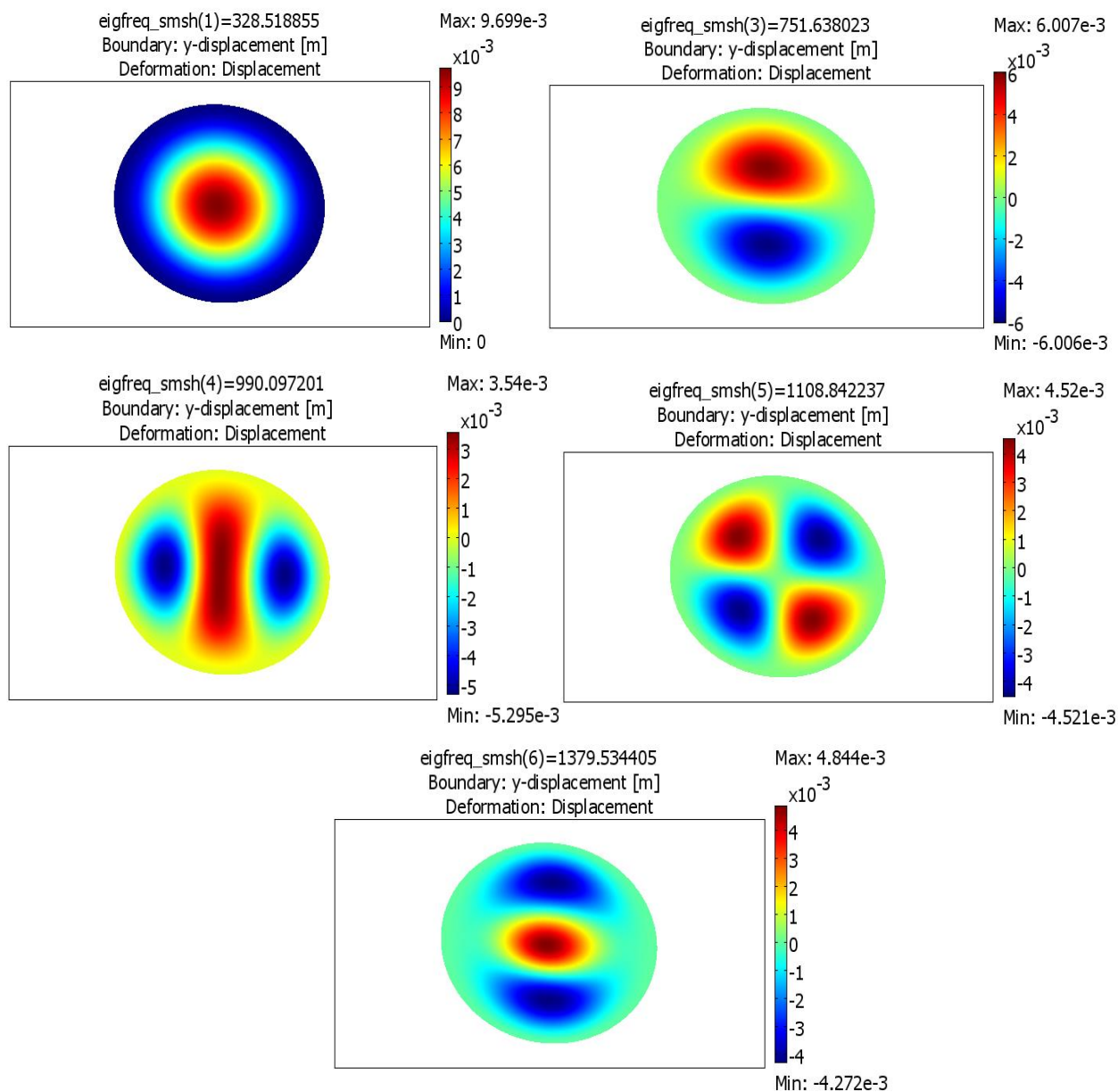
Puasono santykis	0,3	Slopinimo koeficientas	0,078
Tankis, kg/m³	1200	Maksimalus tinklelio elementų dydis, mm	0,1
Storis, mm	0,1	Savųjų virpesių formų skaičius	20

Po to kai programoje apibrėžiamos būdingosios BE modelio geometrinės ir medžiagos savybės: storis, Jungo modulis, tankis, Puasono santykis bei apibrėžiamos ribinės sąlygos (būgnelio kraštai įtvirtinami nejudamai), modelis suskaidomas baigtiniais elementais gauti rezultatai pateikiami 4.2 paveiksle.



4.2 pav.1 Kairėje – būgnelio modelis suskaidytas į 84 kevalo tipo baigtinius elementus, dešinėje – modelio baigtinių elementų tinklelis.

Savųjų virpesių nustatymo analizė atliekama su visais būgnelio modeliais, kūgio kampas nuo 0° iki 40°, keičiant Jungo modulį nuo 20 iki 40 MPa. Kiekvienu atveju gaunama po 20 būgnelio savųjų virpesių formų. Pirmosios 5 būgnelio savųjų virpesių formos pateikiamos 4.3 paveiklėse.

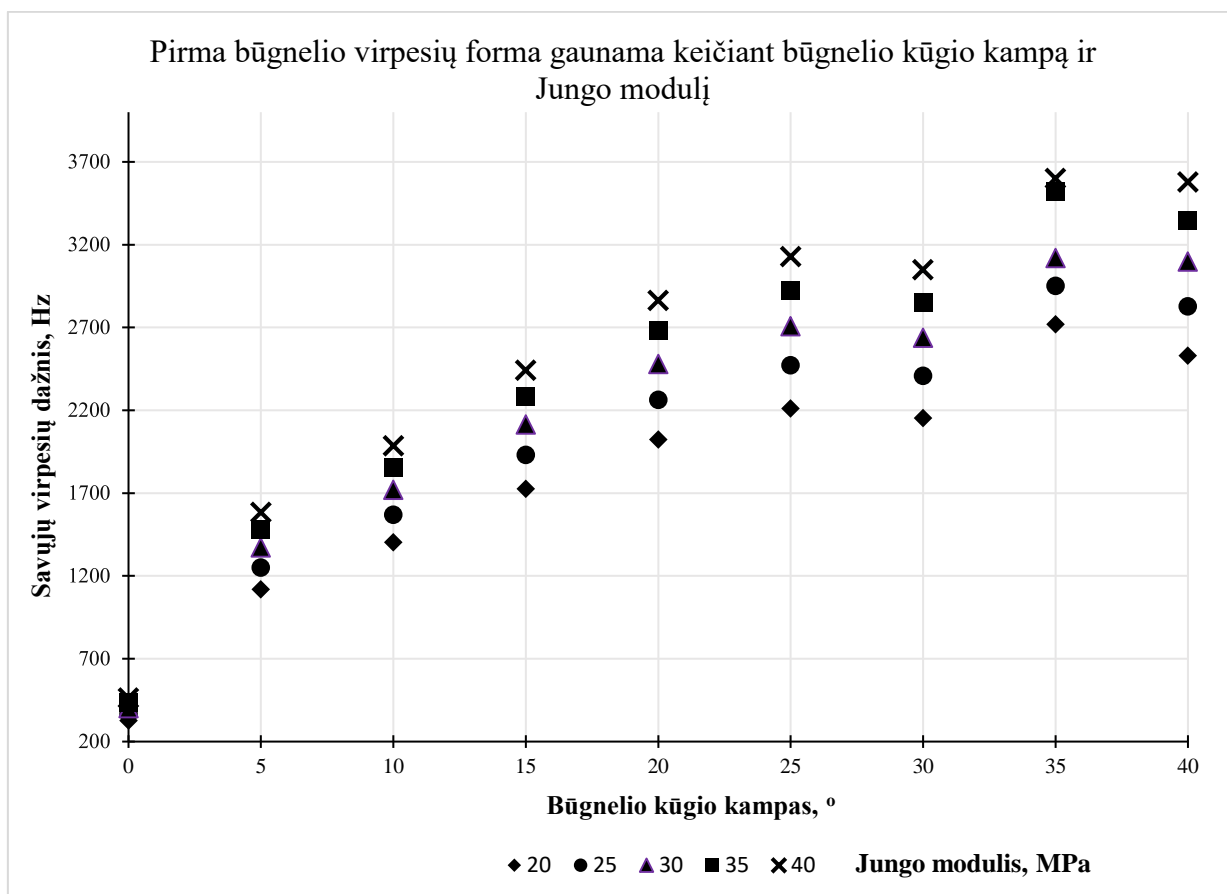


4.3 pav. Ausies būgnelio savųjų virpesių formos, kai būgnelio kūgio kampas 0°, Jungo modulis 20 MPa

Atlikus būgnelio virpesių skaitinę analizę nustatoma savųjų virpesių dažnio vertė. Dažniai, kuriais virpėdamas, skirtingo kūgiškumo ir medžiagos savybių, būgnelis įgyja pirmą, būdingą savųjų virpesių formą, pateikiami 4.2 lentelėje.

4.2 lentelė. Būgnelio savųjų virpesių dažniai, kai gaunama pirma savųjų virpesių forma, kūgio kampas $0 \div 40^\circ$, Jungo modulis $20 \div 40$ MPa

Kampas, °	Jungo modulis, MPa				
	20	25	30	35	40
	Savas virpesių dažnis, Hz				
0	328	367	402	434	464
5	1120	1252	1372	1482	1584
10	1404	1570	1720	1858	1986
15	1727	1931	2116	2285	2443
20	2025	2264	2480	2679	2864
25	2212	2473	2709	2926	3128
30	2154	2408	2638	2850	3049
35	2722	2950	3230	3460	3620
40	2530	2829	3099	3347	3579



4.4 pav. Savųjų virpesių dažnio kitimas, būgnelio kūgio kampas $0^\circ \div 40^\circ$, Jungo modulis $20 \div 40$ MPa, prie šių dažnių gaunama pirma būgnelio savųjų virpesių forma

Iš 4.4 paveikslo galime matyti, kad būgnelio savųjų virpesių dažnis didėja didinant būgnelio kūgio kampą ir Jungo modulį, kol pasiekiamas 30° būgnelio kūgio kampas, kur savųjų virpesių dažnis sumažėja, o būgnelio kampui padidėjus iki 35° vėl padidėja ir pasiekus 40° kampą vėl ima mažėti.

4.2.2 Dažnių skaitinė analizė

Garsinių dažnumų diapazonas, kuriuos girdi žmogus, apima dažnius nuo 20 Hz iki 20 kHz, bet klausia jautriausia 500 – 3000 Hz dažnio žmogaus balso garsams. Ausies būgnelio dažnių analizė buvo atliekama Comsol Multiphysics 3.5a programine įranga. Minimalią girdimumo ribą atitinka būgnelio poslinkis 10^{-11} m. Maksimali būgnelio poslinkio riba, kai jaučiamas skausmas, atitinka 10^{-6} m [19]. Šio modeliavimo tikslas yra nustatyti būgnelio virpesių ir judesių tarpusavio sąveiką, bei nustatyti prie kokių dažnių atsiranda didžiausios būgnelio poslinkių amplitudės, kai būgnelis veikiamas žmogaus balso dažnių diapazone. Šiam tikslui pasiekti mes galime naudoti savųjų virpesių dažnius prie kurių turėtų atsirasti didžiausios būgnelio poslinkių amplitudės.

Analizė atliekama keičiant būgnelio kūgio kampą nuo 0° iki 40° , mažiausias kitimo žingsnis 10° , Jungo modulis pastovus 20 MPa. Analizė atliekama imituojant 45 dB SPL (Sound Pressure Level). Garso slėgio lygis apibrėžiamas pagal formulę (1):

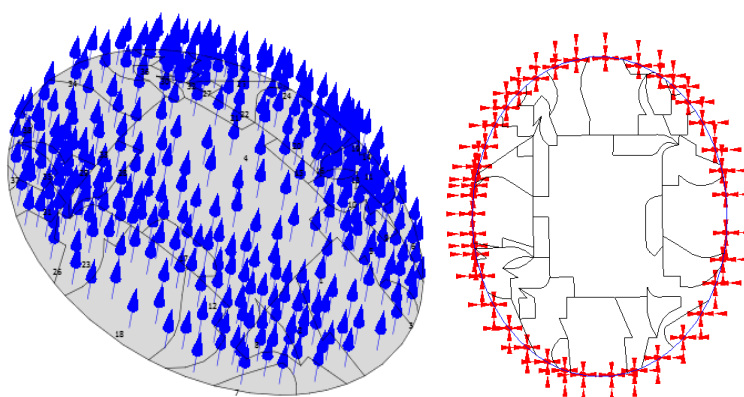
$$SPL = 20 \log \frac{p}{p_0} \quad (1)$$

kur: SPL – garso slėgio lygis, dB

p – garso slėgis, Pa

p_0 - 2×10^{-5} Pa minimalus garso slėgis, kurį gali justi žmogaus ausis [20]

Pagal 1 formulę apskaičiuojamas 45 dB SPL atitinkantis garso slėgis 0,003557 Pa, kuriuo atliekant analizę veikiamas ausies būgnelis. Gautas modelio vaizdas pateikiamas 4.5 paveiksle.

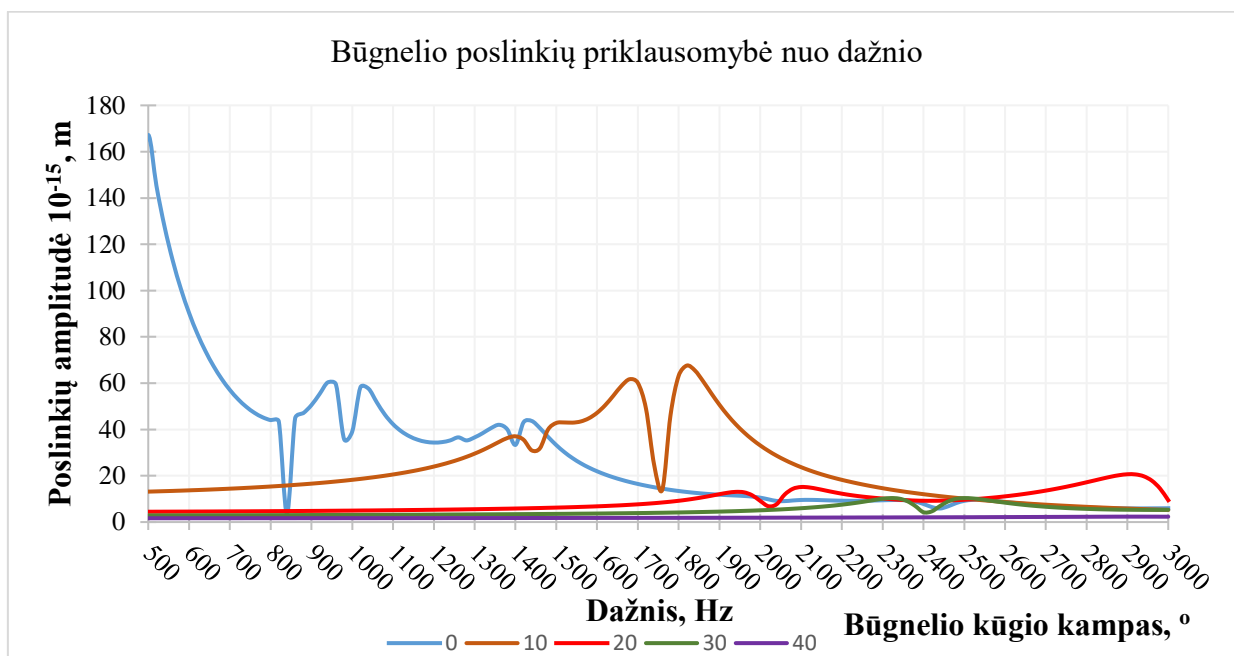


4.5 pav. Būgnelio vaizdas uždėjus apkrovą ir kraštus įtvirtinus nejudamai

4.3 lentelė. Pastovūs analizės parametrai

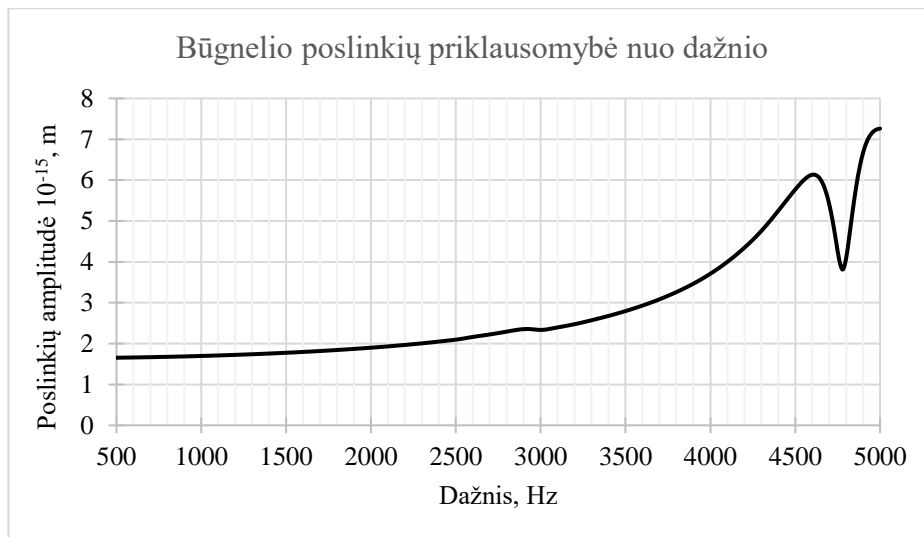
Puasono santykis	0,3	Slopinimo koeficientas	0,078
Tankis, kg/m^3	1200	Maksimalus tinklelio elementų dydis, mm	0,1
Storis, mm	0,1	Apkrova, Pa	0,003557

Poslinkiai, kurie atsiranda būgneliui virpant savųjų virpesių dažniu, nėra realūs. Norint išsiaiškinti prie kokių dažnių atsiranda didžiausios poslinkių amplitudės, programa COMSOL dažniai nuskaitomi, pagrindinaime žmogaus balso dažnių diapazone nuo 480 Hz iki 3000 Hz, kitimo žingsnis 20 Hz. Gauti rezultatai apibendrinami programa Microsoft Excel ir gaunamos būgnelio poslinkių amplitudžių kreivės, pateikiamos 4.6 paveiksle.



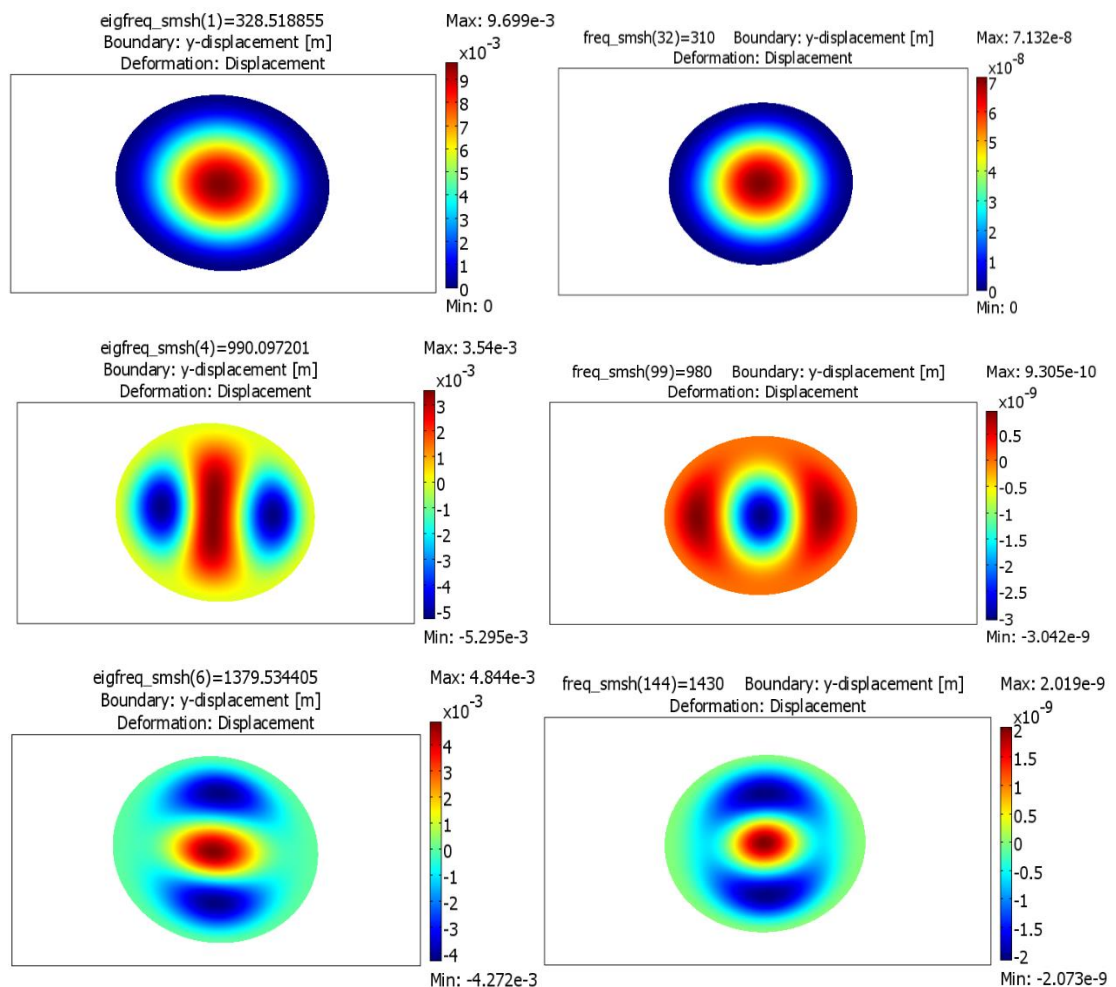
4.6 pav. Būgnelio poslinkių amplitudės, kūgio kampas $0^\circ \div 40^\circ$, dažnių nuskaitymo diapazonas 500 – 3000 Hz

Iš 4.6 paveiksle pateiktų kreivių matome, kad didžiausia poslinkių amplitudė, kai būgnelio kūgio kampas 0° , atsiranda būgneliui virpant 500 Hz dažniu. Kai būgnelio kūgio kampas 10° didžiausia poslinkių amplitudė atsiranda 1800 Hz – 1900 Hz diapazone. Toliau didėjant būgnelio kūgio kampui poslinkių amplitudės aiškiai ima mažėti. Kai pasiekiamas 20° kampas didžiausia poslinkių amplitudė gaunama prie 2900 Hz dažnio. Kai būgnelio kūgio kampas 30° , prie 2500 Hz. Esant 40° kampui maksimalią poslinkių amplitudę sunku išskirti tiriamajame dažnių diapazone. Todėl dažniai nuskaitymi papildomai 500 – 5000 Hz diapazone. Gauti rezultatai apibendrinami ir pateikiami 4.7 paveiksle.



4.7 pav. Poslinkių amplitudės kūgio kampas 40° , dažnių nuskaitymo diapazonas 500 – 5000 Hz

4.7 paveiksle matome, kad būgnelio kūgio kampui esant 40° , didžiausios poslinkių amplitudės, 500 – 5000 Hz diapazone, atsiranda kai būgnelis žadinamas 4500 – 5000 Hz dažniu.



4.8 pav. Būgnelio savųjų virpesių forma (kairėje) ir forma atsirandanti kai būgnelis virpa tikruoju dažniu, būgnelio kūgio kampas 0°

4.8 paveiksle pateikiamos poslinkių pasiskirstymo formos turėtų sutapti tiek būgneliui virpant savųjų virpesių dažniu tiek žadinant jį tikruoju dažniu. Tačiau taip nėra, nors kai kurie rezultatai yra panašūs. Apibendrinant gautus rezultatus galima teigti, kad būgnelio poslinkiai atsirandantys prie tam tikrų dažnių priklauso nuo būgnelio kūgiškumo. Pastarajam didėjant poslinkiai atsiranda prie vis didesnių dažnių. Taip pat galima pastebėti, kad didinant būgnelio kūgio kampą atsirandantys poslinkiai mažėja nuo 167×10^{-15} m iki 7×10^{-15} m, būgnelio kūgio kampui didėjant nuo 0° iki 40° , atitinkamai. Galima daryti išvadą, kad būgnelis su didesniu kūgio kampu gali perduoti daugiau jėgos, patirdamas mažesnes deformacijas, į klausomuosius kauliukus, nei plokščias ausies būgnelis, ypač esant aukštiesiems dažniams.

Baigimojo darbo prieduose pateikiami programa COMSOL sugeneruoti grafikai, kuriais remiantis, šioje analizėje buvo sugeneruotos poslinkių amplitudžių kreivės.

4.3 Eksperimentinė būgnelio prototipų analizė

Ausies būgnelio prototipų eksperimentinis tyrimas atliekamas, prieš tai sudaryto skaitinio modelio tinkamumo pripažinimui. Holografinės interferometrijos metodas plačiai taikomas mechanikos, biologijos, automobilių pramonės, mikrosistemų inžinerijos ir kitose srityse. Lyginant su kitais eksperimentiniais metodais tai vienas iš informatyviausių metodų tiriant mechaninių sistemų paviršiaus deformacijas bei atliekant jų virpesių analizę. Holografinė interferometrija yra plačiai taikomas nekontaktinis virpesių tyrimo metodas, kai fiksuojami ne vieno paviršiaus taško, o viso paviršiaus virpesiai. Naudojant šį metodą galima užfiksuoti virpesius realiu laiku. Didelė skiriamoji geba leidžia stebėti formų pasikeitimus net ir tuo atveju kai deformacijos mažesnės nei 20 nm [21].

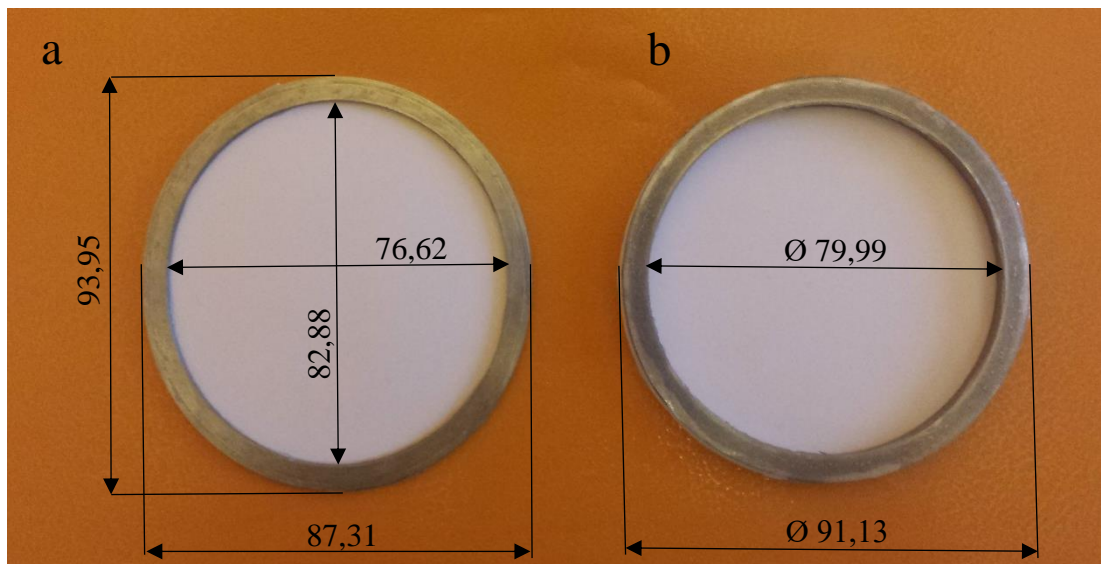
PRISM sistema matavimai ir rezultatų apdorojimas atliekami ypač dideliu greičiu, naudojant šią metodiką užtenka minimalaus bandinio paruošimo, nes tai bekontaktis metodas, kuriam pakanka tiesioginio matavimo. 4.4 lentelėje pateikiami pagrindiniai sistemos PRISM parametrai.

4.4 lentelė. PRISM sistemos parametrai

Matavimo jautrumas	<20 nm
Dinaminių matavimų riba	10 μ m
Matavimų riba	>100 μ m
Didžiausias matavimo plotas	\varnothing 1 m
Atstumas iki bandinio	>1/4 m (priklausomai nuo tiriamo objekto)
Duomenų nuskaitymo dažnis	30 Hz

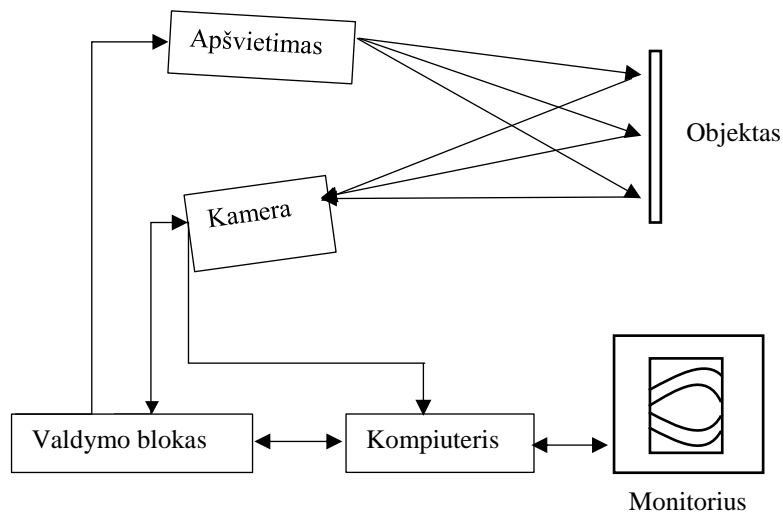
4.3.1 Prototipų savųjų virpesių formų tyrimas holografinės interferometrijos metodu

Siekiant išsiaiškinti, kokiems dažniams esant, randamos būdingos būgnelio prototipų savųjų virpesių formos, atliktas eksperimentinis tyrimas holografinės interferometrijos metodu. Tyrimui atlikti buvo pagaminti du ausies būgnelio prototipai, kai popieriaus lakštai priklijuojami ant skirtingos formos ir kitų geometrinių savybių plieninių profilių. Dėl ribotų tyrimo galimybių prototipų diametras didinamas apytiksliai 10 kartų, lyginant su žmogaus ausies būgnelio modeliais, kuriais remiantis buvo atlikta skaitinė analizė. Modelių vaizdas pateikiamas 4.9 paveiksle. Prototipų brėžiniai pateikiami baigiamojo darbo prieduose.

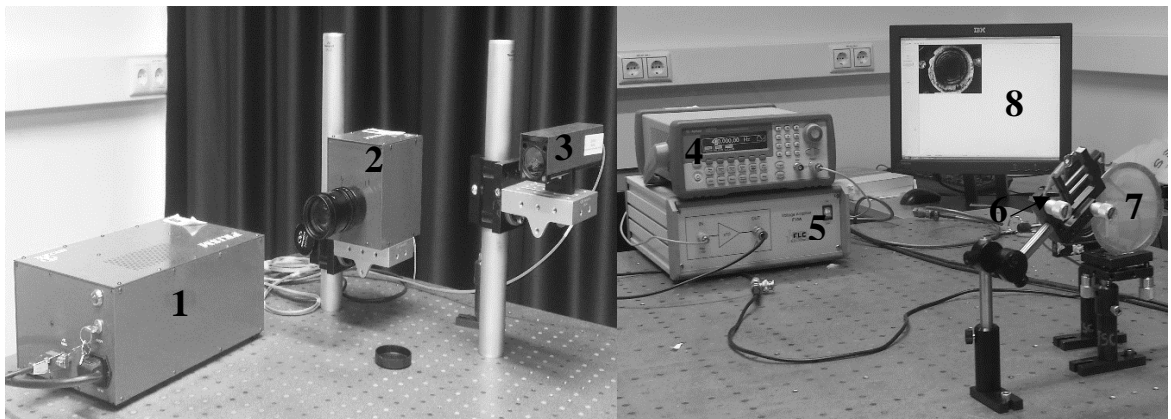


4.9 pav. Ausies būgnelio prototipai. a – ovalo formos prototipas, popieriaus lakšto storis 0,25 mm;
b – apskritimo formos prototipas, popieriaus lakšto storis 0,3 mm

Interferenciniam prototipų vaizdo sudarymui, naudojamas koherentinis šviesos šaltinis – lazeris. Dalis jo spindulio nukreipiama į tiriamąjį objektą (objektinis spindulys), o kita dalis (atraminis spindulys) patenka tiesiai į video kamerą. Objektinis spindulys iš valdymo bloko į lešių sistemą nukreipiamas šviesolaidžiu, kur yra išplečiamas ir nukreipiamas į tiriamą objektą. Kameroje atraminis spindulys interferuoja su registruojamu objektiniu spinduliu, kuris atsispindi nuo tiriamojo objekto. Kad būtų pasiektas didžiausias interferencinių juostų ryškumas, kameros ir valdymo bloko pagalba sureguliuojamas santykis tarp objektinio ir atraminio spindulių (santykis: 1:2,4). Tiriamojo objekto virpesių žadinimui naudojamas garsiakalbis 6 (MCI (8Ω, 8W), kuris tvirtinamas 0,06 m atstumu nuo tiriamojo objekto. Kintamos įtampos žadinimo signalas paduodamas iš generatoriaus 4, pastarasis 10 kartų sustiprinamas stiprintuvu 5. Interferencinio vaizdo sudarymui naudojamas puslaidininkis žalios spalvos lazeris 3 (20 mW, 532 nm). Matavimai atliekami keičiant signalo dažnį ir signalo įtampą. Dažnis keičiamas nuo 400 iki 4000 Hz, signalo įtampa keičiama nuo 80 mV iki 1500 mV.

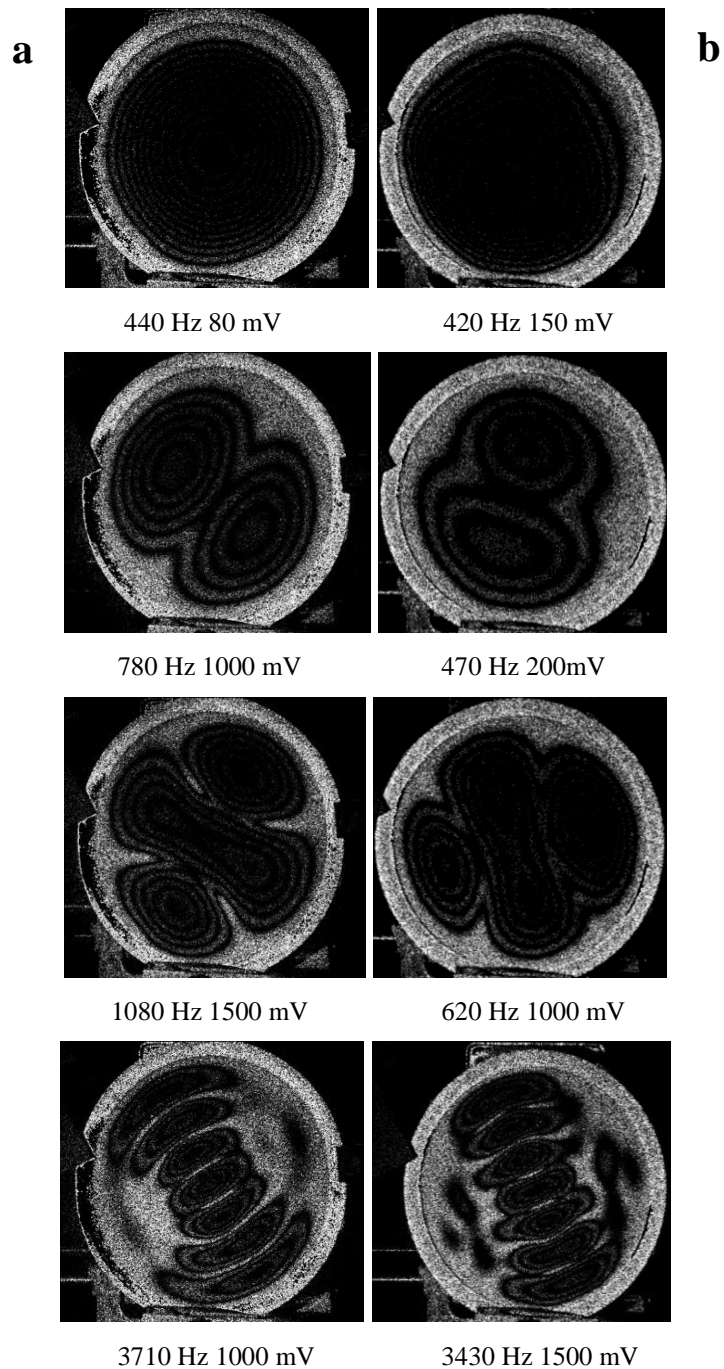


4.10 pav. Principinė hologramos matavimo schema [21]



4.11 pav. Hologramos fiksavimo įranga PRISM: 1 – valdymo blokas; 2 – kamera; 3 – objekcinio spindulio šaltinis; 4 – signalų generotivus; 5 – stiprintuvas; 6 – garsiakalbis; 7 – objektas (ausies būgnelio prototipas); 8 – monitorius.

4.10 ir 4.11 paveiksluose pateikiama principinė hologramos matavimo schema ir hologramos fiksavimo įrangos PRISM schema, atitinkamai. Matavimų jautrumas priklauso nuo lazerio bangos ilgio ir kampo, kuriuo krinta objekcinis spindulys ir koku kampu jis stebimas. Mažinant kampą tarp matuojamo paviršiaus normalės ir objekcinio spindulio, matavimų jautrumas didėja. Naudojant programą PRISMA – DAQ apdorojamas iš kameros atkeliavęs interferencinis vaizdas ir kompiuterio ekrane galime matyti būgnelio prototipų savųjų virpesių formas realiu laiku. Užfiksuotos prototipų halogramos pateikiamos 4.12 paveikle.



4.12 pav. Prototipų hologramos gautos naudojant halogramos fiksavimo įrangą PRISM.

a – ovalo formos prototipo savųjų virpesių formos ir dažnis; b – apskritimo formos prototipo savųjų virpesių formos ir dažnis

4.12 paveiksle a pateikiamos ovalo formos prototipo hologramos, gautos žadinant 80 mV 440 Hz, 1000 mV 780 Hz, 1500 mV 1080 Hz, 1000 mV 1090 Hz, 1500 mV 1130 Hz ir 1000 mV 3710 Hz signalu; b – apskritimo formos prototipo hologramos, gautos naudojant PRISM sistemą, žadinant 150 mV 420 Hz, 200 mV 470 Hz, 1000mV 620 Hz ir 1500 mV 3430 Hz signalu.

Hologramose stebimos virpesių formos kinta priklausomai nuo garso signalo dažnio ir įtampos. Juostos matomos hologramoje yra pastovios virpesių amplitudės kontūrai, o šviesios zonos rodo paviršių, kuris nevirpa. Iš 4.12 paveikle pateiktų halogramų, matome, kad ovalo formos prototipo savųjų virpesių formų sužaditimui reikalingas aukštesnio dažnio signalas, negu apskritimo formos prototipo būdingų savųjų virpesių formų sužaditimui. Tačiau atsirandančios būdingos formos tarpusavyje yra panašios, nepriklausomai nuo prototipo formos ir popieriaus lakšto storio.

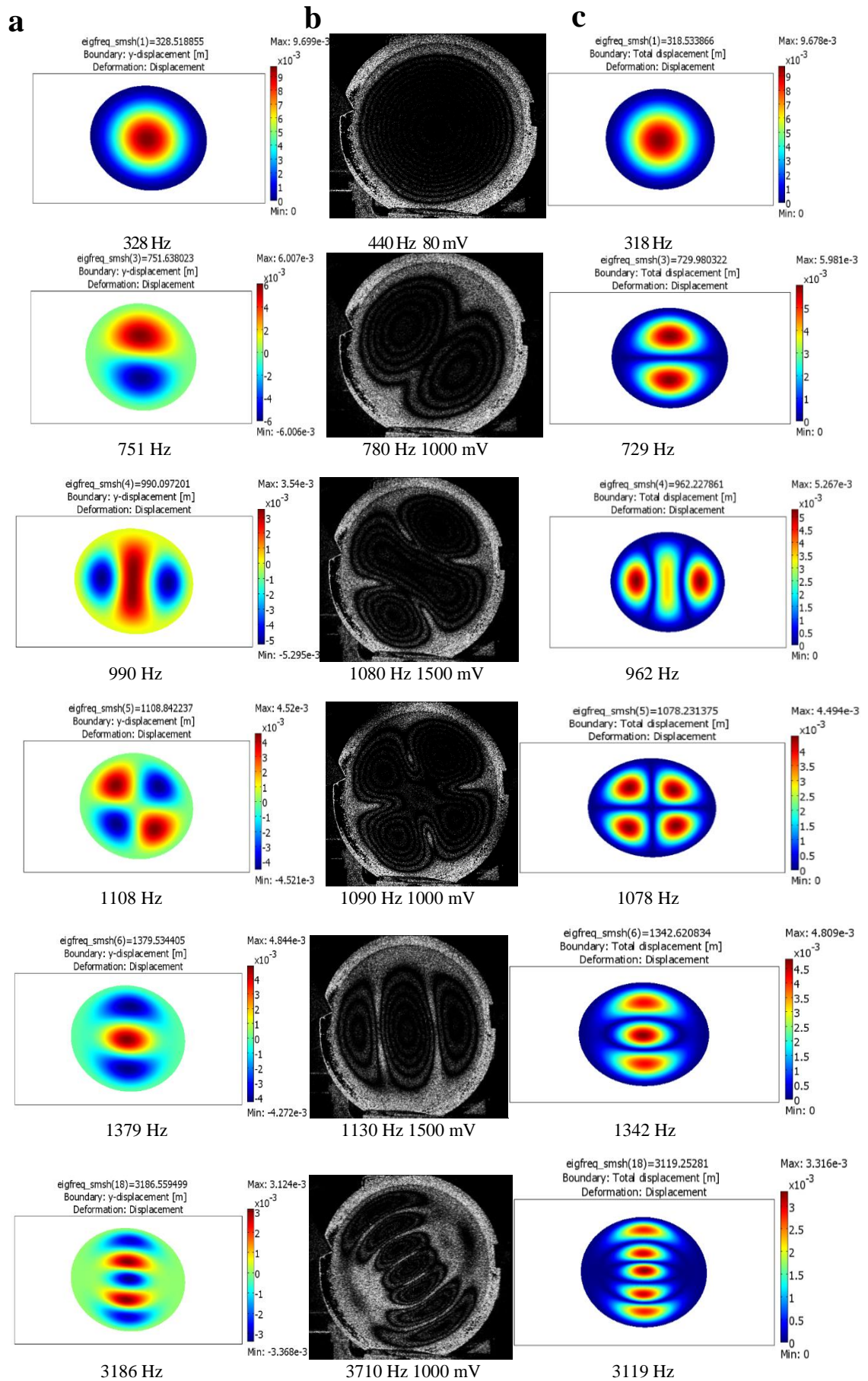
4.3.2 Žmogaus ausies būgnelio skaitinio modelio koregavimas pagal prototipo parametrus

Labai svarbus yra būgnelio skaitinių modelių tikslumas. Taip pat svarbu, kad žmogaus balso dažnių diapazone būtų kuo daugiau savųjų virpesių formų, kad būtų užtikrinamas sklandus garso perdavimas, sukeliant kuo mažesnius būgnelio poslinkius. Todėl buvo atlikti būgnelio virpesių skaitiniai ir eksperimentiniai tyrimai. BE modelis, kuriuo remiantis buvo atlikta skaitinė žmogaus ausies būgnelio, savųjų virpesių formų ir dažnių analizė, koreguojamas pagal sudaryto ovalaus prototipo medžiagos savybes. Siekiant išsiaiškinti, kaip skiriasi savųjų virpesių formos ir dažnis, priklausomai nuo medžiagos storio, tankio ir Jungo modulio, pastarieji, naudojant BE modelių šabloną koreguojami, nekeičiant diametro.

4.5 lentelė Ovalaus prototipo ir žmogaus ausies būgnelio skaitinės analizės parametrai

Prototipo forma	Storis, mm	Tankis, kg/m ³	Jungo modulis, MPa
Ovalus prototipas	0,25	800	200
Žmogaus ausies būgnelis	0,1	1200	20

Yra žinoma, kad popieriaus Jungo modulis yra 200 MPa [22]. Analizės parametrai pateikiami 4.5 lentelėje. Žmogaus ausies būgnelio skaitinės ir prototipų eksperimentinės bei skaitinės analizės rezultatai lyginami tarpusavyje. Gauti rezultatai pateikiami 4.13 paveiksle.



4.13 pav. Savųjų virpesių formos ir dažnis. a – žmogaus ausies būgnelio BE modelio; b – ovalaus prototipo; c – BE modelio, keičiant medžiagos savybes pagal ovalaus prototipo parametrus

4.3.3 Rezultatai ir jų aptarimas

Atlikus būgnelio savųjų virpesių skaitinę analizę nustatoma dažnio vertė, kuriuo virpėdamas, skirtingo kūgiškumo ir medžiagos savybių, būgnelis įgyja būdingas savųjų virpesių formas. Rezultatai, kaip priklauso būgnelio savųjų virpesių dažnis nuo būgnelio kūgiškumo ir Jungo modulio pateikiami 4.2 lentelėje. Atlikus žmogaus būgnelio dažnių skaitinę analizę nustatyta būgnelio virpesių ir judesių tarpusavio sąveika. Žmogaus balso dažnių diapazone nustatyti dažniai prie kurių atsiranda didžiausios būgnelio poslinkių amplitudės. Rezultatai pateikiami 4.6 ir 4.7 paveiksluose.

Atliktas būgnelio prototipų virpesių savųjų formų ir jų susidarymo sąlygų eksperimentinis tyrimas holografinės interferometrijos metodu. Gauti rezultatai lyginami su skaitinės analizės rezultatais ir pateikiami 4.13 paveiksle, iš pastarajame pateiktų rezultatų matome, kad iš interferogramų gauti rezultatai dalinai atitinka tiek žmogaus ausies būgnelio skaitinės analizės tiek pagal prototipo savybes koreguoto ausies būgnelio skaitinės analizės rezultatus. Bendras skirtumas tarp skaitiniais ir eksperimentiniais metodais nustatyto žmogaus ausies būgnelio BE modelio ir ovalaus prototipo, savųjų virpesių dažnio yra 12,55 %. Kai lyginamas pagal prototipo parametrus koreguoto BE modelio skaitinės analizės metu nustatytas virpesių dažnis su eksperimento metu nustatyto savųjų virpesių dažniu, bendras skirtumas gaunamas 13,45 %. Rezultatai pateikiami 4.6 lentelėje. Šie skirtumai gali atsirasti dėl daugelio priežasčių, viena iš jų gali būti skirtingas būgnelio diametras atliekant skaitinę ir eksperimentinę prototipo analizę. Atsižvelgiant į tai reikėtų patobulinti skaitinius BE modelius, kurie labiau atitiktų realų fizinių būgnelių.

Įvertinant eksperimentus su ausies prototipu galima numatyti tolimesnių tyrimų eigą t.y. panaudojant kitą eksperimentinę techniką 3D skenuojantį lazerinį doplerinį vibrometrą Polytec PSV-500-3D-HV. Kurio lazerio spindulio pozicionavimo tikslumas didesnis nei $0,0002^\circ$; mažesnis nei $\pm 0,05$ mm esant objektui nutolusiam 1 m atstumu, todėl naudojant šią techniką galima tirti ypač mažus objektus. Taip būtų galima sukurti ausies būgnelio prototipus, atitinkančius realų žmogaus ausies būgnelio dydį.

4.6 lentelė. Skirtumas tarp eksperimentinio virpesių dažnio ir skaitinės analizės metu nustatyto virpesių dažnio, %

Savųjų virpesių forma	Skaitinis / eksperimentinis savųjų virpesių dažnis	
	Žmogaus ausies būgnelio BE modelio/ ovalaus prototipo	Pagal prototipo parametrus koreguotas BE modelio/ ovalaus prototipo
Pirma	25,45	27,7
Antra	3,71	6,5
Trečia	8,33	10,9
Ketvirta	1,65	1,1
Penkta	22,04	18,8
Šešta	14,12	15,9
Vidurkis	12,55	13,48

Išvados

- Atlikus būgnelio savųjų virpesių skaitinę analizę nustatytos būdingos savųjų virpesių formos. Nustatyta, kad didinant būgnelio kūgio kampą nuo 0° iki 40° , o Jungo modulį nuo 20 iki 40 MPa būgnelio savųjų virpesių dažnis didėja.
- Atlikus būgnelio dažnių skaitinę analizę, žmogaus balso dažnių diapazone nuo 500 Hz iki 3000 Hz, išsiaiškinta, kad kai būgnelio kūgio kampas 0° , didžiausios poslinkių amplitudės atsiranda būgneliui virpant 500 Hz dažniu, kai 10° 1800 Hz – 1900 Hz diapazone. Toliau didėjant būgnelio kūgio kampui poslinkių amplitudės aiškiai ima mažėti ir fiksuojamos aukštesnių dažnių diapazone, pasiekus 20° kampą didžiausia poslinkių amplitudė fiksuojama prie 2900 Hz dažnio, kai 30° prie 2500 Hz.
- Įvairios geometrijos ir skirtingų medžiagų savybių skaitinių modelių ir prototipo skaitinės bei eksperimentinės analizės metu, nustatytos virpesių formos, vertinant vizualiai, tarpusavyje yra panašios. Nustatytas virpesių dažnis apskaičiavus skiriasi vidutiniškai apie 13 %, nepriklausomai nuo medžiagos storio, tankio, Jungo modulio. Taigi galima teigti, kad sudarytas BE modelis yra tinkamas skaitinės analizės atlikimui.

IŠVADOS

1. Egzistuojančių ausies būgnelio tyrimų apžvalga parodė, kad yra daug skirtingų ausies būgnelio baigtinių elementų modelių, kurie skiriasi geometrija, elementų bei tinklelių tipais, ribinėmis elementų suvaržymo sąlygomis ir medžiagų savybėmis. Remiantis literatūros duomenimis, aprašytos esminės baigtinių elementų modelio charakteristikos: storis, Jungo modulis, tankis, Puasono santykis.
2. SolidWorks programine įranga sudaryti skirtingų kūgiškumų nuo 0° iki 40° , sveikos ausies būgnelio modelių šablonai be storio bei Comsol Multiphysics 3.5a programine įranga sudaryti skirtingų geometrijų ir medžiagų savybių ausies būgnelio skaitiniai baigtinių elementų modeliai.
3. Atlikus ausies būgnelio savųjų virpesių skaitinę analizę, nustatytos būdingos ausies būgnelio savųjų virpesių formos ir dažniai. Nustatyta, kad didinant būgnelio kūgio kampą nuo 0° iki 40° , o Jungo modulį nuo 20 iki 40 MPa būgnelio savųjų virpesių dažnis didėja.
4. Atlikus ausies būgnelio dažnių skaitinę analizę, nustatyta, kad , žmogaus balso dažnių diapazone nuo 500 Hz iki 3000 Hz, didžiausios poslinkių amplitudės, atsiranda kai būgnelio kūgio kampas 0° . Pastarajam didėjant poslinkiai atsiranda prie vis didesnių dažnių. Poslinkiai mažėja nuo 167×10^{-15} m iki 7×10^{-15} m, būgnelio kūgio kampui didėjant nuo 0° iki 40° , atitinkamai.
5. Sudaryti skirtingų formų ausies būgnelio prototipai ir atliktas eksperimentinis holografinės interferometrijos tyrimas, kurio metu nustatytos prototipų būdingos savųjų virpesių formos ir dažniai. Eksperimentų metu naudojant ovalo formos prototipą gauta, kad lyginant su skaitiniais tyrimais savųjų virpesių dažnis skiriasi vidutiniškai 13 %, taigi galima teigti, kad sudarytas žmogaus ausies būgnelio BE modelis yra tinkamas skaitinei analizei atlikti.

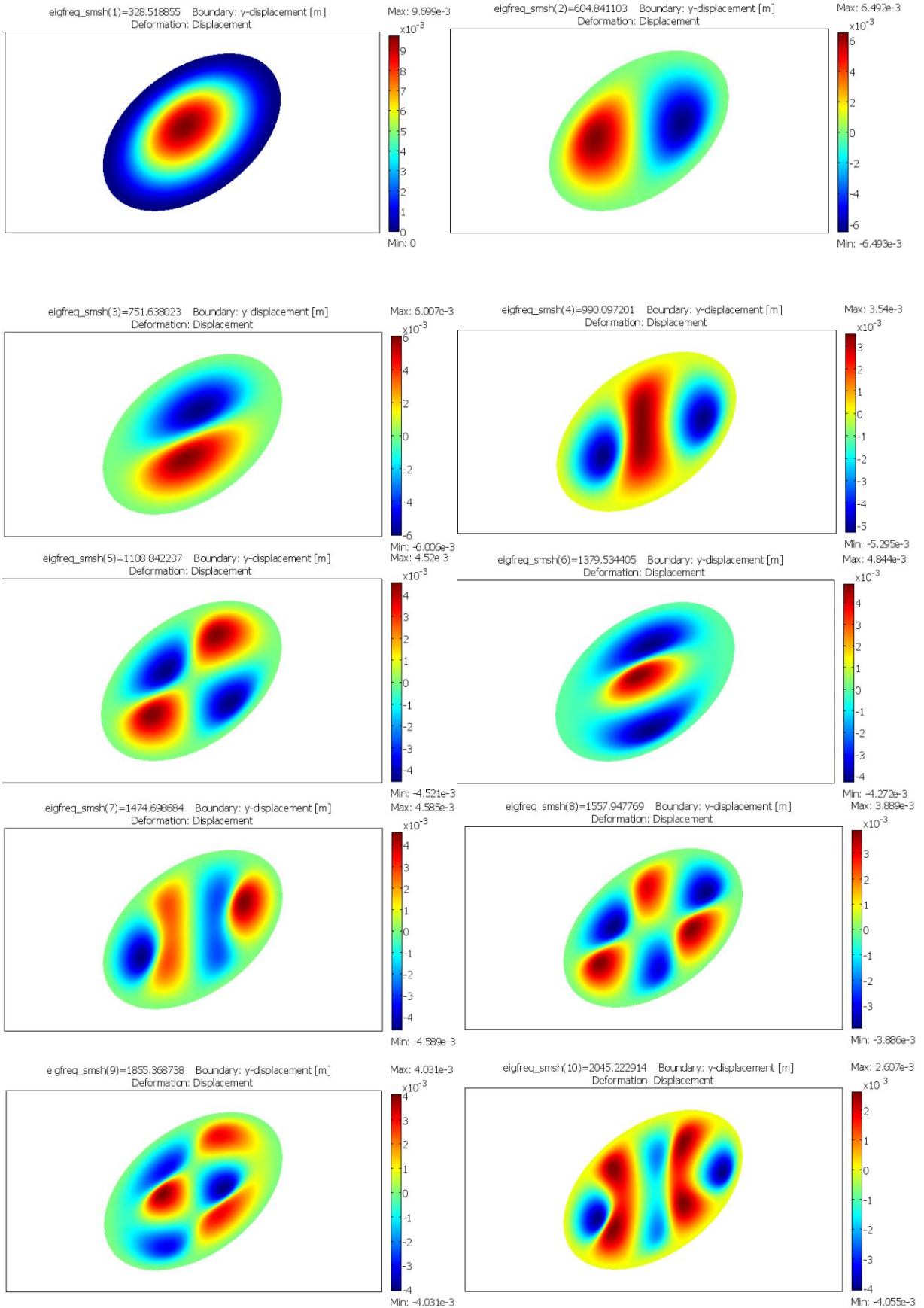
LITERATŪROS SĄRAŠAS

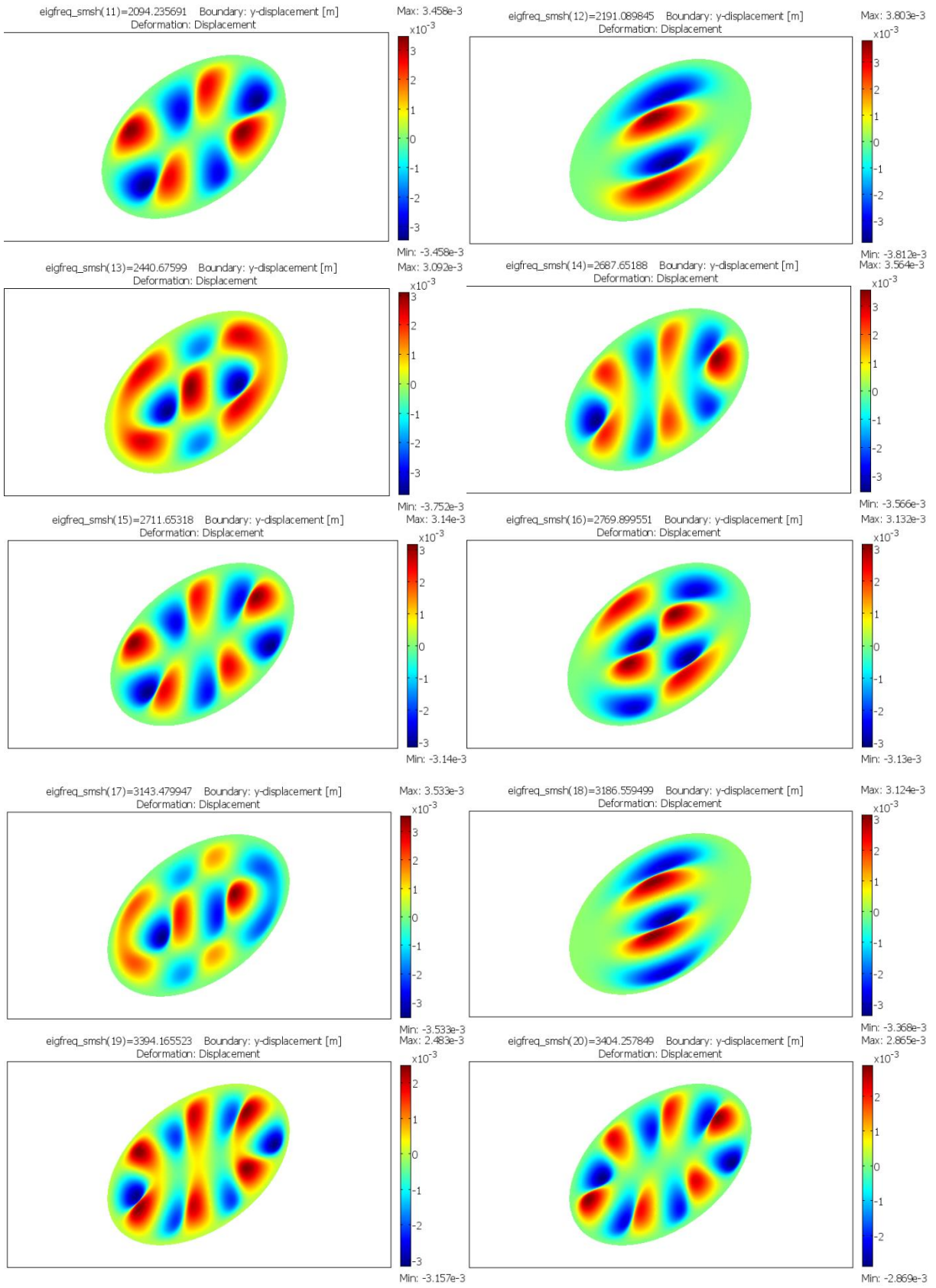
1. **Shou-I Chen, Ming-Hsiao Lee, Chih-Min Yao et.all.** 2013. Modeling sound transmission of human middle ear and its clinical applications using finite element analysis, *Kaohsiung Journal of Medical Sciences* (2013) 29, 133e139.
2. **Gentil, F.; Parente, M.; Martins, P.** et.all. 2016. Effects of the fiber distribution in the human eardrum: A biomechanical study, *Journal of Biomechanics*, 49: 1518 – 1523.
3. **Allardyce, B.J., Rajkhowa, R., Dilley, R.J., Xie, Z., Campbell, L., Keating, A., Atlas, M.D., von Unge, M., and Wang, X.** (2016). Comparative acoustic performance and mechanical properties of silk membranes for the repair of chronic tympanic membrane perforations. *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.* 64, 65–74.
4. **Mendoza, F; Munoz, S; Perez, C.**et. all. 2015. Surface strain – field determination of tympanic membrane usind 3D – digital holographic interferometry, *Journal of Optics and Lasers in Engineering*, 71: 42 – 50.
5. **Gylienė, V., Janušas, G., Gylys, G., Nivault, Q.A.B.** 2016. Numerical analysis of the Tympanic Membrane Vibrations. *Kaunas Mechanika*. ISSN 1392 – 1207.
6. **Burkhardt, A.; Kirsten, L.; Bornitz, M.; Zahnert, T.; Koch, E.** 2013. Vibration of the human tympanic membrane measured with OCT in a range between 0.4 kHz and 6.4 kHz on an ex vivo sample, *Proc. SPIE 8805, Head and Neck Optical Diagnostics*, 880507 (June 24, 2013). [http://dx. doi:10.1117/12.2032549](http://dx.doi.org/10.1117/12.2032549)
7. **Fernandez, M; Lopez – Escamez, J.** 2015. Outlook for tissue engineering of tympanic membrane, *Audiologyresearch*, Volume 5: 117, <http://dx.doi.org/10.4081/audiores.2015.117>
8. **Hayes, S; Dind, D; Salvi, R; Allman, B.** 2013. Anatomy and physiology of the external, middle and inner ear, *Handbook of Clinical Neurophysiology*, Volume 10, Pages 3 – 23 <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-7020-5310-8.00001-6>.
9. **Branswyck, J.; Martin, R.; Gylienė, V.; Gylys, G.** 2013. Introduction to hearing study, *Conf. -12- Jun-iors Researchers: 2013, Electronic Source*, ktu: 4.
10. **Kėvelaitis E, M. Illert, Hultborn H.** 2006. *Žmogaus fiziologija*, Vadovėlis, KMU leidykla, Kaunas. ISBN978 – 9955 – 15 – 091 – 6.
11. **Stropus R, N. Paužienė, Vaičekauskas V.** 2008. *Žmogaus anatomija 2*, Vadovėlis, KMU leidykla, Kaunas, pp – 378 – 382. ISBN978 – 9955 – 15 – 099 – 2.
12. **Nitin P. Daphalapurkara,Chenkai Daib, Rong Z. Gan.** 2009. Characterization of the linearly viscoelastic behavior of human tympanic membrane by nanoindentation. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*. Pages 82 – 92.

13. **Dumčius A.** 2010. Garso inžinerija, Mokomoji knyga, Kaunas Technologija. ISBN978 – 9955 – 25 – 788 – 2.
14. **Van der Jeught, S., Dirckx, J.J.J., Aerts, J.R.M., Bradu, A., Podoleanu, A.G., and Buytaert, J.A.N.** (2013). Full-Field Thickness Distribution of Human Tympanic Membrane Obtained with Optical Coherence Tomography. *JARO J. Assoc. Res. Otolaryngol.* *14*, 483–494.
15. **Zhao, F., Koike, T., Wang, J., Sienz, H., and Meredith, R.** (2009). Finite element analysis of the middle ear transfer functions and related pathologies. *Med. Eng. Phys.* *31*, 907–916.
16. **Volandri, G.; Di Puccio, F.; Forte, P.; Carmignani, C.** 2011. Biomechanics of the tympanic membrane, *Journal of Biomechanics*, *44*(7):1219–1236. <http://dx.doi:10.1016/j.jbiomech.2010.12.02>
17. **P. Ferris, P.J. Prendergast.** 2000. Middle-ear dynamics before and after ossicular replacement. *Journal of Biomechanics* *33* (2000) 581 – 590.
18. **Hernández-Montes, M. del S., Mendoza Santoyo, F., Pérez López, C., Muñoz Solís, S., and Esquivel, J.** (2011). Digital holographic interferometry applied to the study of tympanic membrane displacements. *Opt. Lasers Eng.* *49*, 698–702.
19. **Lukys A.** 2008. Medijų pagrindai, Studijų vadovas audiovizualaus meno studentams, Vilniaus dailės akademija. ISBN 978 – 9955 – 755 – 96 – 8.
20. **Gentil, F., Natal Jorge, Ferreira, A., Moreira M., Almeida E.** 2005. Biomechanical study of middle ear. VIII International Conference on Computational Plasticity.
21. **Sadauskas E.** 2015. Detalių tarpusavio centravimas naudojant tampriuosius virpesius. Daktaro disertacija. Kaunas Technologija.
22. **J. Borch, M. B. Lyne, R. E. Mark, C.C. Habeger,** Handbook of Physical Testing of Paper Volume 2, Revised and Expanded, CRC Press, 2002

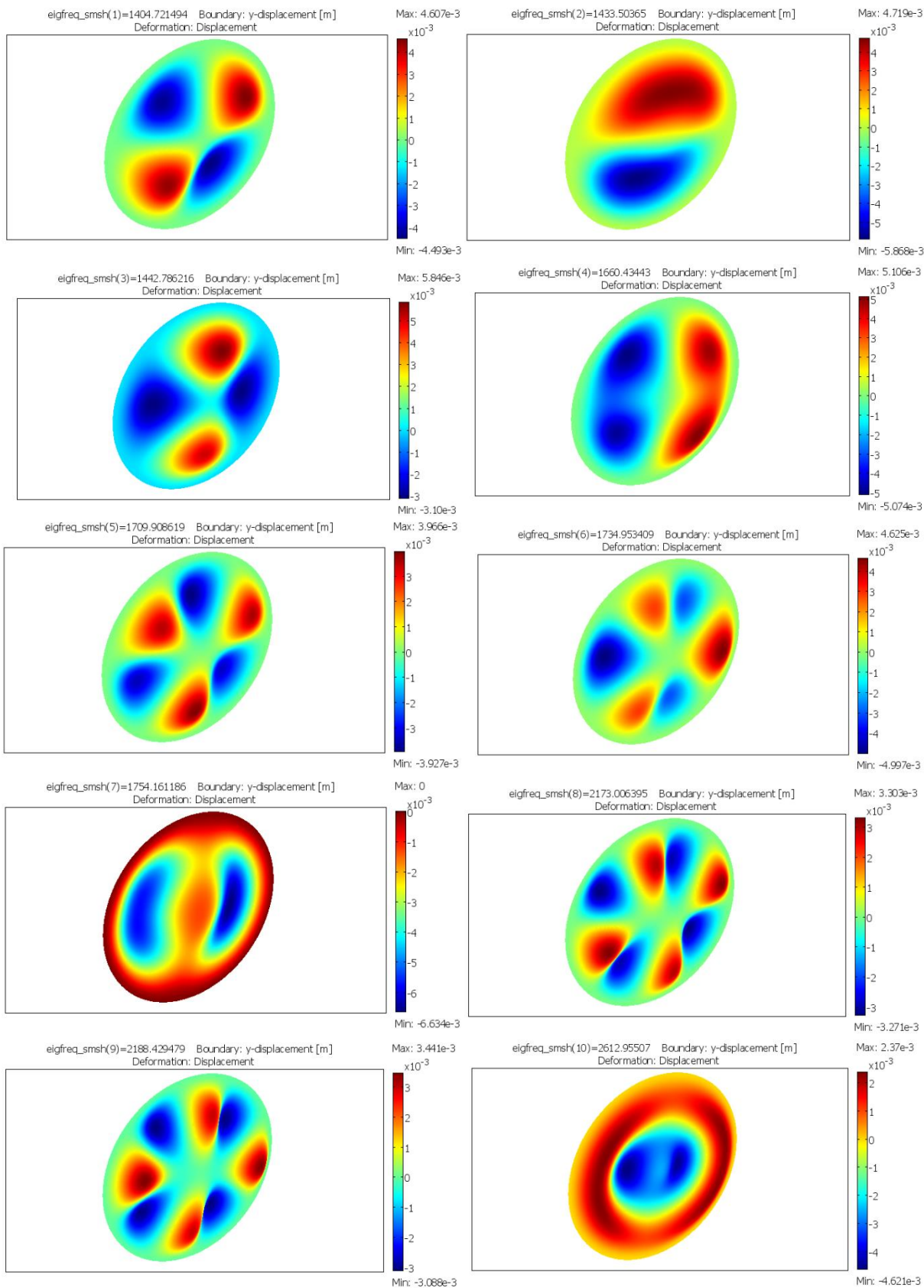
PRIEDAI

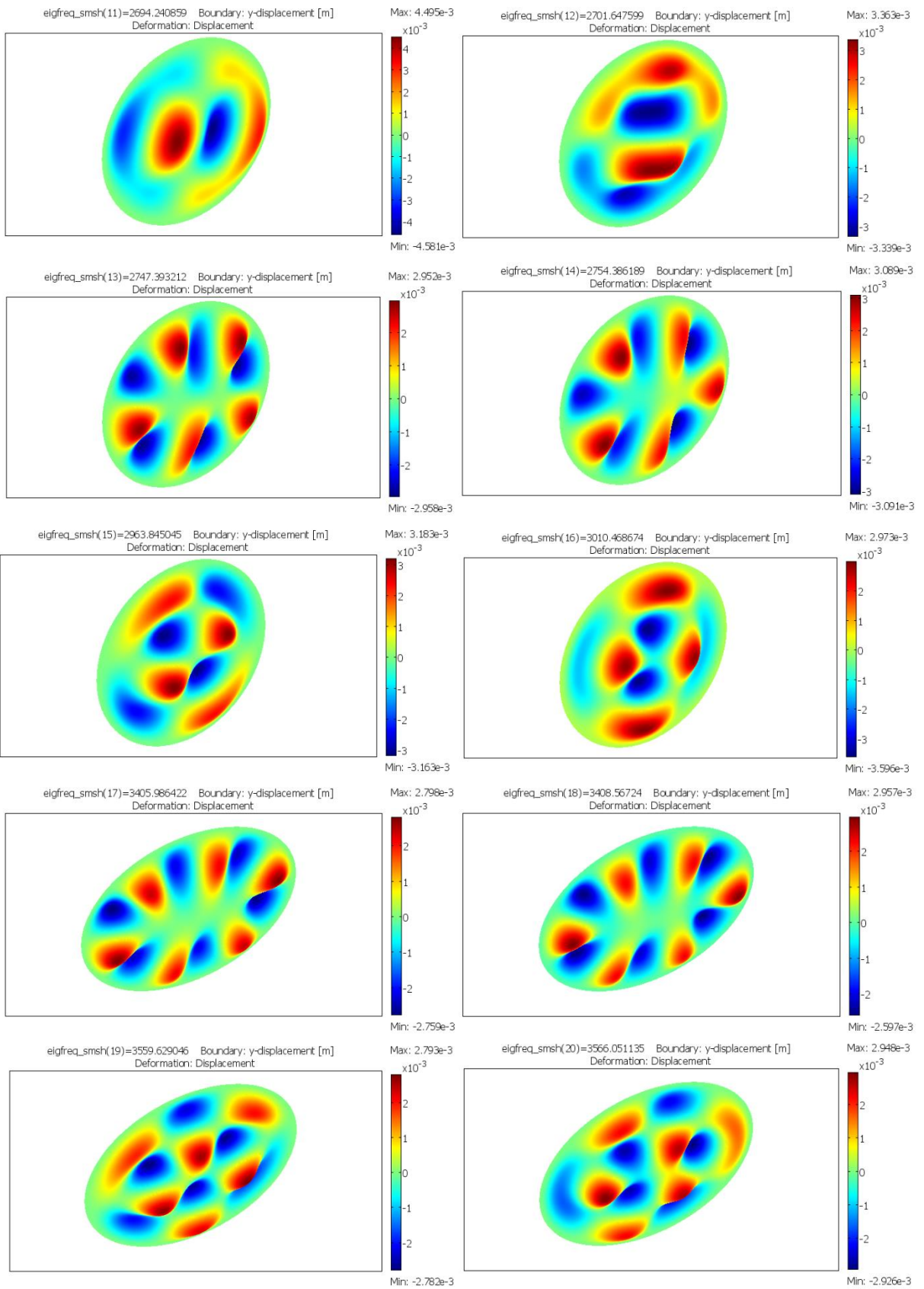
Savųjų virpesių formos, kai kūgio kampas 0° , Jungo modulis 20 MPa



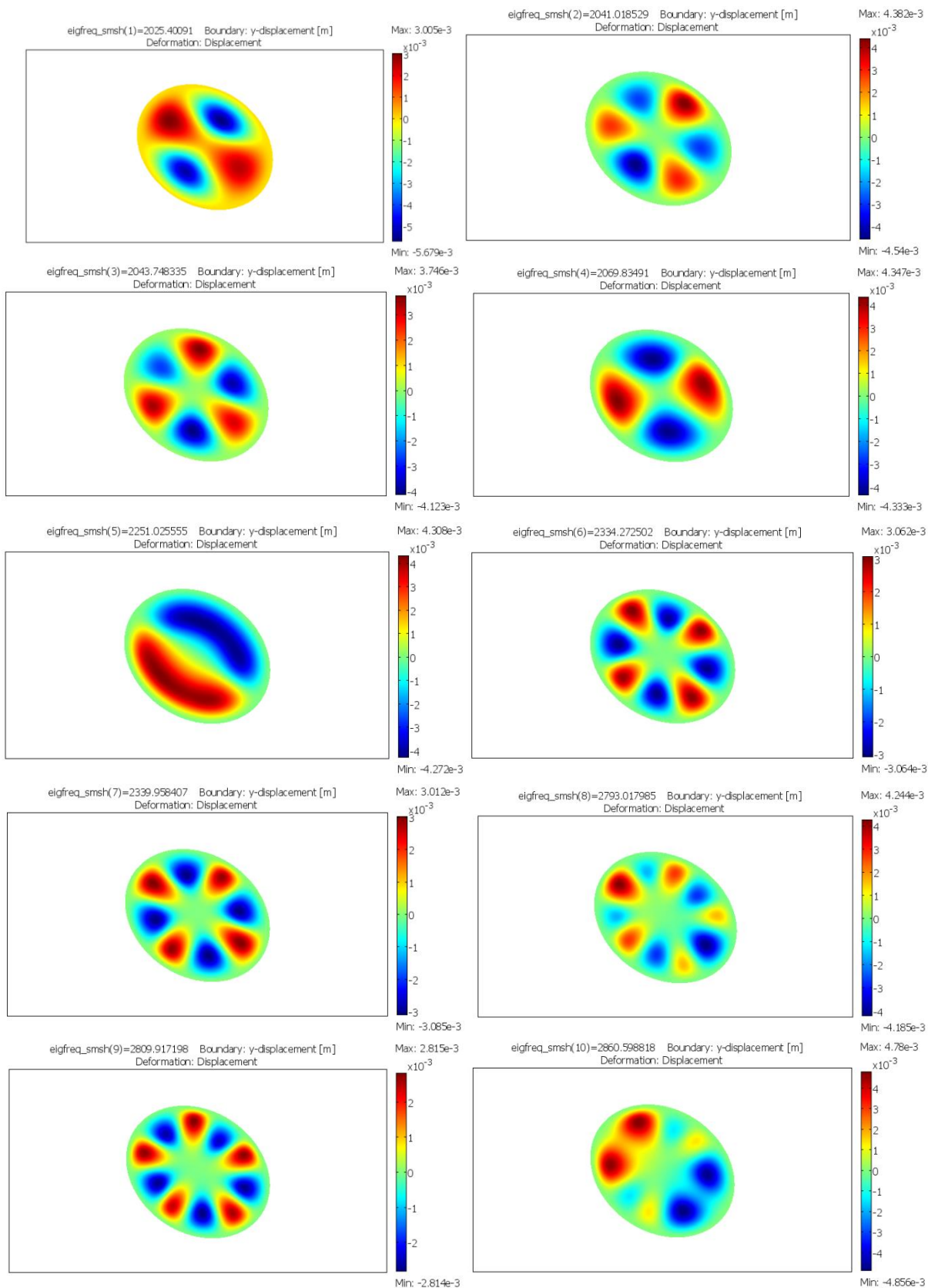


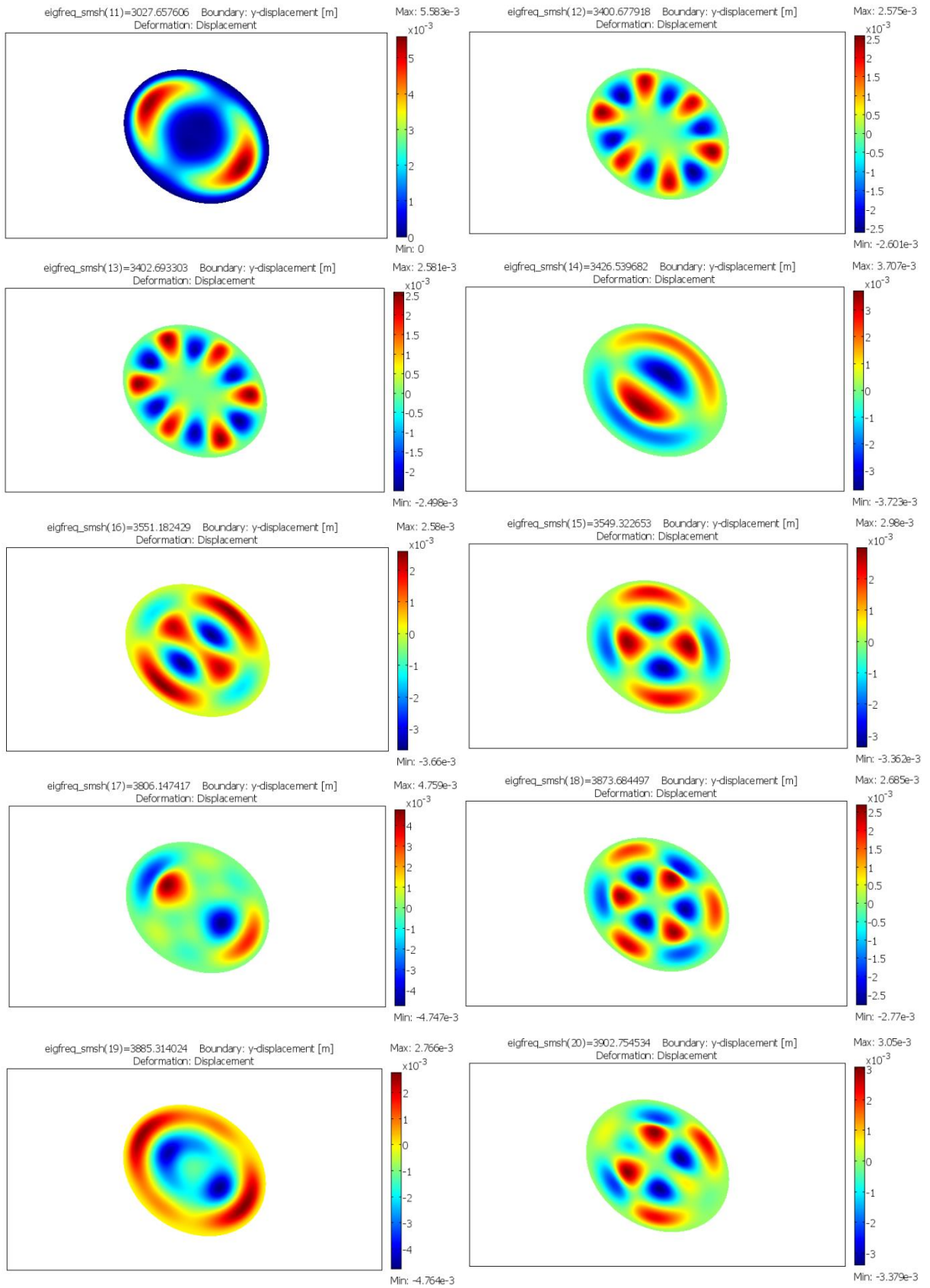
Savųjų virpesių formos, kai kūgio kampas 10°, Jungo modulis 20 MPa



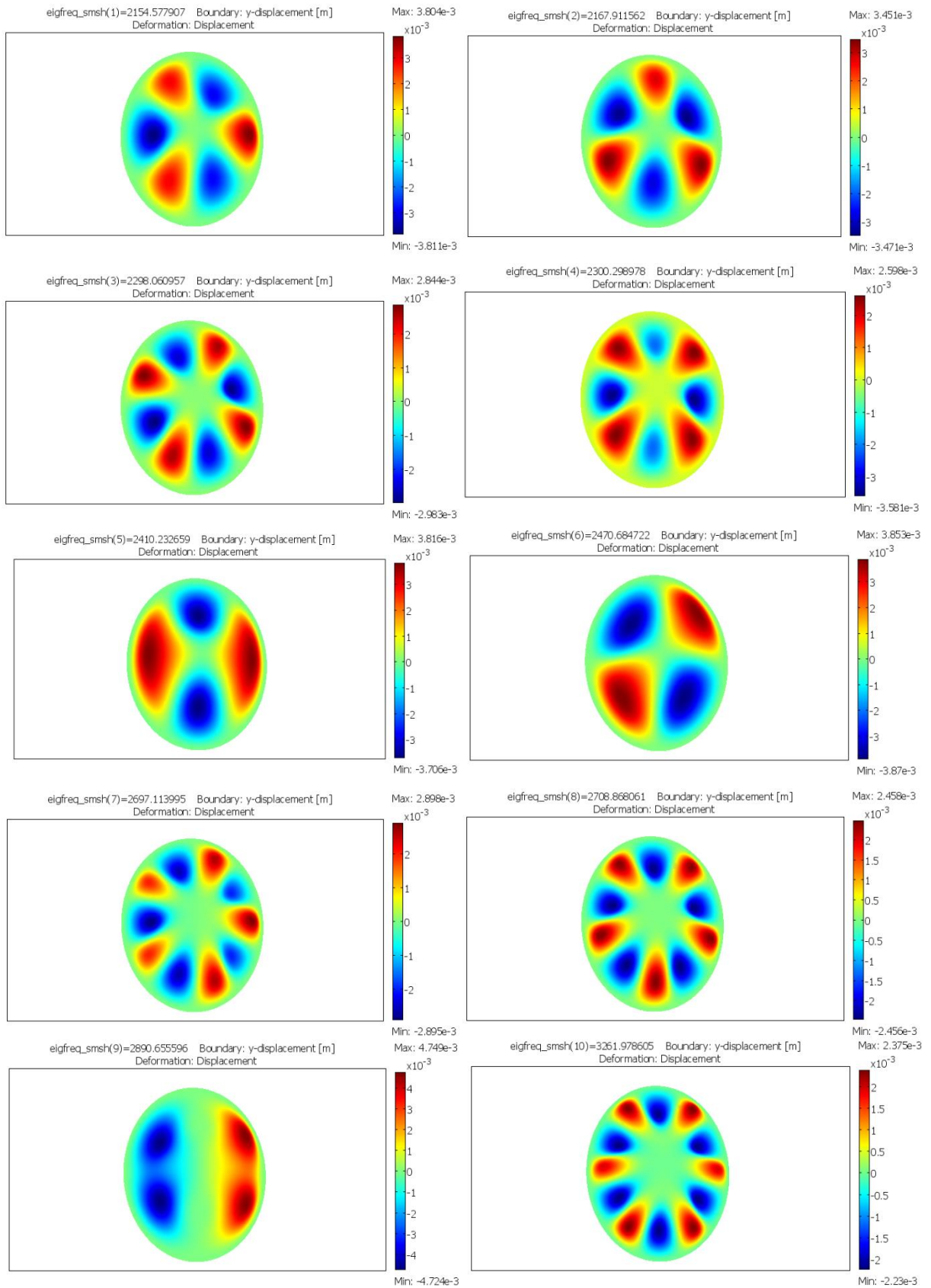


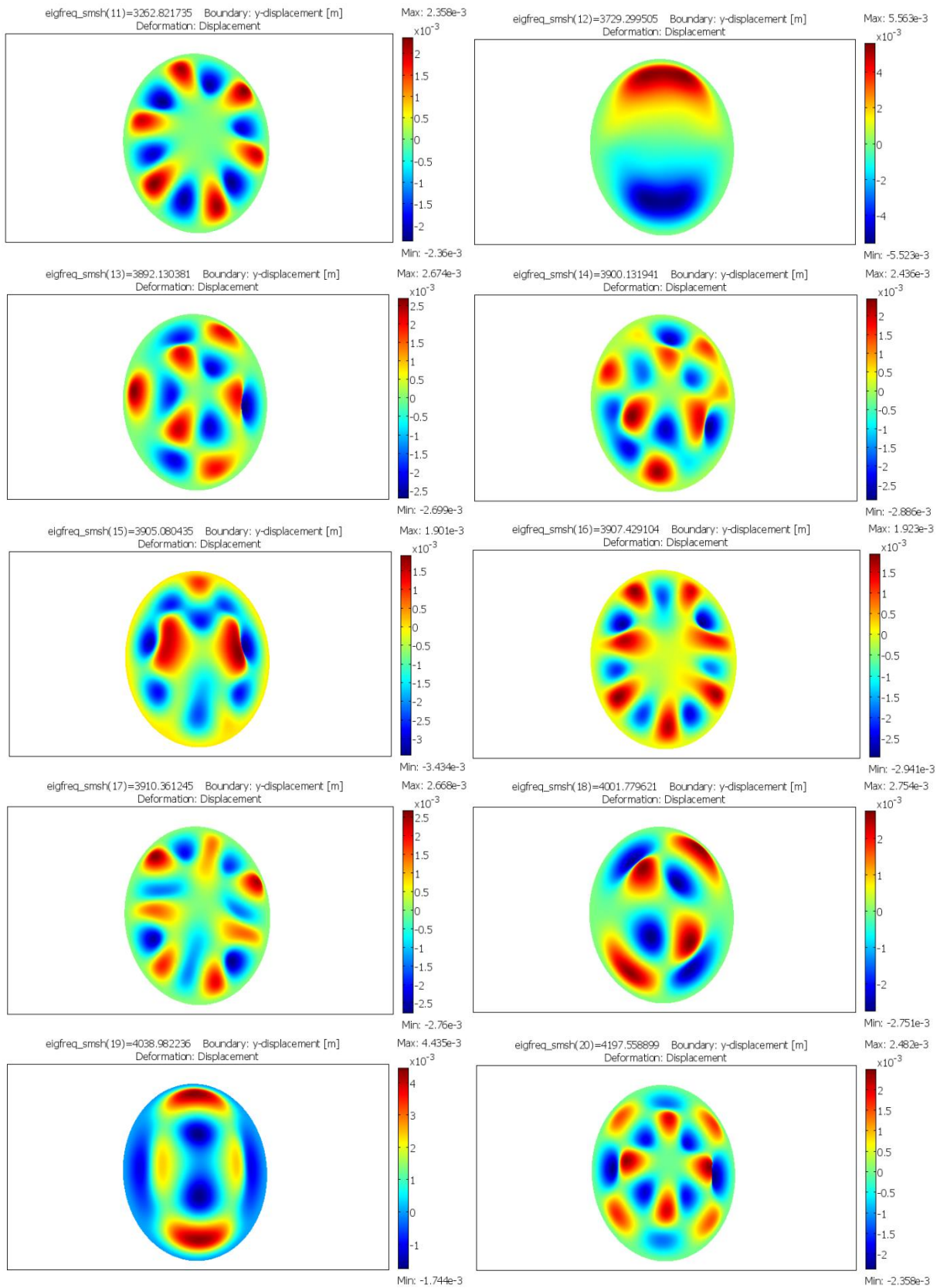
Savųjų virpesių formos, kai kūgio kampas 20°, Jungo modulis 20 MPa



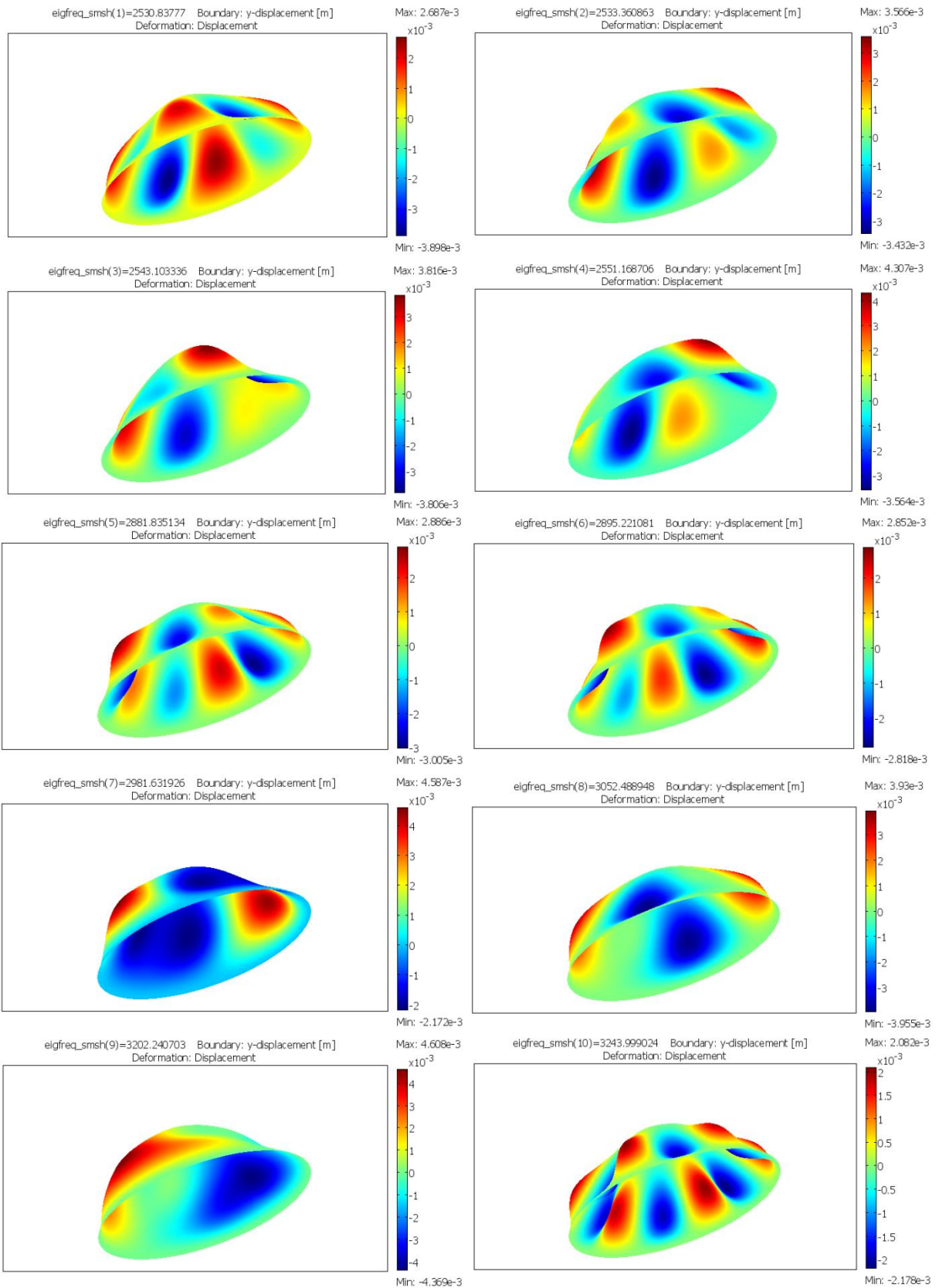


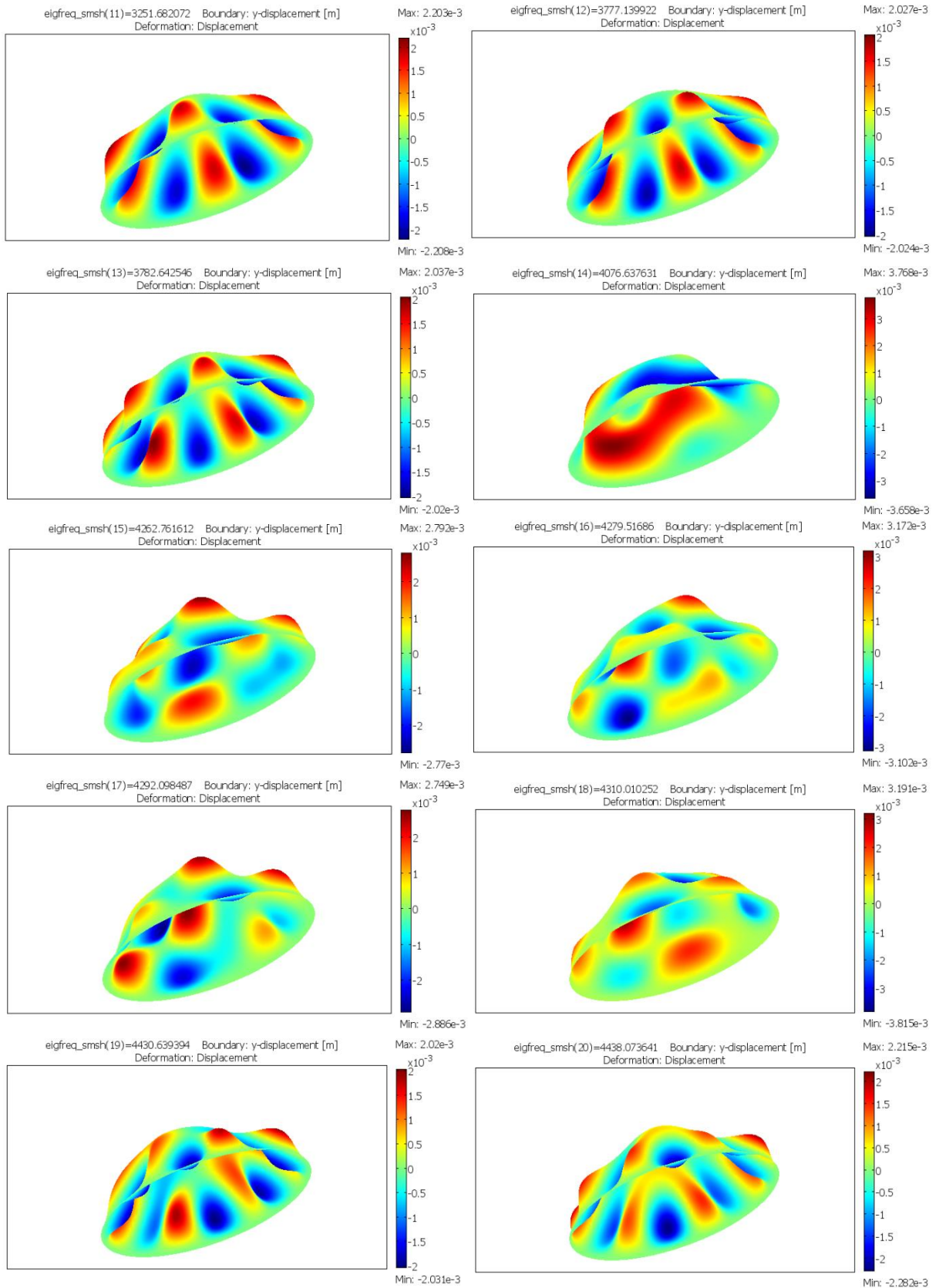
Savųjų virpesių formos, kai kūgio kampas 30°, Jungo modulis 20 MPa

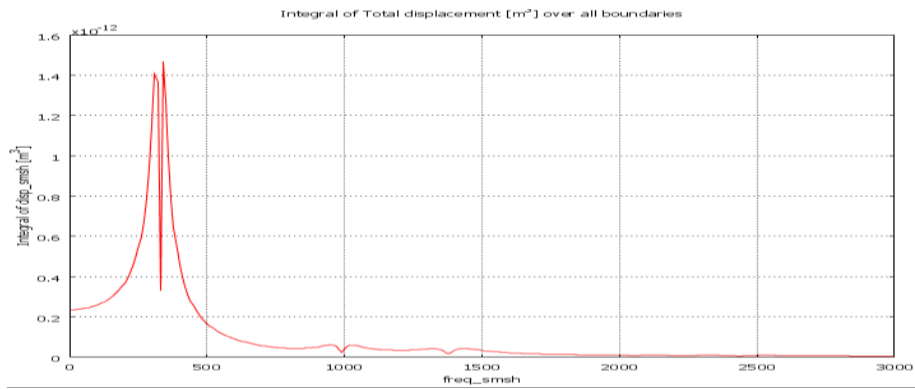




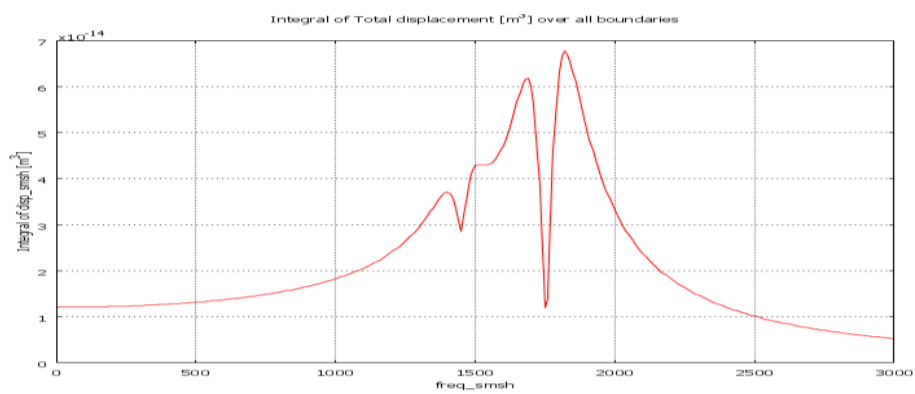
Savųjų virpesių formos, kai kūgio kampas 40°, Jungo modulis 20 MPa



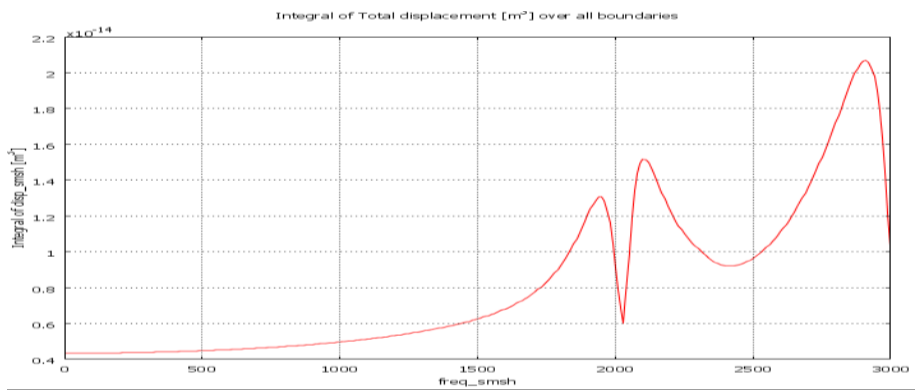




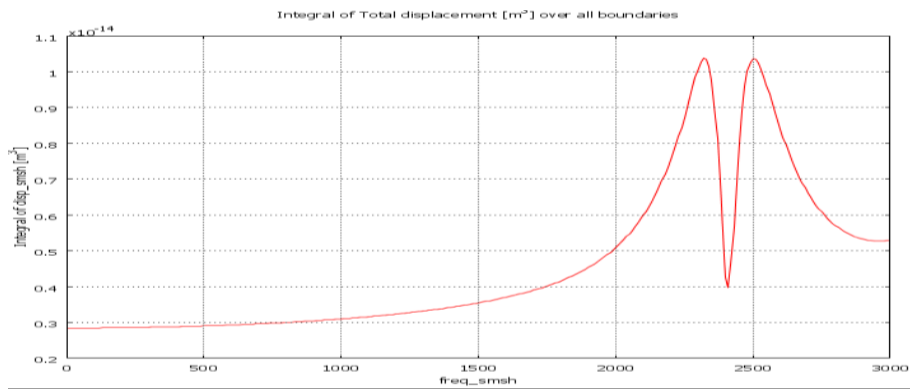
Paveikslas. Poslinkių amplitudės, būgnelio kūgio kampas 0°



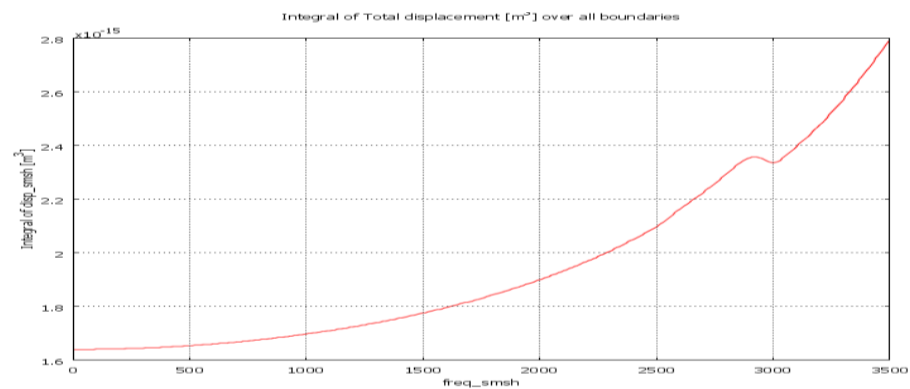
Paveikslas. Poslinkių amplitudės, būgnelio kūgio kampas 10°



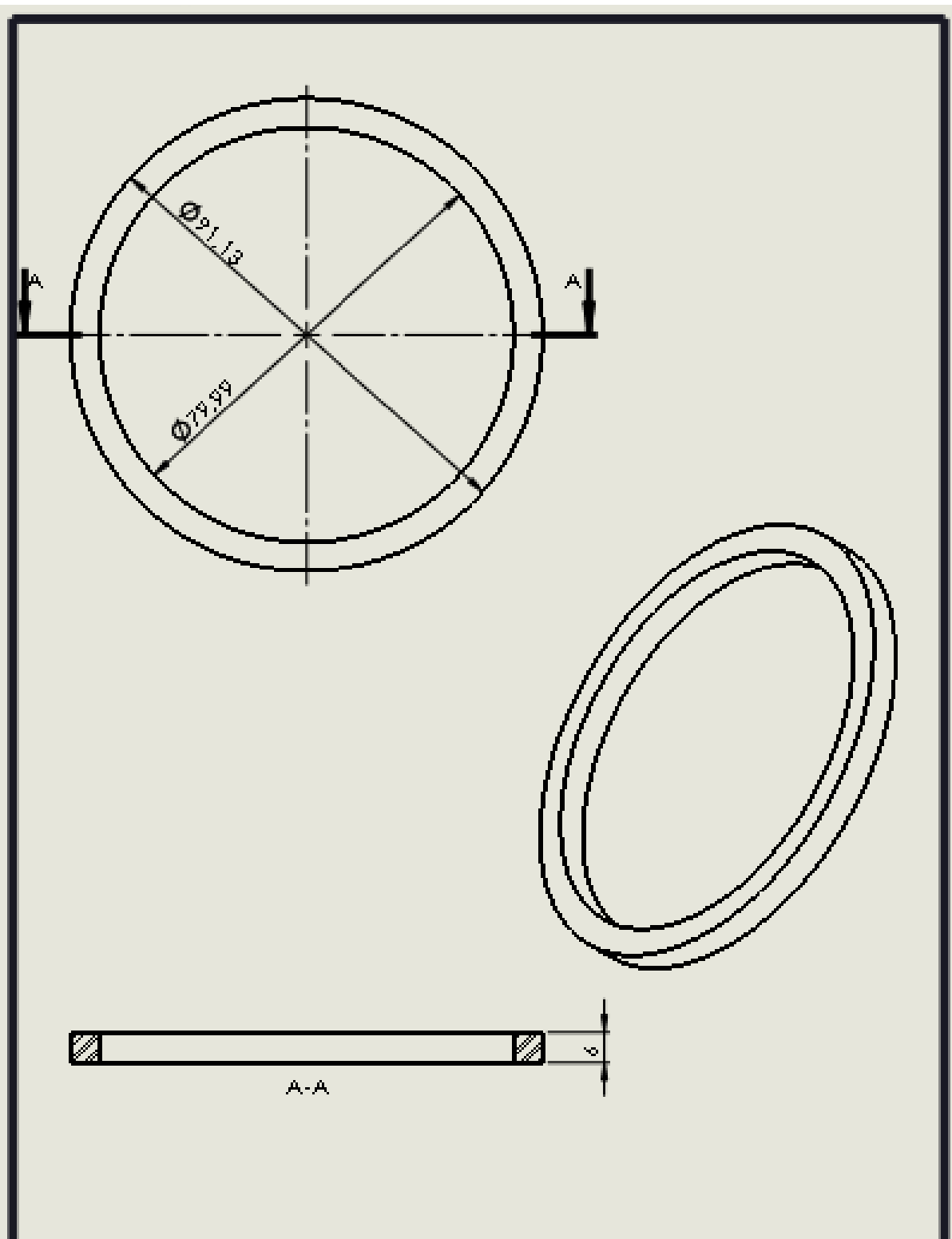
Paveikslas. Poslinkių amplitudės, būgnelio kūgio kampas 20°



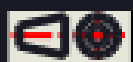
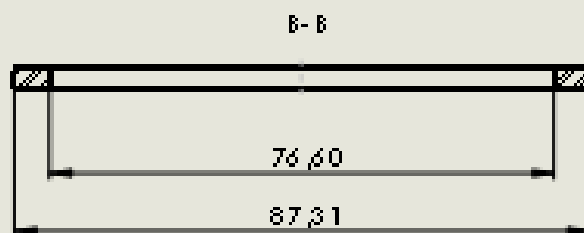
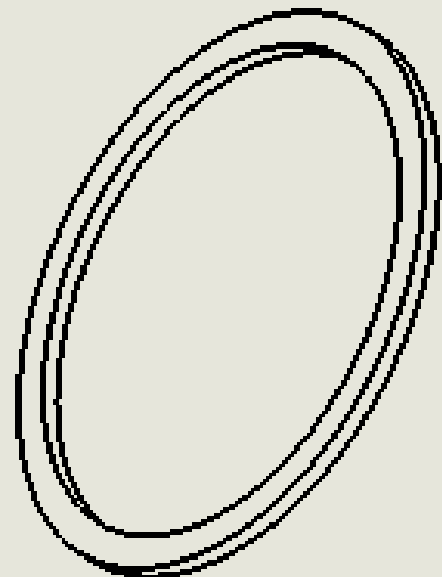
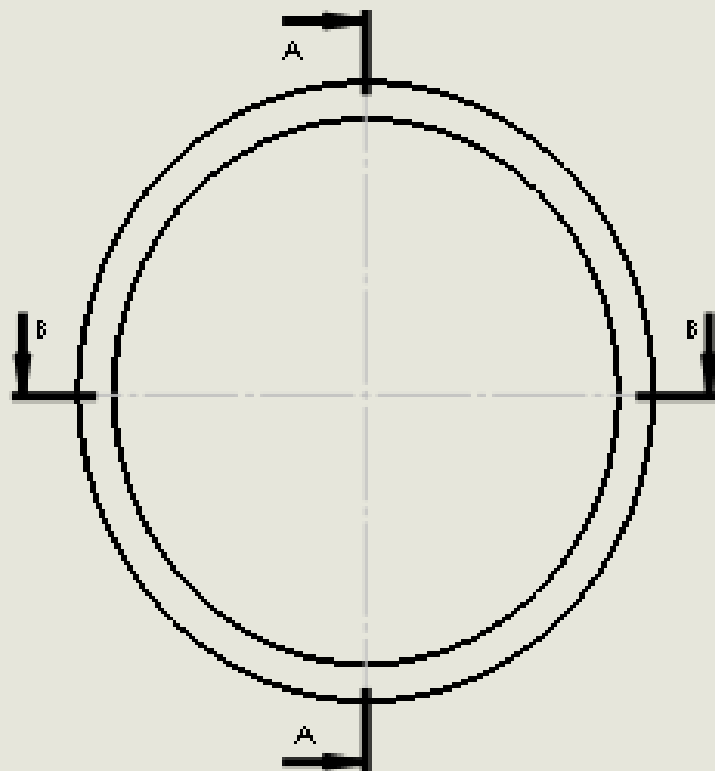
Paveikslas. Poslinkių amplitudės, būgnelio kūgio kampas 30°



Paveikslas. Poslinkių amplitudės, būgnelio kūgio kampas 40°



		Skaļdarbavīrs Skaļdarbavīrs	Papildīga informācija Papildīga informācija	Materiāls <i>Pliens</i>	Mēroks <i>M 1:1</i>
Atzīmējuma brīvis IPK	Varoņs Varoņs	Dokumenta tips <i>Detalēs brēžinys</i>	Dokumenta statuss		
Savienības KTU	Rengis <i>Sandra Liornačaitė</i>	Atbilst <i>Ap skatīmas rēmelis</i>	Īstums		
	Pārbauda <i>Virginija Gyfene</i>		Lappus A	Datums <i>2017-01-04</i>	Kārta IT
				Lapas 1/1	



Székelykeresztúr

Példatárca Információja

Munkatípus

Méret

Pfenns

N 1:1

Műszaki rajz típusa

IPK

Név

Dokumentum típusa

Detailed drawing

Dokumentum státusza

Szervezet

KTU

Rajz

Sándor Lőrincz

Anyag

Qualis rémélis

Leírás

Leírás

Dátum

2017-01-04

Leírás

É

Lap az

1/1