



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Μοντελοποίηση τυμπανικής κοιλότητας μέσου ωτός
με χρήση Μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

Έλληνα Νικόλαου

Καθηγητής: Διονύσιος-Δημήτριος Κουτσούρης

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Επιβλέπων: Παναγιώτης Κατρακάζας

Υπ. Διδάκτωρ Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**Μοντελοποίηση τυμπανικής κοιλότητας μέσου ωτός
με χρήση Μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

Έλληνα Νικόλαου

Καθηγητής: Διονύσιος-Δημήτριος Κουτσούρης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Επιβλέπων: Παναγιώτης Κατρακάζας
Υπ. Διδάκτωρ Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή:

.....
Κουτσούρης Δ.
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Μπίμπας Αθ.
Επίκουρος Καθηγητής Παν. Αθηνών

.....
Ματσόπουλος Γ.
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2016

.....
Έλληνας Νικόλαος
Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Η/Υ Ε.Μ.Π.

Copyright © Νικόλαος Ι. Έλληνας, 2016.
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Η μελέτη του ανθρώπινου ωτός είναι ένας πολύ σημαντικός κλάδος της ιατρικής επιστήμης. Το αυτί συνδέεται με κάποιες από τις σημαντικότερες λειτουργίες του ανθρώπινου οργανισμού, δηλαδή την ακοή και την ισορροπία. Η δομή του είναι περίπλοκη, καθώς απαρτίζεται από μικρά και σύνθετα στοιχεία, με αποτέλεσμα να είναι δύσκολη η εξαγωγή τρισδιάστατων μαθηματικών μοντέλων για την περιγραφή τους. Με τη βοήθεια του Η/Υ και την πρόοδο των λογισμικών τρισδιάστατης απεικόνισης και μαθηματικής προσομοίωσης, βελτιώνονται συνεχώς οι προσπάθειες για τη μοντελοποίηση της λειτουργίας του ανθρώπινου ωτός και τη μελέτη των παθολογιών του.

Στα πλαίσια αυτής της εργασίας, η κύρια περιοχή ενδιαφέροντος είναι η κοιλότητα του μέσου ωτός. Αρχικά, αναλύεται η ανατομία και η φυσιολογία του ανθρώπινου ωτός, όπως και οι μηχανικές ιδιότητές του. Στη συνέχεια γίνεται αναφορά στη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων για το μέσο αυτί, στις παλαιότερες έρευνες που την εφαρμόζουν και στις σημαντικότερες παραμέτρους που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την εφαρμογή της.

Το βασικό κομμάτι της εργασίας περιέχει την κατασκευή ενός τρισδιάστατου μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων της κοιλότητας του μέσου ωτός, χρησιμοποιώντας ως αναφορά ένα ακριβές μοντέλο των εσωτερικών στοιχείων της. Έπειτα, γίνεται απλοποίηση των σύνθετων αυτών στοιχείων και προκύπτει ένα μοντέλο το οποίο μπορεί να χρησιμεύσει στη μελέτη σημαντικών παθολογιών του μέσου ωτός. Ως παράδειγμα, μελετάται η διάσπαση της οσταριακής αλυσίδας και η αποκατάστασή της με τεχνητή πρόθεση. Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αυτής της προσομοίωσης και μέσω της αξιολόγησής τους προκύπτει το περιθώριο βελτίωσης του μοντέλου.

Λέξεις Κλειδιά

Μέσο αυτί, Κοιλότητα του μέσου ωτός, Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων, Διάσπαση οσταριακής αλυσίδας, Τεχνητή πρόθεση, Λογισμικό προσομοίωσης

Abstract

The studying of the human middle ear is a very important branch of medical science. The ear is associated with some of the most remarkable functions of the human body, like hearing and balance. It has a complicated structure, as it is composed of small and complex parts and as a result, the extraction of three dimensional mathematical models for their description is a difficult task. The advance in computers and three dimensional modeling software, continuously improves the efforts for the human ear modeling and the studying of its pathologies.

In this diploma thesis, the main area of interest is the middle ear cavity. Initially, we cover the anatomy, physiology and the mechanics of the middle ear. Then, we analyze the Finite Element Method for the human middle ear and also refer to older studies that apply it, as well as the most important parameters which must be considered when performing such studies.

The main part of the thesis contains the construction of a three dimensional finite element model of the human middle ear cavity, based on an accurate model of its inside components. After the construction, we perform a simplification of these complex components and a final model is conducted, which can be utilized in studying the most important pathologies of the middle ear. As an example, we simulate the ossicular chain disruption and its replacement with an artificial prosthesis. In the end, we present the results of this simulation and from their assessment we evaluate the margin of improvement of the model.

Key Words

Middle ear, Middle ear cavity, Finite element method, ossicular chain disruption, Prosthesis, Simulation software

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στον τομέα Συστημάτων Μετάδοσης Πληροφορίας και Τεχνολογίας Υλικών της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Δημήτριο Κουτσούρη για την ανάθεση ενός τόσο ενδιαφέροντος και σύγχρονου θέματος και για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή της Ιατρικής σχολής του Πανεπιστημίου Αθηνών κ. Αθανάσιο Μπίμπα για τις πολύτιμες συμβουλές του, τις εύστοχες παρατηρήσεις του και τη συνεχή υποστήριξή του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

Θα ήθελα επίσης, να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα του Ε.Μ.Π. Παναγιώτη Κατρακάζα για την υπομονή του, την άμεση ανταπόκριση σε όλες τις απορίες μου και τη σημαντική συμβολή του στη διόρθωση του τελικού κειμένου.

Τέλος, θα ήθελα φυσικά να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την πολύτιμη στήριξη και βοήθεια που μου παρείχαν σε όλα τα χρόνια της φοίτησής μου.

Περιεχόμενα

1 Το ανθρώπινο σύστημα ακοής	17
1.1 Βασική ανατομία του ανθρώπινου αυτιού	17
1.1.1 Εξωτερικό τμήμα	17
1.1.2 Μέσο τμήμα	18
1.1.3 Εσωτερικό τμήμα	22
1.2 Η κοιλότητα του μέσου ωτός	25
1.2.1 Βασική ανατομία	25
1.2.2 Τα τοιχώματα της κοιλότητας	26
1.3 Φυσιολογία του ανθρώπινου αυτιού	28
1.3.1 Σύστημα τυμπάνου - ακουστικών οσταρίων	28
1.3.2 Κοχλίας	29
1.3.3 Όργανο του Corti	30
1.3.4 Η αίθουσα	31
1.4 Μηχανική του ωτός	32
1.4.1 Ακουστική εμπέδηση	32
1.4.2 Η λειτουργία του ενεργειακού μετασχηματιστή	34
1.4.3 Απώλειες στο κέρδος του μετασχηματιστή	37
2 Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων στο μέσο αυτί	39
2.1 Εισαγωγή	39
2.2 Προηγούμενες μελέτες με τη Μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων	39
2.2.1 Για το μέσο αυτί γενικότερα	39
2.2.2 Για την κοιλότητα του μέσου ωτός	41
2.3 Παράμετροι για τη Μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων του μέσου ωτός	43
2.3.1 Γεωμετρικές παράμετροι	43
2.3.2 Μηχανικές ιδιότητες	44
2.3.3 Απόσβεση και οριακές συνθήκες	46
2.3.4 Μη γραμμικές παράμετροι	46
3 Μοντελοποίηση της κοιλότητας του μέσου ωτός και παθολογίες της	49
3.1 Εισαγωγή	49
3.2 Τα σημαντικότερα τμήματα της κοιλότητας	49
3.3 Μηχανικές ιδιότητες των συστατικών του μέσου ωτός	50
3.3.1 Ελαστικότητα	50
3.3.2 Λόγος Poisson	50
3.3.3 Πυκνότητα	51
3.3.4 Σταθερά ελατηρίου	51
3.3.5 Όριο συμπίεστικότητας	51
3.3.6 Μέτρο ελαστικότητας σε διάτμηση	51

3.4	Εφαρμογή των μηχανικών ιδιοτήτων σε Μοντέλο Πεπερασμένων Στοιχείων	52
3.5	Παθολογίες του μέσου ωτός	53
3.5.1	Ωτοσκλήρυνση	53
3.5.2	Τυμpanοσκλήρυνση	54
3.5.3	Καθήλωση της κεφαλής της σφύρας	54
3.5.4	Διάτρηση τυμpanικού υμένα	54
3.5.5	Εκκριτική ωτίτιδα	55
3.5.6	Διακοπή οσταριακής αλυσίδας με ακέραια τυμpanική μεμβράνη	56
4	Το γεωμετρικό μοντέλο της κοιλότητας του μέσου ωτός	57
4.1	Εισαγωγή	57
4.2	Υπάρχον μοντέλο	57
4.2.1	Δημιουργία και χαρακτηριστικά	57
4.2.2	Προσθήκες	58
4.3	Ανάγκη για κατασκευή της κοιλότητας	59
4.4	Σημεία αναφοράς για την κοιλότητα του μέσου ωτός	59
4.4.1	Οριακές συνθήκες	59
4.4.2	Όγκος	62
4.5	Κατασκευή του μοντέλου	62
4.5.1	Πρώτη προσπάθεια κατασκευής	63
4.5.2	Δεύτερη προσπάθεια κατασκευής	68
4.5.3	Τρίτη προσπάθεια κατασκευής	72
4.6	Μια χρήσιμη προσθήκη	76
5	Το απλοποιημένο μοντέλο για τη μελέτη τεχνητής πρόθεσης τύπου TORP	79
5.1	Εισαγωγή	79
5.2	Κατασκευή απλοποιημένου μοντέλου	80
5.2.1	Απλοποίηση της γεωμετρίας	80
5.2.2	Κατασκευή TORP	81
5.2.3	Τελικές προσθήκες	82
5.3	Μεταφορά της γεωμετρίας	84
5.3.1	Εξαγωγή γεωμετρίας από το Solidworks	84
5.3.2	Εισαγωγή γεωμετρίας στο ANSYS	84
5.4	Απόδοση ιδιοτήτων στα σώματα	84
5.5	Μηχανική ανάλυση	85
5.5.1	Προετοιμασία μοντέλου για την προσομοίωση	85
5.5.2	Αποτελέσματα προσομοίωσης	87

6	Αποτελέσματα και συμπεράσματα	91
6.1	Σύγκριση παραμόρφωσης	91
6.2	Σύγκριση αποχρίσεων συχνότητας	91
6.2.1	Απόκριση πλάτους τυμπανικού υμένα	91
6.2.2	Απόκριση φάσης τυμπανικού υμένα	92
6.2.3	Απόκριση πλάτους βάσης αναβολέα	93
6.2.4	Απόκριση φάσης βάσης αναβολέα	94
6.3	Περαιτέρω βελτίωση - έρευνα	95

Κατάλογος σχημάτων

1	Το ανθρώπινο αυτί [1]	17
2	Το περύγιο [2]	18
3	Ο τυμπανικός υμένας [2]	19
4	Το μέσο αυτί [2]	20
5	Τα ακουστικά οστάρια [2]	21
6	Διαστάσεις της κοιλότητας του μέσου ωτός [3]	25
7	Τα τοιχώματα της κοιλότητας του μέσου ωτός [2]	26
8	Απώλεια ενέργειας απουσία του μέσου ωτός [4]	33
9	Μοχλός οσταρίων σύμφωνα με Helmholtz-1868 [5]	35
10	Μοχλός οσταρίων σύμφωνα με Dahmann-1930 [5]	35
11	Αύξηση δύναμης τάσης λόγω του βάρους [6]	35
12	Εφαρμογή της αναλογίας του σχοιιού στον τυμπανικό υμένα [6] .	36
13	Μορφολογία τυμπανικού υμένα [7]	36
14	Γραφική παράσταση κέρδους-συχνότητας για το μέσο αυτί [8] . . .	37
15	0.1 kHz [9]	38
16	2 kHz [9]	38
17	4 kHz [9]	38
18	Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων (α) της κοιλότητας του μέσου ωτός, (β) του έξω ακουστικού πόρου [9]	41
19	Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων του έξω ακουστικού πόρου (αρι- στερά) και της τυμπανικής κοιλότητας (δεξιά) [10]	42
20	Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων του ανθρώπινου ωτός [11]	43
21	Μη γραμμικά στοιχεία και γραφικές σχέσεις [10]	47
22	Μυριγγοτομή και τοποθέτηση σωληνίσκου αερισμού [12]	56
23	Το αρχικό μοντέλο	58
24	Το αρχικό μοντέλο	58
25	Το ενημερωμένο μοντέλο	59
26	Μηδενική μετατόπιση του τυμπανικού δακτυλίου και χαλαρής μοίρας	60
27	Μηδενική μετατόπιση του συνδέσμου του αναβολέα	60
28	Μηδενική μετατόπιση του μυ του αναβολέα	61
29	Μηδενική μετατόπιση του τείνοντα το τύμπανο μυ	61
30	Μηδενική μετατόπιση υπόλοιπων στοιχείων	62
31	Αρχικό μοντέλο στο Solidworks	63
32	Composite Curve	63
33	Αρχικές επιφάνειες	64
34	Σχεδίαση μιας επιμέρους επιφάνειας	65
35	Σημείο δυσκολίας στη σχεδίαση	66
36	1η κοιλότητα μέσου ωτός - 1η όψη	66

37	1η κοιλότητα μέσου ωτός - 2η όψη	67
38	Ενδιάμεσο βήμα στη δεύτερη προσπάθεια κατασκευής	68
39	Μεγάλη καμπυλότητα Splines σε επιμέρους επιφάνεια	69
40	2η κοιλότητα μέσου ωτός - 1η όψη	70
41	2η κοιλότητα μέσου ωτός - 2η όψη	70
42	Εσωτερική όψη	71
43	Τετράγωνες επιφάνειες - όρια της κοιλότητας	73
44	3η κοιλότητα μέσου ωτός	74
45	Διόρθωση ανοιχτής επιφάνειας 1	75
46	Διόρθωση ανοιχτής επιφάνειας 2	75
47	Σειρά των εργαλείων επιφάνειας	75
48	Μοντέλο μαζί με την προσθήκη	77
49	Πρόθεση τύπου TORP [13]	79
50	Απλοποιημένο μοντέλο σε τομή	81
51	Μοντέλο πρόθεσης TORP	81
52	Τελικό μοντέλο Solidworks	83
53	Υλικά που χρησιμοποιήθηκαν από το μοντέλο στο Engineering Data	85
54	Τελική μορφή πλέγματος	86
55	Στατιστικά στοιχεία πλέγματος	86
56	Προσομοίωση Directional Deformation	88
57	Απόκριση πλάτους τυμπανικού υμένα	88
58	Απόκριση φάσης τυμπανικού υμένα	89
59	Απόκριση πλάτους βάσης αναβολέα	89
60	Απόκριση φάσης βάσης αναβολέα	90
61	Διαφορά στην απόκριση πλάτους τυμπανικού υμένα σε dB ανάμεσα στα μοντέλα	92
62	Διαφορά στην απόκριση φάσης τυμπανικού υμένα σε μοίρες ανάμεσα στα μοντέλα	93
63	Διαφορά στην απόκριση πλάτους της βάσης του αναβολέα σε dB ανάμεσα στα μοντέλα	94
64	Διαφορά στην απόκριση φάσης της βάσης του αναβολέα σε μοίρες ανάμεσα στα μοντέλα	95
65	Λογισμικό Solidworks logo	97
66	Λογισμικό ANSYS logo	97
67	Άδεια χρήσης του λογισμικού ANSYS	98

Κατάλογος πινάκων

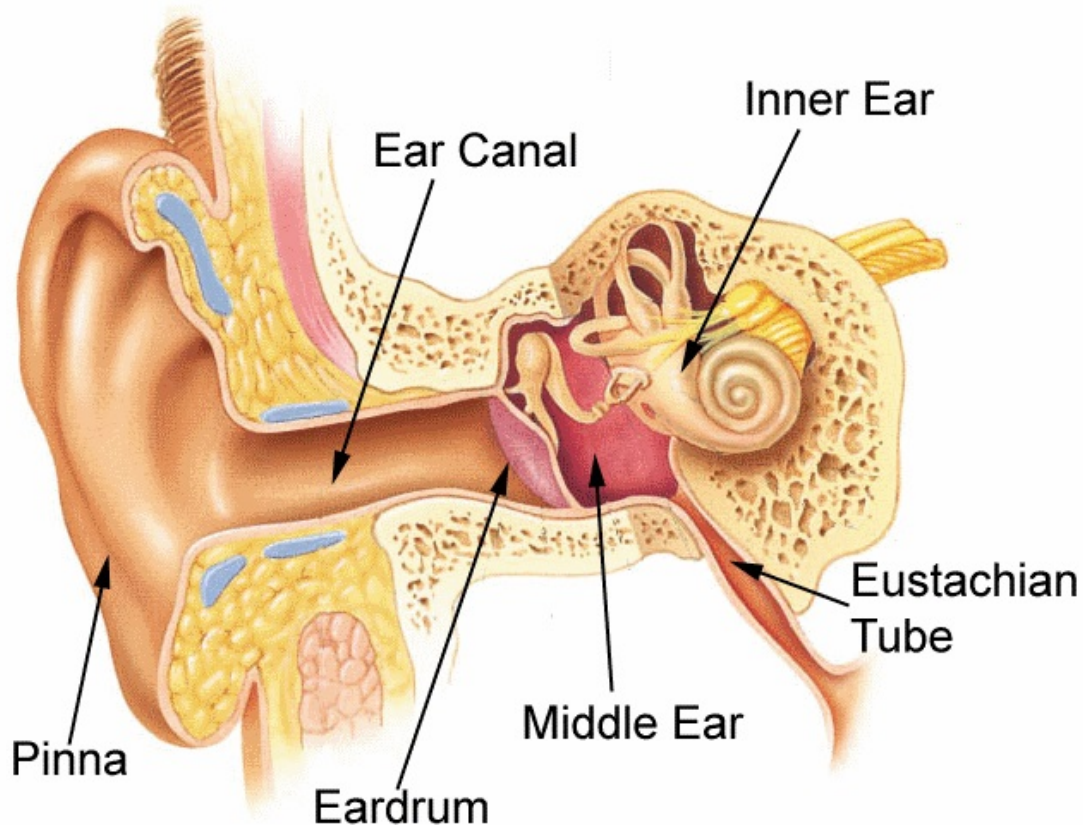
1	Σύγκριση παραμέτρων που καθορίζουν τις ακουστικές ιδιότητες του θαλασσινού νερού και του αέρα [6]	33
2	Γεωμετρικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν από διαφορετικές ερευνητικές ομάδες [14]	44
3	Μηχανικές ιδιότητες που χρησιμοποιήθηκαν από διαφορετικές ερευνητικές ομάδες [14]	45
4	Κύριες μηχανικές ιδιότητες στοιχείων μέσου ωτός [15] [16]	52
5	Προκύπτουσες μηχανικές ιδιότητες	53
6	Διαστάσεις βασικών σωμάτων	80
7	Διαστάσεις δακτυλίων	80
8	Διαστάσεις πρόθεσης τύπου TORP	82

1 Το ανθρώπινο σύστημα ακοής

1.1 Βασική ανατομία του ανθρώπινου αυτιού

Το αυτί είναι το όργανο της ακοής και της ισορροπίας και αποτελείται από τρία τμήματα με διαφορετική ανατομία και ξεχωριστές λειτουργίες:

- Το εξωτερικό τμήμα
- Το μέσο τμήμα
- Το εσωτερικό τμήμα



Εικόνα 1: Το ανθρώπινο αυτί [1]

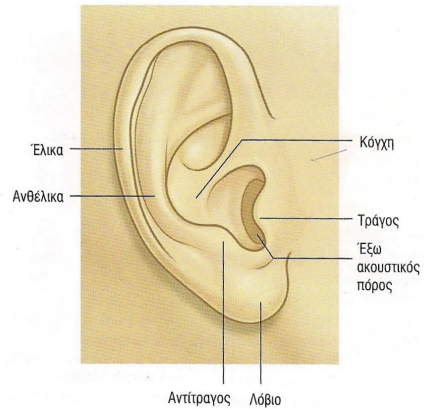
1.1.1 Εξωτερικό τμήμα

Το εξωτερικό τμήμα του αυτιού (έξω ους), αποτελείται από το **περύγιο** και τον **έξω ακουστικό πόρο**.

Το περύγιο βρίσκεται στο πλάι του κεφαλιού και η χρησιμότητά του έγκειται στη σύλληψη ήχων. Αποτελείται από χόνδρο επικαλυμμένο από δέρμα που σχηματίζει

προεξοχές και κοιλώματα (Εικόνα 2). Τα βασικότερα από αυτά είναι η **έλικα**, η **ανθέλικα**, ο **τράγος**, ο **αντίτραγος** και η **κόγχη**, η οποία αποτελεί το κοίλο κέντρο του περυγίου. Το μοναδικό μη χόνδρινο τμήμα είναι το **λοβίο**, το οποίο αποτελείται από λίπος.

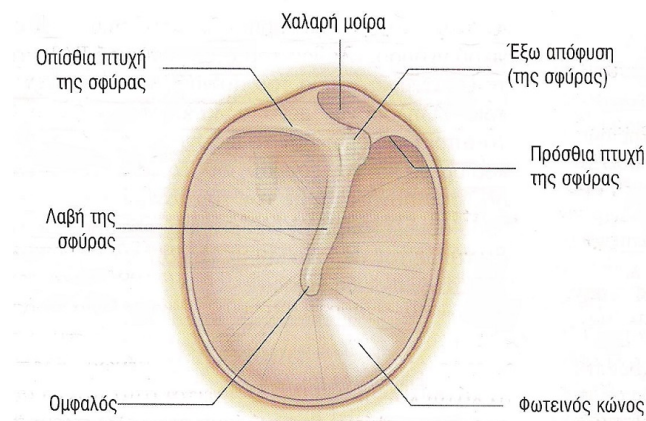
Ο έξω ακουστικός πόρος εκτείνεται από το βαθύτερο τμήμα της κόγχης μέχρι τον τυμπανικό υμένα, δηλαδή για περίπου 2.5 εκατοστά. Το τοίχωμά του αποτελείται από την επέκταση του χόνδρου του περυγίου στο έξω τριτημόριο [2], ενώ τα έσω δύο τρίτα σχηματίζονται από το τυμπανικό και το λεπιδοειδές τμήμα του κροταφικού οστού. Σε όλο το μήκος του καλύπτεται από δέρμα, μέρος του οποίου έχει τρίχες, σμηγματογόνους και κυψελιδοποιούς αδένες που παράγουν την **κυψέλη**(κερί). Βέβαια, το δέρμα που καλύπτει το χόνδρινο τμήμα συμφύεται χαλαρά με το χόνδρο, ενώ το δέρμα του οστέινου τμήματος προσφύεται στενά στο οστό και προοδευτικά λεπτύνεται προς τα μέσα, ώστε στην περιοχή της εξωτερικής επιφάνειας του τυμπανικού υμένα να έχει πάχος μόλις πέντε έως επτά κυττάρων [17].



Εικόνα 2: Το περύγιο [2]

1.1.2 Μέσο τμήμα

Ο **τυμπανικός υμένας** διαχωρίζει το έξω από το μέσο τμήμα του αυτιού. Είναι τοποθετημένος λοξά σχηματίζοντας μια μικρή γωνία, με την έξω επιφάνειά του να "βλέπει" προς τα κάτω και εμπρός. Στην περιφέρειά του, προσφύεται στην τυμπανική μοίρα του κροταφικού οστού με ινοχόνδρινο δακτύλιο [2], τον **τυμπανικό δακτύλιο**. Ως προς τη δομή του, αποτελείται από έξω προς τα μέσα από τρεις στρώσεις: Το **επιθηλιακό στρώμα πλακωδών κυττάρων**, το **ινώδες στρώμα** και το **βλεννογονικό στρώμα**. Σημαντική είναι η δομή του ινώδους στρώματος, το οποίο αποτελείται από κυκλωτερείς και ακτινοειδείς ίνες. Οι πρώτες, δίνουν αντοχή χωρίς να παρεμποδίζουν τη δόνηση, ενώ οι ακτινοειδείς διεισδύουν στο περίοστεο της λαβής της σφύρας και στον ινώδη δακτύλιο, δίνοντας έτσι το **κωνικό σχήμα** που είναι πολύ σημαντικό για τη λειτουργία του υμένα και για τη βέλτιστη μετάδοση της δονητικής ενέργειας. Λόγω του κωνικού αυτού σχήματος κατά την εξέταση του υμένα παρουσιάζεται **φωτεινός κώνος**.

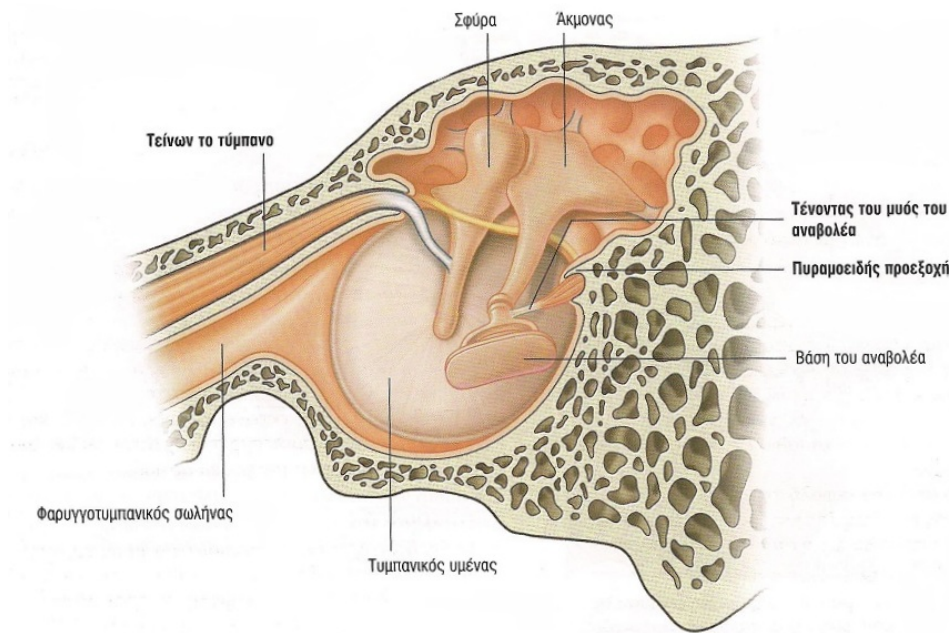


Εικόνα 3: Ο τυμπανικός υμένας [2]

Η σφύρα, η οποία είναι το πρώτο από τα ακουστικά οστάρια, πιέζει τον τυμπανικό υμένα από την έσω επιφάνειά του και δημιουργεί μια προεξοχή, το **σφυριαίο έπαρμα**, το οποίο τελειώνει προς τα κάτω στο λεγόμενο **ομφαλό του τυμπανικού υμένα** [17]. Λόγω αυτής της προεξοχής σχηματίζονται στην έσω επιφάνεια του υμένα η πρόσθια και οπίσθια σφυριαία πτυχή, με αποτέλεσμα πάνω από αυτές ο υμένας να είναι λεπτός και χαλαρός (**χαλαρή μοίρα** ή υμένας του Shrapnell) και κάτω από αυτές παχύς και τεντωμένος (**τεταμένη μοίρα**).

Το υπόλοιπο μέσο τμήμα του αυτιού (μέσο ους) είναι ένας χώρος επενδεδυμένος με βλεννογόνο και γεμάτος με αέρα [2], ο οποίος ονομάζεται **τυμπανική κοιλότητα**. Ο χώρος αυτός βρίσκεται ανάμεσα στον τυμπανικό υμένα και την κάψα του έσω αυτιού και χωρίζεται σε τρία μέρη από τα ανώτερα και κατώτερα όρια του τυμπανικού υμένα:

- Τον επιτυμπάνιο χώρο ή αττικό θόλο
- Το μεσοτυμπάνιο
- Το υποτυμπάνιο



Εικόνα 4: Το μέσο αυτί [2]

Μέσα στην τυμπανική κοιλότητα διακρίνονται τα στοιχεία του μέσου ωτός (Εικόνα 4) :

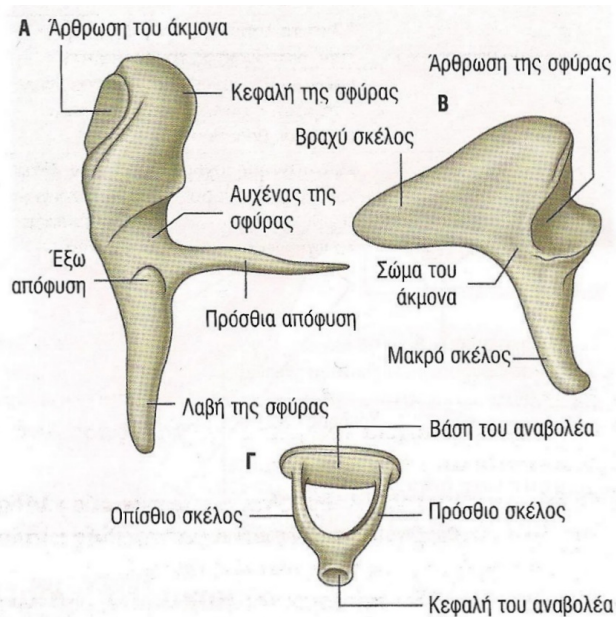
- Ο φαρυγγοτυμπανικός σωλήνας
- Τα ακουστικά οστάρια
- Οι μύες του τυμπάνου
- Οι μαστοειδείς κυψέλες [17]

Ο **φαρυγγοτυμπανικός σωλήνας**, γνωστός και ως ευσταχιανή σάλπιγγα, συνδέει το μέσο αυτί με το ρινοφάρυγγα. Σκοπός του είναι να εξισώνει την πίεση στις δύο πλευρές του τυμπανικού υμένα. Ο σωλήνας αυτός αποτελείται από ένα **οστέινο τμήμα**, στο προς το μέρος του μέσου αυτιού τριτημόριό του και από ένα **χόνδρινο τμήμα** στα υπόλοιπα δύο τριτημόρια [2]. Το σημείο συνένωσης των δύο τμημάτων είναι το στενότερο τμήμα του σωλήνα, ο **ισθμός**, ενώ από αυτό το σημείο προς το τύμπανο, ο σωλήνας διευρύνεται και φτάνει τελικά στη μεγαλύτερη διάμετρό του στο **τυμπανικό στόμιο** [17].

Τα ακουστικά οστάρια είναι τρία: Η **σφύρα**, ο **άκμονας** και ο **αναβολέας**. Σκοπός τους είναι η μετάδοση των δονήσεων του τυμπανικού υμένα προς το έσω αυτί [2]. Η σφύρα και ο άκμονας λειτουργούν σε μεγάλο βαθμό ως ένα ενιαίο όργανο στερεωμένο στην ακινο-αναβολική άρθρωση που περιστρέφεται σε απάντηση των κινήσεων του τυμπανικού υμένα [17].

Η σφύρα είναι το μεγαλύτερο από τα οστάρια και εμφανίζει **κεφαλή**, **αυχένα**, **πρόσθια** και **οπίσθια(έξω) απόφυση**. Η κεφαλή βρίσκεται στο επιτυμπάνιο

κόλπωμα και η οπίσθια επιφάνειά της αρθρώνεται με τον άκμονα. Ακριβώς κάτω της κεφαλής και πίσω από την χαλαρή μοίρα του τυμπανικού υμένα βρίσκεται ο αυχέννας και χαμηλότερα οι δύο αποφύσεις. Η πρόσθια απόφυση προσφύεται με ένα σύνδεσμο στο πρόσθιο τοίχωμα του μέσου αυτιού, ενώ η οπίσθια προσφύεται στην πρόσθια και οπίσθια σφυριαία πτυχή του τυμπανικού υμένα. Η χαμηλότερη επέκταση της σφύρας, η λαβή, προσφύεται, όπως προαναφέραμε στον τυμπανικό υμένα.



Εικόνα 5: Τα ακουστικά οστά [2]

Ο άκμονας είναι το δεύτερο κατά σειρά ακουστικό οστό και αποτελείται από το **σώμα** και δύο **σκέλη**, το **μακρό** και το **βραχύ**. Η άρθρωση με τη σφύρα πραγματοποιείται στο σώμα, ενώ το μακρό σκέλος οδεύει προς τα κάτω παράλληλα στη λαβή της σφύρας, έπειτα προς τα έσω και τελικά αρθρώνεται με τον αναβολέα. Το βραχύ σκέλος προσφύεται με ένα σύνδεσμο στο οπίσθιο τοίχωμα του μέσου αυτιού.

Ο αναβολέας, το τελευταίο στη σειρά οστό, αποτελείται από την **κεφαλή**, το **πρόσθιο σκέλος**, το **οπίσθιο σκέλος** και τη **βάση**. Η κεφαλή αρθρώνεται με τον άκμονα, τα δύο σκέλη διαχωρίζονται και καταλήγουν στην ωοειδούς σχήματος βάση, η οποία προσαρμόζεται στην ωοειδή θυρίδα πάνω στο λαβυρινθικό τοίχωμα του μέσου αυτιού.

Οι μύες που σχετίζονται με το μέσο αυτί είναι δύο: Ο **τείνων το τύμπανο** και ο **μυς του αναβολέα**. Ο τείνων το τύμπανο μυς βρίσκεται μέσα σε έναν οστείνο πόρο πάνω από τον φαρυγγοτυμπανικό σωλήνα και συνδέεται με το άνω μέρος της λαβής της σφύρας. Με τη σύσπασή του έλκει τη λαβή της σφύρας προς τα έσω, τεντώνοντας έτσι τον τυμπανικό υμένα, με αποτέλεσμα να μειωθεί το εύρος δονήσεων

που προκαλούνται από δυνατούς θορύβους. Ο μυς του αναβολέα είναι πολύ μικρός, εκφύεται από την πυραμοειδή προεξοχή που βρίσκεται στο μαστοειδές τοίχωμα του μέσου αυτιού και συνδέεται με την οπίσθια επιφάνεια του αυχένα του αναβολέα. Η χρησιμότητά του έγκειται στην προστασία από υπερβολικές ταλαντώσεις που μπορεί να προκαλέσουν ισχυροί θόρυβοι, έλκοντας με τη σύσπασή του τον αναβολέα προς τα πίσω [2].

Τέλος, άνω του επιτυμπάνιου χώρου βρίσκεται η είσοδος για το **μαστοειδές άντρο**, το οποίο είναι μια κοιλότητα που αποτελεί μια συνέχεια μιας σειράς γεμάτων με αέρα χώρων, τις μαστοειδείς κυψέλες. Αυτές υπάρχουν σε όλη την έκταση της μαστοειδούς μοίρας του κροταφικού οστού και της μαστοειδούς απόφυσης και είναι επενδεδυμένες με βλεννογόνο, ο οποίος αποτελεί συνέχεια του βλεννογόνου όλου του μέσου αυτιού και μπορεί να μεταδώσει εύκολα φλεγμονές από το μέσο αυτί στη μαστοειδή χώρα [17].

1.1.3 Εσωτερικό τμήμα

Στο εσωτερικό τμήμα του αυτιού (έσω ους), συναντάμε την ωτική κάψα [17], μέσα στην οποία υπάρχει μια σειρά από οστικές κοιλότητες (**οστέινος λαβύρινθος**), οι οποίες με τη σειρά τους περιβάλλουν κάποια υμενώδη σωληνοειδή και διευρυσμένα μορφώματα (**υμενώδης λαβύρινθος**). Όλα αυτά τα μέρη βρίσκονται στη λιθοειδή μοίρα του κροταφικού οστού μεταξύ του μέσου αυτιού προς τα έξω και του έσω ακουστικού πόρου προς τα έσω. [2]

Ο οστέινος λαβύρινθος αποτελείται από την **αίθουσα**, τους τρεις **ημικύκλιους σωλήνες** και τον **κοχλία**. Αυτές οι κοιλότητες επιστρώνονται με περίσσειο και περιέχουν ένα διαυγές υγρό, την **έξω λέμφο** ή **περίλεμφο**. Μέσα στην έξω λέμφο αιωρείται, χωρίς να γεμίζουν όλοι οι χώροι του οστέινου λαβυρίνθου, ο υμενώδης λαβύρινθος, ο οποίος αποτελείται από τους **ημικύκλιους σωλήνες** (μέσα στους οστέινους ημικύκλιους σωλήνες), τον **κοχλιακό πόρο** (μέσα στον κοχλία) και δύο διευρυσμένα τμήματα, το **ελλειπτικό κυστίδιο** ή **ασκίδιο** και το **σφαιρικό κυστίδιο** ή **σακκίδιο** (μέσα στην αίθουσα). Οι υμενώδεις αυτοί χώροι περιέχουν με τη σειρά τους ένα υγρό που ονομάζεται **έσω λέμφος** ή **ενδόλεμφος**. [2]

Κατά συνέπεια, μπορούμε να χωρίσουμε τον υμενώδη λαβύρινθο σε τρία τμήματα, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους, αλλά έχουν ξεχωριστή λειτουργία [17]:

- Το ανώτερο τμήμα ή αιθουσαίο λαβύρινθο
- Το κατώτερο τμήμα ή κοχλία
- Τον ενδολεμφικό πόρο και σάκκο

Το **αιθουσοκοχλιακό νεύρο** είναι υπεύθυνο για τις διαφορετικές λειτουργίες του έσω αυτιού. Αφού εισέλθει στον έσω ακουστικό πόρο, χωρίζεται σε **αιθουσαία μοίρα**, η οποία είναι υπεύθυνη για την ισορροπία και σε **κοχλιακή μοίρα**, η οποία είναι υπεύθυνη για την ακοή.

Η αίθουσα είναι το κεντρικό τμήμα του οστέινου λαβυρίνθου. Στο έξω τοίχωμά της βρίσκεται η ωσειδής θυρίδα και επικοινωνεί προς τα εμπρός με τον κοχλία και προς τα πίσω και άνω με τους ημικύκλιους σωλήνες. Από την αίθουσα αρχίζει ένας στενός πόρος, ο **υδραγωγός της αίθουσας**, ο οποίος διασχίζει το κροταφικό οστό και καταλήγει στην οπίσθια επιφάνεια της λιθοειδούς του μοίρας.

Από την αίθουσα προβάλλουν προς τα πίσω και πάνω οι τρεις ημικύκλιοι σωλήνες. Ονομαστικά είναι: Ο **πρόσθιος** (άνω ή **οβελιαίος**), ο **οπίσθιος** (ή **μετωπιαίος**) και ο **έξω** (ή **οριζόντιος**). Καθένας από αυτούς διαγράφει τα δύο τρίτα ενός κύκλου και συνδέεται με την αίθουσα και στα δύο του άκρα [2], όμως το οπίσθιο σκέλος του άνω και το άνω σκέλος του οπισθίου ενώνονται σε κοινό σκέλος πριν ολοκληρώσουν την τροχιά τους. Κοντά στην αρχή κάθε ημικύκλιου σωλήνα υπάρχει μια κυστική διεύρυνση, η **λήκυθος** και εκεί περιέχεται το τελικό όργανο της ισορροπίας, η **ακουστική ακρολοφία** [17]. Οι τρεις σωλήνες είναι τοποθετημένοι έτσι ώστε ο καθένας τους να βρίσκεται σε ορθή γωνία σε σχέση με τους άλλους δύο.

Από την αίθουσα προβάλλει προς τα εμπρός ο κοχλιάς, ο οποίος είναι ένα οστέινο μόρφωμα που έχει περιστραφεί 2.5 έως και 2 και 3/4 φορές γύρω από μια κεντρική στήλη οστού, την **άτρακτο** [2] και έχει συνολικό μήκος περίπου 35 εκατοστά [17]. Αυτή η διαμόρφωση δημιουργεί ένα **κωνοειδές μόρφωμα** με τη βάση προς τα πίσω και έσω και την κορυφή προς τα εμπρός και έξω, με αποτέλεσμα η πλατειά βάση της ατράκτου να είναι στραμμένη προς τον έσω ακουστικό πόρο, απ' όπου εισέρχονται οι κλάδοι της κοχλιακής μοίρας του αιθουσοκοχλιακού νεύρου που προαναφέραμε. Σε όλο το μήκος της ατράκτου προεξέχει ένα λεπτό οστέινο πέταλο, το **πέταλο της ατράκτου** ή **σπειροειδές πέταλο** και πάνω σε αυτό προσφύεται ο κοχλιακός πόρος, ο οποίος ελίσσεται εσωτερικά της ατράκτου.

Περνώντας στον υμενώδη λαβύρινθο, παρατηρούμε ότι πέντε από τα έξι δομικά του στοιχεία είναι μέρη του αιθουσαίου λαβυρίνθου, δηλαδή σχετίζονται με την ισορροπία. Το ελλειπτικό κυστίδιο είναι το μεγαλύτερο από τα δύο κυστίδια. Έχει ωσειδές και ανώμαλο σχήμα και εντοπίζεται στο οπίσθιο-άνω τμήμα της αίθουσας. Το σφαιρικό κυστίδιο είναι ένας στρογγυλός σάκκος, ο οποίος βρίσκεται στο πρόσθιο-κάτω τμήμα της αίθουσας και σε αυτό εκβάλλει ο κοχλιακός πόρος. Οι ημικύκλιοι σωλήνες έχουν ίδιο σχήμα με τους αντίστοιχους οστέινους ημικύκλιους σωλήνες και καταλήγουν στο ελλειπτικό κυστίδιο. Μέσα στη λήκυθο σχηματίζεται αντίστοιχα η **υμενώδης λήκυθος**. [2]

Ο ενδολεμφικός πόρος ξεκινά από τον συνδετικό ή ενωτικό πόρο (**ασκιδιο-σακκικός πόρος**), ο οποίος εξασφαλίζει την επικοινωνία όλων των στοιχείων του υμενώδους λαβυρίνθου και συνδέει τα δύο κυστίδια. Έπειτα εισχωρεί στον υδραγωγό της αίθουσας και καταλήγει στον οπίσθιο κρανιακό βόθρο. Εκεί διευρύνεται και σχηματίζει τον **ενδολεμφικό σάκκο**. [2]

Όσον αφορά τους αισθητικούς υποδοχείς της ισορροπίας, βρίσκονται σε ειδικά μορφώματα σε κάθε τμήμα του αιθουσαίου λαβυρίνθου χωριστά. Στα κυστίδια τα υποδεκτικά όργανα είναι η **κηλίδα του ελλειπτικού** και η **κηλίδα του σφαι-**

ρικού κυστιδίου αντίστοιχα, ενώ στη λήκυθο κάθε ημικύκλιου σωλήνα το υποδεκτικό όργανο είναι η προαναφερθείσα **ακρολοφία**. Το ελλειπτικό κυστίδιο διεγείρεται από τη φυγόκεντρη και κατακόρυφη επιτάχυνση, το σφαιρικό από την γραμμική επιτάχυνση, ενώ η ακρολοφία από την κίνηση προς οποιαδήποτε κατεύθυνση. [2]

Ο κοχλιακός πόρος βρίσκεται στο κέντρο του σωλήνα του κοχλία και τον διαιρεί σε δύο σπειροειδείς κοιλότητες, την **κλίμακα της αίθουσας** και την **κλίμακα του τυμπάνου**. Αυτές εκτείνονται σε όλη την έκταση του κοχλία επικοινωνώντας μεταξύ τους στην κορυφή του με μία στενή σχισμή, το **ελικότρημα**. Η κλίμακα της αίθουσας επικοινωνεί με την αίθουσα, ενώ η κλίμακα του τυμπάνου χωρίζεται από το μέσο αυτό με το δευτερεύοντα τυμπανικό υμένα που καλύπτει τη στρογγύλη θυρίδα. Κοντά σε αυτήν, βρίσκεται το **κοχλιακό σωληνάριο**, το οποίο διασχίζει το κροταφικό οστό και με αυτό ο κοχλιάς, που περιέχει την έξω λέμφο, επικοινωνεί με τον υπαραχνοειδή χώρο. [2]

Οπότε, ο υμενώδης κοχλιάς καταλήγει να έχει σχήμα τριγωνικό και εμφανίζει:

- Ένα εξωτερικό τοίχωμα που εφάπτεται με τον οστέινο κοχλία και αποτελείται από παχυμένο περίοστεο με επιθηλιακή επίστρωση, τον **σπειροειδή ή ελικοειδή σύνδεσμο**
- Ένα άνω τοίχωμα, τον **αιθουσαίο επιφανειακό υμένα ή υμένα του Reissner**, που χωρίζει την έσω λέμφο του υμενώδους κοχλία από την έξω λέμφο της αιθουσαίας κλίμακας και αποτελείται από μια στιβάδα συνδετικού ιστού με επιθηλιακή επένδυση
- Ένα κάτω τοίχωμα που χωρίζει την έσω λέμφο του υμενώδους κοχλία από την έξω λέμφο της τυμπανικής κλίμακας και αποτελείται από το ελεύθερο χείλος του πετάλου του κεντρικού άξονα του οστέινου κοχλία και από το **βασικό υμένα**. [2]

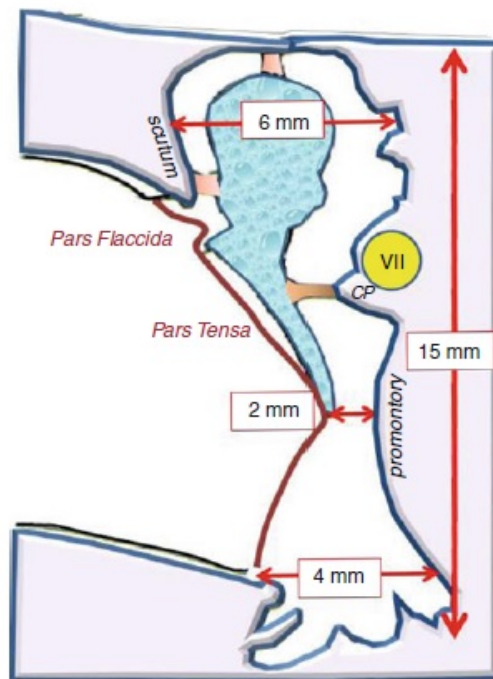
Τέλος, το **σπειροειδές ή ελικοειδές όργανο ή όργανο του Corti** αποτελεί το όργανο της ακοής, βρίσκεται πάνω στο βασικό υμένα και προβάλλει στον αυλό του υμενώδους κοχλία που περιέχει την έσω λέμφο [2]. Αποτελεί ένα σύνθετο μόρφωμα που αποτελείται από τρία βασικά τμήματα: ερυστικά κύτταρα, τριχωτά (ή αλλιώς τριχοφόρα [18]) κύτταρα και μια ζελατινώδη συνεκτική μεμβράνη, τον **καλυπτήριο υμένα**. Ο καλυπτήριος υμένας και το όργανο του Corti έχουν ίδια ποικιλία δομικών χαρακτηριστικών με σκοπό το συντονισμό του κοχλιακού πόρου, οπότε κατά μήκος του οργάνου διασπείρονται βαθμιαία οι χαμηλότερες συχνότητες, ενώ στο βασικό άκρο του κοχλία συγκεντρώνονται οι υψηλές συχνότητες. Τα τριχωτά κύτταρα χωρίζονται σε δύο ομάδες από τα έσω και έξω στυλοειδή κύτταρα, με αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας σήραγγας, της **σήραγγας του Corti**, που περιέχει την **κορτιλέμφο** [17].

1.2 Η κοιλότητα του μέσου ωτός

Η παρούσα διπλωματική εργασία δίνει έμφαση στην κοιλότητα του μέσου ωτός ή αλλιώς τυμπανική κοιλότητα, οπότε η ανατομία της θα μελετηθεί αναλυτικότερα σε αυτή την υποενότητα.

1.2.1 Βασική ανατομία

Η τυμπανική κοιλότητα είναι μία κάθετη σχισμή μέσα στο κροταφικό οστό, η οποία επικοινωνεί με το ρινοφάρυγγα, μέσω της ευσταχιανής σάλπιγγας και με το μαστοειδές άντρο. Σε κάθετη διατομή το σχήμα της κοιλότητας είναι αυτό της κλεψύδρας, δηλαδή στενεύει στο μεσαίο της τμήμα. Στο επίπεδο αυτό, η απόσταση μεταξύ του έσω και του έξω τοιχώματος είναι 2 mm, στο ανώτερο επίπεδο είναι 6 mm και στο κατώτερο 4 mm (Εικόνα 6). [3]

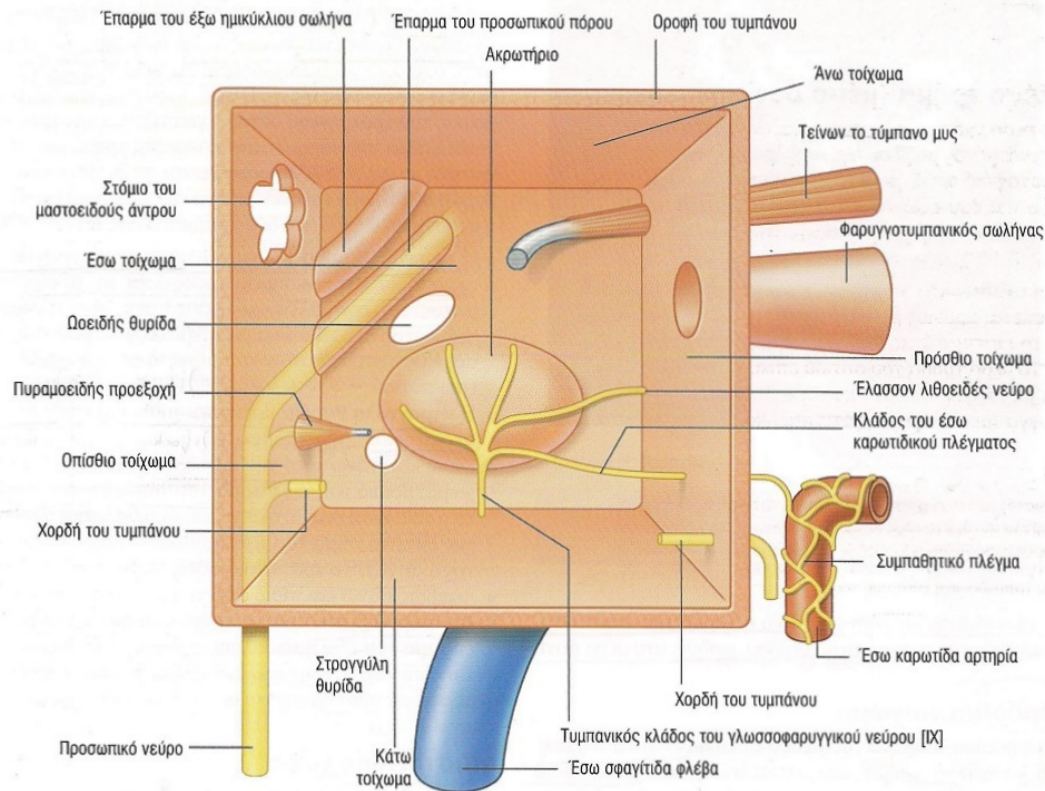


Εικόνα 6: Διαστάσεις της κοιλότητας του μέσου ωτός [3]

Η τυμπανική κοιλότητα, στο πρόσθιο τμήμα της καλύπτεται από κυλινδρικό ή κυβοειδές χροσσωτό επιθήλιο και στο οπίσθιο τμήμα από μη-κυλινδρικό, επίπεδο επιθήλιο. Κοντά στην ευσταχιανή σάλπιγγα εντοπίζονται κυρίως καλυκοειδή κύτταρα.

1.2.2 Τα τοιχώματα της κοιλότητας

Η κοιλότητα του μέσου ωτός έχει έξι τοιχώματα, με το καθένα να έχει διαφορετικά ανατομικά μορφώματα και χαρακτηριστικά.



Εικόνα 7: Τα τοιχώματα της κοιλότητας του μέσου ωτός [2]

Το **πρόσθιο τοίχωμα** στο ανώτερο τμήμα του περιλαμβάνει το **στόμιο της ευσταχιανής σάλπιγγας**. Επίσης, στο άνω τμήμα της ευσταχιανής σάλπιγγας εντοπίζεται το **μυικό ημισωλήνιο** του τείνοντος το τύμπανο μύος και χωρίζεται από αυτήν με οστέινο διάφραγμα, το οποίο εκτείνεται προς τα πίσω στο έσω τοίχωμα και περικλείει τον μυ και τον τένοντά του. Ο τένοντας στρέφεται κατά 90 μοίρες στην **κοχλιαροειδή απόφυση** και προσφύεται στον αυχένα της σφύρας. Τέλος, στο πρόσθιο-έσω τοίχωμα και προς τα έσω της ευσταχιανής σάλπιγγας βρίσκονται το **καρωτιδικό κανάλι**, η **έσω καρωτίδα** και οι **καρωτιδοτυμπανικοί νευρικοί κλάδοι**. Η καρωτίδα χωρίζεται από την τυμπανική κοιλότητα από λεπτό οστέινο τοίχωμα, αλλά σε σπάνιες περιπτώσεις μπορεί να είναι και τελείως εκτεθειμένη. [8]

Το **έξω τοίχωμα** καλύπτεται ως επί το πλείστον από τον τυμπανικό υμένα και τον τυμπανικό δακτύλιο που τον περιβάλλει, αλλά το ανώτερο τμήμα του αποτελείται

από το οστέινο έξω τοίχωμα του επιτυμπάνιου χώρου. [2]

Το **άνω τοίχωμα** ή αλλιώς **οροφή**, σχηματίζεται από ένα λεπτό οστέινο πέταλο, την **οροφή του τυμπάνου**, η οποία χωρίζει την τυμπανική κοιλότητα από το μέσο κρανιακό βόθρο [8] και βρίσκεται στην πρόσθια επιφάνεια της λιθοειδούς μοίρας του κροταφικού οστού [2].

Το **κάτω τοίχωμα** ονομάζεται και **έδαφος** και είναι ένα οστέινο πέταλο με μη σταθερό πάχος, το οποίο χωρίζει το μέσο αυτί από το **βολβό της σφαγίτιδας φλέβας**. Μπορεί όμως σε μερικές περιπτώσεις να απουσιάζει και έτσι ο βολβός να επεκτείνεται πάνω από το επίπεδο του τυμπανικού δακτυλίου [8]. Οι διαφορές του πάχους στο έδαφος οφείλονται στην ύπαρξη μαστοειδών αεροκυψελών, ενώ στο έσω χείλος του περιέχει ένα μικρό άνοιγμα από το οποίο περνάει ο **τυμπανικός κλάδος του γλωσσοφαρυγγικού νεύρου** [2].

Το **οπίσθιο τοίχωμα** είναι μεγαλύτερο από το πρόσθιο, με το κατώτερο τμήμα του να είναι οστέινο, ενώ το ανώτερο ανοικτό προς το **μαστοειδές άντρο**. Στο ανώτερο τμήμα βρίσκεται η **είσοδος του άντρου** η οποία συνδέει την **επιτυμάνια σχισμή** ή αλλιώς **θόλο του αττικού** με το άντρο. Στο έσω τοίχωμα της εισόδου του άντρου εντοπίζουμε μια στρογγυλή προβολή του **οριζόντιου ημικύκλιου σωλήνα**, ενώ στο κατώτερο τμήμα του βρίσκεται ένα μικρό εντύπωμα που υποδέχεται τη βραχεία απόφυση του άκμονα, η **φωλέα του άκμονα** ή **ακμονικό βοθρίο** και είναι πολύ χρήσιμο για τον εντοπισμό του κάθετου τμήματος του προσωπικού νεύρου. Άλλα πολύ σημαντικά χαρακτηριστικά του οπίσθιου τοιχώματος είναι ο **φαλλοπιανός πόρος** ή **πόρος του προσωπικού νεύρου** και η **πυραμοειδής απόφυση** ή **πυραμίδα**, η οποία είναι ένα κοίλο οστέινο έπαρμα και φιλοξενεί το μυ του αναβολέα. Από εκείνο το σημείο ο τένοντας του μυός συνεχίζει προς τα εμπρός και προσφύεται στον αυχένα του αναβολέα. Τέλος, σημαντικές είναι άλλες δύο περιοχές, ο **προσωπικός κόλπος**, ανάμεσα στο προσωπικό νεύρο και τη χορδή του τυμπάνου και ο **τυμπανικός κόλπος**, προς τα έσω του προσωπικού νεύρου.

Το **έσω τοίχωμα** είναι και το έξω τοίχωμα του έσω ωτός. Περιλαμβάνει το **ακρωτήριο** το οποίο σχηματίζεται από τη βασική έλικα του κοχλία, αύλακες για τις ίνες του τυμπανικού **κλάδου του γλωσσοφαρυγγικού νεύρου** ή **νεύρου του Jacobson** και την **ωσειδή θυρίδα** που υποδέχεται τη βάση του αναβολέα. Η **στρογγυλή θυρίδα**, που βρίσκεται επίσης στο τοίχωμα αυτό, καλύπτεται από μεμβράνη τριών στρωμάτων και γι' αυτό αποκαλείται δευτερεύουσα τυμπανική μεμβράνη. Επίσης, βασικά στοιχεία του έσω τοιχώματος είναι η **κοχλιαροειδής απόφυση**, με την οποία συνδέεται στενά η άνω επιφάνεια του **τυμπανικού νεύρου**, καθώς και το **οριζόντιο τμήμα του φαλλοπιανού πόρου** που βρίσκεται πάνω από την ωσειδή θυρίδα και τον αναβολέα. Τέλος, στο τοίχωμα ανήκουν το **μυικό ημισωλήνιο του τείνοντα του τύμπανου** μυός που φιλοξενεί τον ομώνυμο μυ, τα **Ponticulus** και **Subiculum**, όπως και το **άνοιγμα του τυμπανικού κόλπου** οριζόμενο άνω του Ponticulus και κάτω του Subiculum. [8]

1.3 Φυσιολογία του ανθρώπινου αυτιού

1.3.1 Σύστημα τυμπάνου - ακουστικών οσταρίων

Όπως έχει αναφερθεί στην προηγούμενη ενότητα, η λαβή της σφύρας συνδέεται με τη λαβή της στο κέντρο του τυμπανικού υμένα και με την κεφαλή της στον άκμονα. Έπειτα ο άκμονας συνδέεται με την κεφαλή του αναβολέα, η βάση του οποίου ακουμπάει στον υμενώδη λαβύρινθο μέσω της ωοειδούς θυρίδας. Η λαβή της σφύρας έλκεται συνεχώς από τον τείνοντα το τύμπανο μυ, με αποτέλεσμα ο τυμπανικός υμένας να διατηρείται πάντα τεταμένος, ώστε να είναι ευαίσθητος στις δονήσεις σε οποιοδήποτε σημείο του.

Η σφύρα και ο άκμονας κινούνται σαν ένας μοχλός, ο οποίος μέσω της ακμονο-αναβολικής άρθρωσης αναγκάζει τον αναβολέα να πιέζει την έξω λέμφο του κοχλίου όταν η σφύρα κινείται προς τα έσω, ενώ να έλκεται προς τα πίσω όταν η σφύρα κινείται προς τα έξω.

Το πλάτος κίνησης της πρόσθιας επιφάνειας του αναβολέα σε κάθε δόνηση ισούται με τα τρία-τέταρτα του πλάτους της κίνησης της λαβής της σφύρας. Οπότε, καθώς το πλάτος της κίνησης μειώνεται, η δύναμη της κίνησης αυξάνεται προσεγγιστικά κατά **1.3 φορές**. Επίσης, η ολική επιφάνεια του τυμπανικού υμένα είναι περίπου 55 mm^2 , ενώ η επιφάνεια της βάσης του αναβολέα είναι περίπου **17 φορές** μικρότερη, δηλαδή 3.2 mm^2 . Αυτή η διαφορά, επί τον όρο 1.3 έχει ως αποτέλεσμα η ενέργεια του ηχητικού κύματος που προσπίπτει στον τυμπανικό υμένα να πολλαπλασιάζεται κατά **22 φορές** και έπειτα να μεταδίδεται στην έξω λέμφο με τη μορφή της πίεσης. Αυτός ο μηχανισμός αποσκοπεί στην **εναρμόνιση της σύνθετης αντίστασης** μεταξύ των κυμάτων του αέρα και των κυμάτων στο υγρό του κοχλίου, αφού η αδράνεια του υγρού είναι σημαντικά μεγαλύτερη από την αδράνεια του αέρα.

Τέλος, όσον αφορά την *προστασία του συστήματος ακοής* σε πολύ έντονους ήχους, εκλύεται αντανακλαστικό σήμα από το νευρικό σύστημα προς τους μύες του μέσου ωτός σε χρόνο 40 έως 80 msec, με σκοπό τη συστολή του μυός του αναβολέα και του τείνοντος το τύμπανο. Με αυτό τον τρόπο προσδίδεται στο σύστημα των οσταρίων υψηλή ακαμψία, οπότε περιορίζεται η μετάδοση ήχων χαμηλής συχνότητας, κυρίως κάτω από 1 kHz. Ο περιορισμός είναι της τάξης των **30 ή 40 dB**, δηλαδή διαφορά έντασης δυνατής φωνής και ψιθύρου και έχει διπλό όφελος:

- Προστασία του κοχλίου από ισχυρές δονήσεις
- Συγκάλυψη ήχων χαμηλής συχνότητας, δηλαδή θορύβου του περιβάλλοντος, που επιτρέπει τη συγκέντρωση σε συχνότητες μεγαλύτερες από 1 kHz που περιέχουν πιο ουσιώδεις πληροφορίες, όπως ομιλία

Με τους δύο μύες του μέσου ωτός επιτυγχάνεται ακόμη ο περιορισμός της ευαισθησίας στη φωνή του ίδιου του ατόμου με αποστολή σημάτων που αποστέλλονται στους μύες ταυτόχρονα με την έναρξη της διαδικασίας της ομιλίας. [18]

1.3.2 Κοχλίας

Από την προηγούμενη ενότητα γνωρίζουμε την ανατομία του κοχλία και ότι περιέχει τρεις διαφορετικούς σωλήνες: την *αιθουσαία κλίμακα*, τη *μέση κλίμακα* (*κοχλιακό πόρο*) και την *τυμπανική κλίμακα*, τους ενδιάμεσους υμένες που τους χωρίζουν: τον *υμένα του Reissner* και τη *βασική μεμβράνη*, καθώς και το *όργανο του Corti*.

Οι ηχητικές δονήσεις εισέρχονται στην αιθουσαία κλίμακα μέσω της ωοειδούς θυρίδας στην οποία εφαρμόζει η βάση του αναβολέα, που πραγματοποιεί έσω και έξω κινήσεις, ανάλογες με τις δονήσεις. Με την έσω κίνηση μετακινείται το υγρό στην αιθουσαία και μέση κλίμακα, ενώ με την έξω κίνηση αντιστρέφεται η μετακίνηση του υγρού.

Ο βασικός υμένας έχει πολύ σημαντική λειτουργία. Περιέχει 20000 έως 30000 **βασικές ίνες** εκτεινόμενες από το οστέινο κέντρο του κοχλία προς το έξω τοίχωμα. Οι ίνες αυτές έχουν κάποιες βασικές ιδιότητες που τις χαρακτηρίζουν:

1. Είναι δύσκαμπτες και ελαστικές
2. Η βάση τους είναι στερεωμένη στον οστέινο άξονα και το άλλο άκρο ενσωματωμένο στο βασικό υμένα
3. Το μήκος τους αυξάνεται προοδευτικά, από 0.04 mm κοντά στην ωοειδή και στη στρογγυλή θυρίδα, έως τα 0.5 mm
4. Η διάμετρός τους ελαττώνεται από τη βάση του κοχλία έως το ελικότρημα ούτως ώστε η ακαμψία τους ελαττώνεται κατά 100 φορές.

Συμπερασματικά, οι βραχείες, άκαμπτες ίνες κοντά στην ωοειδή θυρίδα δονούνται σε υψηλές συχνότητες, ενώ οι μακριές, λεπτότερες ίνες κοντά στο ελικότρημα δονούνται σε χαμηλότερες συχνότητες μόνο.

Όσον αφορά τη μετάδοση των κυμάτων στον κοχλία, όταν η βάση του αναβολέα πιεσθεί απότομα προς τα έσω, η δευτερεύουσα τυμπανική μεμβράνη της στρογγύλης θυρίδας διογκώνεται προς τα έξω, αφού ο κοχλίας είναι οστέινος στην περιφέρειά του, οπότε δεν υφίσταται κίνηση σε άλλη κατεύθυνση. Άρα, παρεκτοπίζεται ο βασικός υμένας προς τη στρογγύλη θυρίδα και οι βασικές ίνες κάμπτονται προς την ίδια κατεύθυνση, με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί ένα κύμα που φέρεται κατά μήκος του βασικού υμένα προς το ελικότρημα, παρόμοιο με ένα υποθετικό κύμα στην επιφάνεια μιας λίμνης.

Τα κύματα αυτά είναι σχετικά ασθενή στην αφετηρία τους, αλλά ενισχύονται όταν φτάνουν στο σημείο που βρίσκεται η *φυσική συχνότητα συνήχησής* τους, όπου και εκμηδενίζονται πλήρως. Με βάση τα προηγούμενα μπορούμε εύκολα να συμπεράνουμε ότι τα υψίσυχνα κύματα εξασθενούνται πολύ νωρίς, τα μέτριας συχνότητας περίπου στο μισό μήκος του βασικού υμένα, ενώ τα χαμηλής συχνότητας διανύουν όλο το μήκος του. [18]

1.3.3 Όργανο του Corti

Το όργανο του Corti βρίσκεται στην επιφάνεια των βασικών ινών και του βασικού υμένα και είναι το δεκτικό όργανο που παράγει τις νευρικές ώσεις. Οι ουσιαστικοί νευρικοί υποδοχείς είναι δύο τύποι **τριχοφόρων κυττάρων**, τα *έσω τριχοφόρα* που είναι 3500 περίπου, κατανέμονται σε μια απλή σειρά και έχουν διάμετρο 12 μm περίπου και τα *έξω τριχοφόρα*, τα οποία είναι περίπου 12000, δομούνται σε τρεις ή τέσσερις σειρές και εμφανίζουν διάμετρο μόνο 8 μm . Αυτά τα κύτταρα συνάπτονται στις βάσεις και τις πλευρές τους με ένα δίκτυο νευρικών απολήξεων του κοχλιακού νεύρου, από τις οποίες το 90% έως 95% απολήγουν στα έσω τριχοφόρα. Τα ακουστικά κύματα έχει αποδειχθεί ότι μεταδίδονται κυρίως με τα έσω τριχοφόρα, ενώ τα έξω ρυθμίζουν με κάποιο τρόπο την ευαισθησία των έσω για διάφορες συχνότητες.

Όσον αφορά τη λειτουργία των κυττάρων αυτών, παρατηρούμε ότι προεξέχουν προς τα άνω **μικροσκοπικά τριχίδια** ή αλλιώς **βλεφαρίδες χώρου** που εφάπτονται και διεισδύουν στο ζελατινοειδές **επικάλυμμα του καλυπτήριου υμένα** που βρίσκεται από πάνω τους, στη μέση κλίμακα. Η κάμψη των τριχιδίων προς μία κατεύθυνση προκαλεί εκπόλωση των τριχοφόρων κυττάρων, ενώ η κάμψη προς την αντίθετη κατεύθυνση προκαλεί υπερπόλωση. Η λειτουργία αυτή έγκειται στο ότι με την κάμψη των τριχιδίων προς την κατεύθυνση της αιθουσαίας κλίμακας ανοίγουν διάλυτοι κατιόντων (200 έως 300) με αποτέλεσμα τη μετακίνηση θετικά φορτισμένων ιόντων καλίου στις κορυφές των βλεφαρίδων, οπότε προκαλείται εκπόλωση όλης της κυτταρικής μεμβράνης του κυττάρου.

Μελετώντας τα ηλεκτρικά δυναμικά παρατηρούμε ότι μεταξύ της έσω και της έξω λέμφου υπάρχει μια διαφορά δυναμικού ίση με +80 mV με τη θετική τάση στη μέση κλίμακα (κοχλιακό πόρο που περιέχει την έσω λέμφο) και την αρνητική προς τα έξω. Αυτή η τάση ονομάζεται **ενδοκοχλιακό δυναμικό** και πιστεύεται ότι παράγεται από τη συνεχή μεταφορά ιόντων καλίου από την έξω λέμφο προς τη μέση κλίμακα. Λόγω αυτού παρατηρούμε τα τριχίδια να έχουν ενδοκυττάριο δυναμικό -70 mV σε σχέση με την έξω λέμφο όπου βρίσκεται το κατώτερο μέρος του σώματός τους, ενώ -150 mV σε σχέση με την έσω λέμφο όπου βρίσκονται τα τριχίδια. Επομένως, αυτές οι παρατηρήσεις είναι μεγάλης σημασίας καθώς πιστεύεται ότι αυτό το υψηλό δυναμικό των -150 mV στην κορυφή των τριχιδίων ευαισθητοποιεί πολύ το κύτταρο ώστε να αντιλαμβάνεται ακόμα και τον ελάχιστο ήχο.

Η ανίχνευση της συχνότητας του ήχου από το νευρικό σύστημα βασίζεται στη θέση του κύματος πάνω στο βασικό υμένα, αφού όπως προαναφέρθηκε και είναι γνωστό, οι διαφορετικές συχνότητες τον ενεργοποιούν σε άλλα σημεία η καθεμία. Αυτό αποκαλείται **αρχή της θέσης**. Όμως, για πολύ χαμηλές συχνότητες το απώτερο άκρο του βασικού υμένα διεγείρεται το ίδιο, οπότε ο καθορισμός δε γίνεται με την αρχή της θέσης, αλλά με την **αρχή της ομοβροντίας**, βάσει της οποίας πολλές συχνότητες μεταδίδονται στους κοχλιακούς πυρήνες, οι οποίοι αντιλαμβάνονται την κάθε μία από αυτές.

Η ένταση του ήχου ανιχνεύεται με τρεις τρόπους:

1. Ανάλογα με το πλάτος δόνησης του βασικού υμένα και των τριχοφόρων
2. Με τη διέγερση περισσότερων τριχοφόρων σε δυνατότερους ήχους, άρα τη χωρική άθροιση των νευρικών ώσεων
3. Την ύπαρξη τριχοφόρων που διεγείρονται μόνο σε δυνατούς ήχους

Σχετικά με τις μεταβολές στην ένταση του ήχου, το αυτί "συμπιέζει" την κλίμακα των μεταβολών ανάλογα με την τρίτη δύναμη της πραγματικής έντασης. Δηλαδή, ένα διάστημα από δυνατό ήχο σε ψίθυρο αντιπροσωπεύει αύξηση ένα τρισεκατομμύριο φορές, αλλά για το αυτί η διαφορά αυτή είναι δέκα χιλιάδες φορές περίπου. Οπότε, υπάρχει η δυνατότητα της ερμηνείας διαφορών στην ένταση σε αρκετά εκτεταμένο πλαίσιο. [18]

1.3.4 Η αίθουσα

Η αίθουσα είναι υπεύθυνη για τη ρύθμιση της ισορροπίας. Στις έσω επιφάνειες του σφαιρικού και ελλειπτικού κυστιδίου υπάρχει η **ακουστική κηλίδα**, μια μικρή αισθητική περιοχή με διάμετρο περίπου 2 mm. Στο ελλειπτικό κυστίδιο βρίσκεται στο οριζόντιο επίπεδο και παίζει ρόλο στον καθορισμό του φυσιολογικού προσανατολισμού του κεφαλιού σε *όρθια στάση* σώματος. Αντιθέτως, στο σφαιρικό κυστίδιο η κηλίδα βρίσκεται στο κατακόρυφο επίπεδο και παίζει ρόλο στην αίσθηση ισορροπίας όταν το άτομο βρίσκεται σε *οριζόντια θέση*.

Οι ακουστικές κηλίδες καλύπτονται από **ζελατινοειδές στρώμα** που περιέχει μικρούς κρυστάλλους που ονομάζονται **ωτοκονία**. Επιπλέον, περιέχει χιλιάδες **τριχοφόρα κύτταρα** που συνάπτονται με τα νεύρα, οι βλεφαρίδες ή τριχίδια των οποίων εκτείνονται στη ζελατινοειδή ουσία. Κατά συνέπεια, οι βαρύτεροι κρύσταλλοι που περιέχονται εκεί προκαλούν κάμψη των βλεφαρίδων προς την κατεύθυνση της βαρύτητας.

Η διαδικασία εκπόλωσης και υπερπόλωσης είναι ταυτόσημη με αυτήν στα τριχοφόρα του κοχλίου. Στις κηλίδες όμως υπάρχουν τριχοφόρα *προσανατολισμένα* προς διάφορες κατευθύνσεις ώστε να ανιχνεύονται οι διάφορες κινήσεις του κεφαλιού. Επομένως, κάθε φορά ενεργοποιούνται διαφορετικές νευρικές ίνες ανάλογα με την ομάδα τριχιδίων που κάμπτεται και ενεργοποιούνται οι κατάλληλοι μύες για τη διατήρηση της ισορροπίας.

Όσον αφορά τη λειτουργία των κηλίδων αναφέρεται ότι δεν ανιχνεύουν τη γραμμική ταχύτητα, αλλά την **επιτάχυνση**. Έτσι, όταν ένα άτομο ξεκινά να τρέχει, πρέπει αρχικά να σκύψει το σώμα του εμπρός, ώστε να αντισταθμιστεί η πρόσθια μετακίνηση της ωτοκονίας, ενώ όταν φτάσει σε σταθερή ταχύτητα, ιδανικά (σε κενό) δε θα χρειάζεται να σκύβει καθόλου προς τα εμπρός. Στην πραγματικότητα όμως, πάντα θα έχει μια κλίση προς τα εμπρός, διότι υπάρχει η *αντίσταση του αέρα*, οπότε πρέπει να την αντισταθμίσει, όχι όμως αυτή τη φορά με τη βοήθεια των κηλίδων, αλλά με **ειδικούς υποδοχείς πίεσης** στο δέρμα.

Όπως προαναφέρθηκε οι τρεις ημικύκλιοι σωλήνες βρίσκονται τοποθετημένοι σε ορθή γωνία μεταξύ τους, ώστε να ορίζουν τα **τρία επίπεδα** του χώρου. Με τη ροή της έσω λέμφου προς τη λήκυθο, που βρίσκεται στις άκρες των σωλήνων πραγματοποιείται η διέγερση του αισθητήριου οργάνου. Η ακουστική ακρολοφία είναι ένα μικρό έπαρμα μέσα στη λήκυθο, που έχει επάνω του πολλά τριχοφόρα κύτταρα και στην κορυφή του μια ζελατινοειδή μάζα, το **κυπέλλιο**. Αυτό έχει τη δυνατότητα να παρασύρεται από τη λέμφο και να κάμπτεται με τη στροφή της κεφαλής και επειδή οι βλεφαρίδες των τριχοφόρων κυττάρων προβάλλονται μέσα του, μπορεί και τις παρασύρει ενεργοποιώντας το γνωστό μηχανισμό εκπόλωσης και υπερπόλωσης των τριχοφόρων. Συνεπώς, μέσω του *αιθουσαίου νεύρου* μεταδίδονται τα κατάλληλα σήματα για την πληροφόρηση σχετικά με τις μεταβολές του ρυθμού και της κατεύθυνσης στροφής της κεφαλής στον τρισδιάστατο χώρο.

Η λειτουργία των ημικύκλιων σωλήνων είναι παρόμοια με των κηλίδων. Η έσω λέμφος έχει μικρότερη αδράνεια από τους σωλήνες, αφού οι τελευταίοι είναι σταθερό μέρος του σώματος και συμμετέχουν στην κίνηση, οπότε σε μία περιστροφή του κεφαλιού δημιουργείται σχετική κίνηση με αντίθετη κατεύθυνση. Με το μηχανισμό αυτό, στέλνονται απότομα συσσωρευμένες νευρικές ώσεις από την απότομη κάμψη των τριχιδίων από το κυπέλλιο και έπειτα αρχίζουν να μειώνονται σταδιακά, καθώς επιστρέφει στη θέση του. Άρα, οι ημικύκλιοι σωλήνες ανιχνεύουν μόνο την *αρχή της κίνησης* του κεφαλιού ή την *παύση κίνησής* του, κάνουν δηλαδή "πρόβλεψη" της απώλειας της ισορροπίας. [18]

1.4 Μηχανική του ωτός

1.4.1 Ακουστική εμπέδηση

Η **ακουστική εμπέδηση** ή ακουστική αντίσταση είναι αποτέλεσμα διαφόρων παραμέτρων, όπως της δυσκαμψίας, της αντίστασης τριβής, της μάζας και του σχήματος ενός συστήματος και δείχνει την επίδραση στα χαρακτηριστικά του ήχου που μεταδίδεται μέσα από το σύστημα αυτό. Δηλαδή, υπάρχουν απώλειες ενέργειας λόγω της αντίστασης του συστήματος στη μεταβολή της κινητικής του κατάστασης. [8]

Το αυτί απορροφά μηχανική ενέργεια από τον έξω ακουστικό πόρο, τη μετατρέπει σε δονητική μέσω της τυμπανικής μεμβράνης και τη μεταδίδει μέσω του μηχανισμού του μέσου ωτός στο έσω αυτί. Αυτός ο μηχανισμός έχει πολλά χαρακτηριστικά τα οποία καθορίζουν την ακουστική του εμπέδηση, όπως ο όγκος της κοιλότητας του μέσου ωτός, η τάση της τυμπανικής μεμβράνης, η μάζα, το σχήμα, το φορτίο και η ακαμψία της αλυσίδας των οσταρίων. Η ακουστική εμπέδηση λοιπόν, διέπεται από τον εξής τύπο:

$$Z = \zeta * v \quad (\text{Εξ. 1})$$

με την ακουστική εμπέδηση (Z) να είναι ίση με το γινόμενο της πυκνότητας (ζ) και της ταχύτητας διάδοσης (v) στο συγκεκριμένο μέσο.

Αρχικά μελετάται η μετάδοση του ήχου απουσία του συστήματος του μέσου ωτός θεωρώντας ότι το έσω αυτί έχει ιδιότητες θαλασσινού νερού. Σε σχέση με το θαλασσινό νερό η πυκνότητα του αέρα είναι μικρότερη κατά 850 φορές, ενώ ο ήχος μεταδίδεται 4.6 φορές πιο αργά. Οπότε, η ακουστική εμπέδηση στο θαλασσινό νερό προκύπτει κατά 3880 φορές μεγαλύτερη ή αλλιώς ο λόγος τους είναι 3880. Αν συμβολιστεί ο λόγος με (r), τότε προκύπτει ο παρακάτω πίνακας:

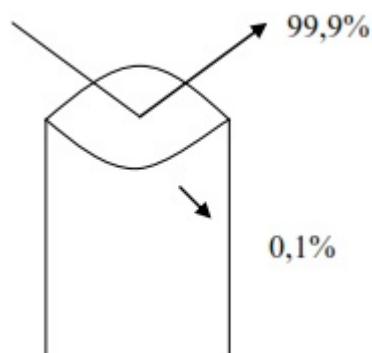
Παράμετρος	Θαλασσινό νερό	Αέρας	Λόγος (r)
Πυκνότητα (ζ)	1024 kg/m^3	1.21 gr/m^3	846.3
Ταχύτητα στους 20°C (v)	1572 m/s	343 m/s	4.58
Ακουστική εμπέδηση (Z)	161000 Ω/cm^2	41.5 Ω/cm^2	3880

Πίνακας 1: Σύγκριση παραμέτρων που καθορίζουν τις ακουστικές ιδιότητες του θαλασσινού νερού και του αέρα [6]

Αν λοιπόν, σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα θεωρηθεί η αναλογία (r) ως αναλογία του υγρού στο έσω αυτί προς τον αέρα στο έξω αυτί και υπολογιστεί η ενέργεια που μεταδίδεται χρησιμοποιώντας τον παρακάτω τύπο:

$$T = \frac{4r}{(r + 1)^2} \quad (\text{Εξ. 2})$$

παρατηρείται ότι $T = 0.001$. Δηλαδή, το 0.1% μόνο της ενέργειας μεταδίδεται στο νερό και το υπόλοιπο 99.9% ανακλάται πίσω στον αέρα. Σε decibel (dB) η απώλεια αυτή εκφράζεται ως -30 dB. Οι τιμές αυτές είναι προσεγγιστικές καθώς η ακουστική εμπέδηση της περιλήμφου του κοχλίου δεν είναι ακριβώς ίση με του θαλασσινού νερού. Στην Εικόνα 8 φαίνεται αυτή η απώλεια ενέργειας. [19] - [20]



Εικόνα 8: Απώλεια ενέργειας απουσία του μέσου ωτός [4]

1.4.2 Η λειτουργία του ενεργειακού μετασχηματιστή

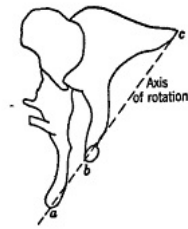
Για να αντιμετωπιστεί αυτή η μεγάλη απώλεια ενέργειας το μέσο αυτό δρα ως ενεργειακός μετασχηματιστής εξασφαλίζοντας την εξισορρόπηση στη διαφορά της ακουστικής εμπέδησης μεταξύ αέρα και περιλέμφου, αυξάνοντας την ηχητική πίεση που φτάνει στον κοχλία. Ο μηχανισμός αυτός έχει μια συνάρτηση κέρδους η οποία υλοποιείται με το συνδυασμό τριών αρχών της μηχανικής.

1) Η **αρχή του υδραυλικού μοχλού**. Η αρχή αυτή βασίζεται στον ορισμό της πίεσης, δηλαδή δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας. Συγκεκριμένα στο αυτό εξετάζεται ο λόγος της τυμπανικής μεμβράνης προς το εμβαδόν της βάσης του αναβολέα. Αυτός ο λόγος έχει βρεθεί από διάφορους συγγραφείς να κυμαίνεται από 15 έως 26 και παίζει ρόλο στη συνάρτηση μεταφοράς του όλου συστήματος, δηλαδή από όταν ασκείται δύναμη στην τυμπανική μεμβράνη έως ότου να μεταδοθεί στη βάση του αναβολέα και τελικά στην περιλέμφο. Ο λόγος αυτός λαμβάνει υπόψη μόνο την ανατομία των δύο περιοχών, αλλά εφόσον η τυμπανική μεμβράνη δε λειτουργεί το ίδιο σε όλη την έκτασή της πρέπει να βρεθεί η ενεργή περιοχή, ώστε να υπολογιστεί ο σωστός λόγος.

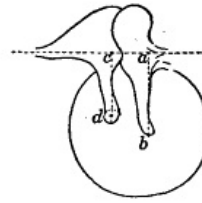
Αρχικά, η ενεργός περιοχή ορίστηκε ως "το εμβαδόν που ένα έμβολο πρέπει να εκτοπίσει τον ίδιο όγκο όταν η επιφάνειά του κινείται με το πλάτος του κέντρου της τυμπανικής μεμβράνης" [5]. Αφού βρέθηκε ότι η τμηματοποίηση αυτής της περιοχής είναι δύσκολη, μετά από μελέτες των δονήσεων του τυμπανικού υμένα, οι Tonndorf και Khanna αποφάνθηκαν ότι το μοτίβο είναι πολύ σύνθετο και εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη συχνότητα. Σε χαμηλές συχνότητες, έως 1.5 kHz, "όλα τα τμήματα του υμένα συνεισφέρουν στον ίδιο βαθμό στη λειτουργία του μετασχηματιστή", ενώ σε υψηλότερες συχνότητες "τα μοτίβα δονήσεων είναι περιορισμένα σε μέγεθος και χωρίζονται σε μικρότερα" [21].

Ως συμπέρασμα, η ενεργός περιοχή αλλά και ο ενεργός λόγος που βασίζονται στην αρχή του υδραυλικού μοχλού είναι εξαρτώμενα από τη συχνότητα.

2) Η **υπόθεση του μοχλού της αλυσίδας των οσταρίων**. Βασίζεται στο μοχλό που δημιουργούν η σφύρα με τον άκμονα, δηλαδή την αύξηση της δύναμης που ασκείται στην άκρη του ομφαλού από το μηχανικό σύστημα των οσταρίων, το οποίο σταθεροποιείται στην κοιλότητα του μέσου ωτός από πολλούς συνδέσμους οι οποίοι ορίζουν τους βαθμούς ελευθερίας του συστήματος. Έχουν δοθεί πολλοί ορισμοί για το μηχανισμό του μοχλού αυτού. Πρώτα ο Helmholtz [22] πρότεινε ως σημείο αναφοράς της δόνησης των οσταρίων, τον οπίσθιο σύνδεσμο του άκμονα, όπως δηλαδή απεικονίζεται η Εικόνα 9). Σε αυτή την περίπτωση λοιπόν, ο λόγος του μοχλού προκύπτει 1.5 προς 1. Δεύτερον, ο Dahmann [5] θεώρησε ως σταθερά σημεία του άξονα περιστροφής τον πρόσθιο σύνδεσμο της σφύρας και τον οπίσθιο σύνδεσμο του άκμονα, οπότε οι βραχίονες του μοχλού είναι κάθετοι στον άξονα. Έτσι, ο βρήκε το λόγο 1.3 προς 1 (Εικόνα 10).



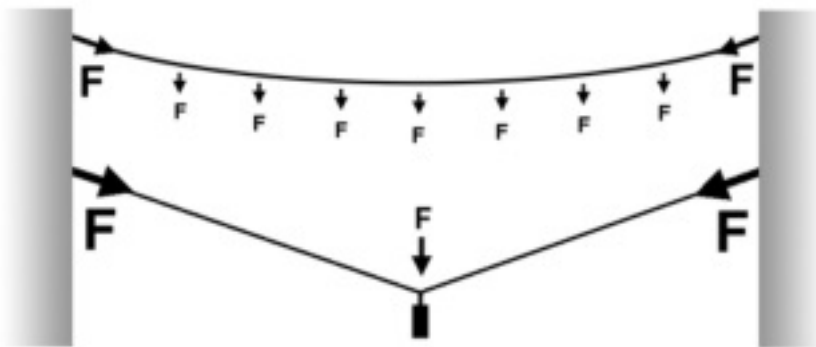
Εικόνα 9: Μοχλός οσταρίων σύμφωνα με Helmholtz-1868 [5]



Εικόνα 10: Μοχλός οσταρίων σύμφωνα με Dahmann-1930 [5]

Ο Stuhlman έφτιαξε το 1937 ένα υπερμεγέθες μοντέλο της οσταριακής αλυσίδας και τη μελέτησε υπό διαφορετικές συνθήκες [23]. Θεωρώντας το σύστημα άκμονα-σφύρα ως στερεό σώμα υπολόγισε το λόγο 1.27 προς 1, ενώ εάν επέτρεπε κινήσεις στην άρθρωση σφύρας-άκμονα έβρισκε διάφορους λόγους από 1 προς 1 έως 2 προς 1. Τέλος, η πιο πρόσφατη έρευνα του Gyo το 1987 έδειξε ότι ο λόγος είναι εξαρτώμενος από τη συχνότητα [24].

3) Η αναλογία του μοχλού της καμπυλωτής μεμβράνης. Αυτός ο μηχανισμός αρχικά περιγράφηκε από τον Helmholtz το 1868 [22] και αργότερα από τους Tonndorf και Khanna το 1970 [21]. Η βασική αρχή είναι ότι το σημείο επαφής της σφύρας δονείται λιγότερο από τον υπόλοιπο τυμπανικό υμένα. Έτσι, η μεμβράνη δρα ως μοχλός δημιουργώντας μεγαλύτερες δυνάμεις στην οσταριακή αλυσίδα. Παρατηρήθηκε επίσης ότι μια επίπεδη μεμβράνη δίνει μέγιστο σε μία μόνο συχνότητα, αντίθετα με μία καμπυλωτή μεμβράνη που είναι ευαίσθητη σε μεγάλο εύρος συχνοτήτων, εξ ου και η δυνατότητα ακοής σε πολλές συχνότητες.



Εικόνα 11: Αύξηση δύναμης τάσης λόγω του βάρους [6]

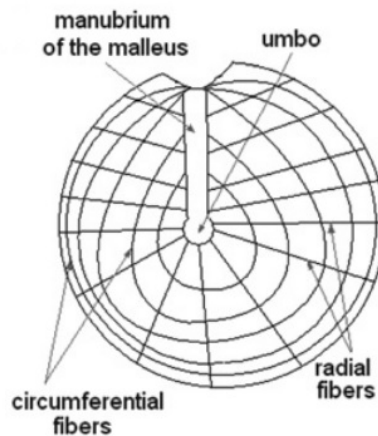
Ο ορισμός του Helmholtz παρομοιάζεται και με το σύστημα ενός σχοινιού που είναι εξαρτημένο ανάμεσα σε δύο τοίχους. Η δύναμη τάσης του σχοινιού από τους

τοίχους είναι μεγαλύτερη από το βάρος του, οπότε εάν αυξηθεί το βάρος, δηλαδή τραβηχτεί το σχοινί προς τα κάτω, η τάση αυτή αυξάνεται κατά πολύ.



Εικόνα 12: Εφαρμογή της αναλογίας του σχοινοῦ στον τυμπανικό υμένα [6]

Το παραπάνω μπορεί να εφαρμοστεί στον τυμπανικό υμένα, ο οποίος έχει το σχήμα της Εικόνας 12, αφού λόγω των κυκλωτερών και ακτινοειδών ινών καμπυλώνεται από την περιφέρειά του προς τον ομφαλό. Η πιο ακριβής μορφολογία του υμένα φαίνεται παρακάτω, στην Εικόνα 13.



Εικόνα 13: Μορφολογία τυμπανικού υμένα [7]

Κάθε ακτινοειδής ίνα παίζει το ρόλο του σχοινοῦ και είναι συνδεδεμένη από ένα σταθερό σημείο στην περιφέρεια και ένα κινητό σημείο, τον ομφαλό. Οπότε, όταν ένα κύμα προσπίπτει στον υμένα το κεντρικό του τμήμα μετατοπίζεται, η καμπυλότητα αυξάνεται, άρα ο ομφαλός μετατοπίζεται με μικρότερο πλάτος, αλλά μεγαλύτερη δύναμη σύμφωνα με την αρχή που προαναφέραμε.

Όπως και στο παράδειγμα με το σχοινί εάν το σχοινί ήταν μεγαλύτερο θα είχε μεγαλύτερη τάση στον τοίχο, έτσι και ο υμένας εάν είναι μεγαλύτερος συλλέγει και ασκεί μεγαλύτερη δύναμη στον ομφαλό.

Οπότε, παρατηρείται ότι η λειτουργία του μέσου ωτός ως ενεργειακού μετασχηματιστή προκύπτει από ένα συνδυασμό αρχών της μηχανικής. Ο μετασχηματιστής

αυτός πρέπει να μεταφέρει μια δόνηση όσο πιο αποδοτικά γίνεται, δηλαδή με μικρή μετατόπιση αλλά μεγάλη δύναμη. Με αυτό τον τρόπο λύνεται το πρόβλημα της μεγάλης διαφοράς στην ακουστική εμπέδηση αέρα-περιλέμφου, γίνεται το λεγόμενο **impedance matching**. Ο θεωρητικός συνολικός υπολογισμός του λόγου μετασχηματισμού είναι δύσκολος, αφενός επειδή όλες οι αρχές που εφαρμόζονται εξαρτώνται από τη συχνότητα και αφετέρου επειδή η πρόσβαση σε καθένα από τα ενδιάμεσα στοιχεία είναι δύσκολη σε ένα ακέραιο ανθρώπινο αυτί. [6] [25]

1.4.3 Απώλειες στο κέρδος του μετασχηματιστή

Εάν γίνει ανάλυση του συστήματος του μέσου ωτός στις διάφορες συχνότητες, έχει βρεθεί ότι:

- Το μέγιστο θεωρητικό κέρδος είναι 28 dB. Στη γραφική παράσταση κέρδους - συχνότητας, το πραγματικό κέρδος μεταβάλλεται σύμφωνα με τη συχνότητα, όπως στην Εικόνα 14.



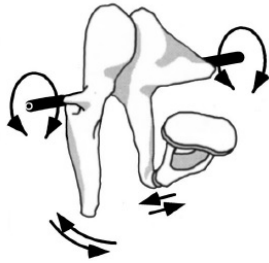
Εικόνα 14: Γραφική παράσταση κέρδους-συχνότητας για το μέσο αυτί [8]

Το μέγιστο είναι 20 dB στα 1000 Hz και είναι μικρότερο του θεωρητικού κέρδους.

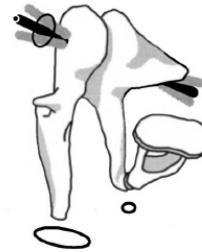
- Ο τρόπος ταλάντωσης του τυμπανικού υμένα σε υψηλές συχνότητες είναι διαφορετικός. Πάνω από τα 1000 Hz δεν ταλαντώνεται με ενιαίο συγχρονισμένο τρόπο, αλλά διαφορετικές περιοχές του ταλαντώνονται σε διαφορετικές φάσεις.
- Υπάρχουν απώλειες λόγω της σύνθετης ακουστικής αντίστασης. Αυτή οφείλεται στη μάζα των οσταρίων, τον αέρα της κοιλότητας του μέσου ωτός, τη

δυσκαμψία του όλου συστήματος και την αντίσταση της τριβής. Η αντίσταση λόγω της μάζας αποσβένει τη διάδοση υψηλών συχνοτήτων, ενώ της δυσκαμψίας τη διάδοση χαμηλών συχνοτήτων.

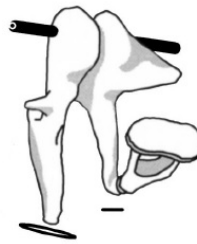
- Σε συχνότητες άνω των 1500 Hz χάνεται η σύζευξη της οσταριακής αλυσίδας. Δηλαδή, τα οστάρια δεν κινούνται πλέον σαν ενιαίο σώμα, αλλά ο αναβολέας κινείται λιγότερο σε σχέση με τη λαβή της σφύρας.
- Ο άξονας περιστροφής των οσταρίων αλλάζει ανάλογα με τη συχνότητα. Όπως φαίνεται και στις Εικόνες 15 - 17 σε χαμηλές συχνότητες ο άξονας διέρχεται από τον πρόσθιο σύνδεσμο της σφύρας και τον οπίσθιο σύνδεσμο του άκμονα, ενώ σε μεγαλύτερες συχνότητες μετατοπίζεται. Αυτό έχει ως συνέπεια απώλειες κέρδους. [8]



Εικόνα 15: 0.1 kHz [9]



Εικόνα 16: 2 kHz [9]



Εικόνα 17: 4 kHz [9]

2 Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων στο μέσο αυτί

2.1 Εισαγωγή

Πολλές δομές, όπως και το ανθρώπινο αυτί, είναι σύνθετες και περιέχουν πολλά στοιχεία. Αυτό καθιστά δύσκολη την ανάλυσή τους και τη μελέτη της συμπεριφοράς τους, οπότε οι μελετητές αναγκάζονται να δημιουργούν μοντέλα για τους σκοπούς αυτούς. Πλέον, τα μοντέλα γίνονται με τη βοήθεια υπολογιστή και κατάλληλων λογισμικών που επιτρέπουν αφ' ενός την ακριβή αναπαράσταση του πραγματικού συστήματος και αφ' ετέρου την ακριβή απόδοση ιδιοτήτων με σκοπό τη μελέτη της συμπεριφοράς του. Από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους που εξυπηρετούν αυτό το σκοπό είναι η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Method - FEM). Είναι μία πολύ χρήσιμη αριθμητική μέθοδος που εφαρμόζεται συνεχώς στο ανθρώπινο αυτί και συγκεκριμένα στο μέσο αυτί, λόγω της πολυπλοκότητάς του και διότι αποδίδει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Η διαδικασία που ακολουθεί η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων (ΜΠΣ) είναι να χωρίζει τα σώματα του μοντέλου σε πολλά απλούστερα τμήματα (στοιχεία), στα οποία μπορούν πολύ πιο εύκολα να εφαρμοστούν αρχές της μηχανικής και να επιλυθούν πολύ απλούστερες εξισώσεις. Εν τέλει, συνδυάζει τις λύσεις όλων των επιμέρους εξισώσεων και επιτρέπει να ληφθούν αποτελέσματα σε οποιοδήποτε σημείο επιλεχθεί. Τα προγράμματα σε Η/Υ χρησιμοποιούνται πριν από την ανάλυση (pre-processing) και μετά από την ανάλυση (post-processing). Αρχικά δηλαδή, με κάποιο γραφικό πρόγραμμα σχεδιάζεται το σύστημα προς ανάλυση και έπειτα διακριτοποιείται σε πεπερασμένα στοιχεία. Μετά την ανάλυση χρησιμοποιούνται τα αποτελέσματα για τη δημιουργία γραφικών παραστάσεων [26]. Ένα τέτοιο πρόγραμμα το οποίο χρησιμοποιείται και στη συγκεκριμένη εργασία είναι το ANSYS.

2.2 Προηγούμενες μελέτες με τη Μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων

2.2.1 Για το μέσο αυτί γενικότερα

Γενικά, υπάρχουν πολλές μελέτες που κάνουν προσπάθεια μοντελοποίησης του μέσου ωτός. Στις πιο πρώιμες μελέτες ο Zwislocki [27] δημιούργησε το ηλεκτρικό ανάλογο του μέσου ωτός, το οποίο περιέγραφε τις λειτουργίες διάφορων στοιχείων με ποιοτικό τρόπο. Έπειτα όμως, παρατηρείται ότι η μοντελοποίηση με χρήση Μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων είναι πολύ πιο ακριβής και οι μελέτες που την εφάρμοσαν έδωσαν πολύ καλύτερα αποτελέσματα.

Η αρχική μελέτη με τη ΜΠΣ ήταν αυτή των Funnell και Laszlo [28], οι οποίοι δημιούργησαν το πρώτο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων του τυμπανικού υμένα της γάτας και έπειτα βασισμένοι στο μοντέλο αυτό δημιούργησαν το τρισδιάστατο αντίστοιχό του, προσθέτοντας όμως ακριβείς αναπαραστάσεις των οσθαρίων και του

κοχλία [29].

Με την πάροδο του χρόνου βέβαια, τα λογισμικά που χρησιμοποιούνται βελτιώνονται συνεχώς, έτσι αναπτύχθηκαν βελτιωμένα μοντέλα ([30]). Σε αυτά οι σημαντικότερες προσθήκες είναι η εισαγωγή του έξω ακουστικού πόρου, συνδέσμων και μυών, καθώς και η βελτίωση οριακών συνθηκών του μοντέλου. Βασισμένοι όμως, πάνω σε αυτά τα πρώιμα μοντέλα, τα οποία χρησίμευαν κυρίως στη μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς του ανθρώπινου αυτιού, πολλοί από τους ίδιους μελετητές (Williams [31]) ανέπτυξαν στο μέλλον ένα καινούργιο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων. Η καινοτομία που επιτεύχθηκε είναι ότι χρησιμοποιήθηκαν αληθινά ανατομικά δεδομένα, καθώς και δεδομένα από την απεικονιστική μέθοδο NMRI, με αποτέλεσμα να προσομοιωθούν διάφορες ασθένειες ελέγχοντας συγκεκριμένες παραμέτρους.

Με το μοντέλο των Koike, Wada και Kobayashi [32], καθώς και τη βελτίωσή του από τους ίδιους [9] εισήχθησαν πολλά στοιχεία γεωμετρίας χρησιμοποιώντας ανατομικά δεδομένα ή απευθείας μετρήσεις. Το μοντέλο αυτό περιέχει και την κοιλότητα του μέσου ωτός και με τη χρήση του μελετήθηκε η συνάρτηση μεταφοράς του μέσου ωτός και διάφορες παθολογίες του. Η ακρίβεια όμως των στοιχείων είναι περιορισμένη, για παράδειγμα η κοιλότητα του μέσου ωτός αναπαρίσταται ως ένα στερεό παραλληλεπίπεδο.

Τα πιο ακριβή πρώιμα μοντέλα ([33]), παρόλο που χρησιμοποιώντας μικροσκοπεία laser για την κατασκευή των οσταρίων και της επιφάνειας του τυμπανικού υμένα, έβρισκαν δυσκολία στη συναρμολόγηση του μοντέλου από τα διακριτά στοιχεία. Μια πιο σύγχρονη μέθοδος από τον Lee [34] χρησιμοποίησε υπολογιστική τομογραφία, με αποτέλεσμα να αποδειχθεί πιο γρήγορη, πρακτική, φθηνή και μη επεμβατική μέθοδος.

Από τα πιο προηγμένα μοντέλα για το μέσο αυτί είναι της ερευνητικής ομάδας του Gan [35], το οποίο είναι βασισμένο σε προηγούμενες μελέτες των ιδίων. Έχει κατασκευαστεί βασισμένο σε μια μεγάλη ομάδα εικόνων του κροταφικού οστού και βελτιώθηκε πολλές φορές. Εκτός όμως των λεπτομερών γεωμετρικών χαρακτηριστικών, το καινοτόμο γνώρισμα του μοντέλου αυτού είναι η δυνατότητα που δίνει για εφαρμογή της Μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων για μηχανική, δομική και ακουστική ανάλυση.

Τέλος, υπάρχουν και πολύ πρόσφατες έρευνες οι οποίες χρησιμοποιούν micro-CT σαρώσεις για την απεικόνιση των εξαρτημάτων του μέσου ωτός, όπως για παράδειγμα των Ahn, Baek και Lee [36], καθώς και η έρευνα που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία [15]. Σε αυτά τα μοντέλα δίνεται έμφαση στη λεπτομέρεια της γεωμετρίας του μέσου ωτός προτού εφαρμοστεί η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων, με τις ελάχιστες δυνατές απλοποιήσεις από τα γραφικά προγράμματα επεξεργασίας, ώστε το μοντέλο να έχει λύση.

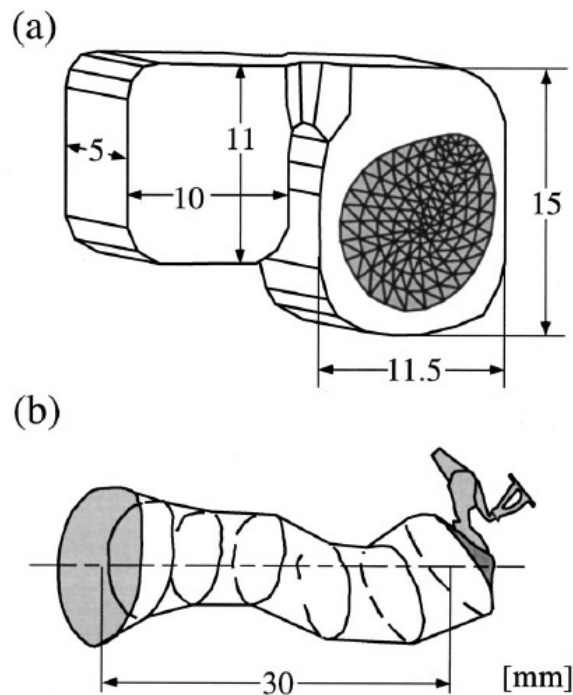
Είναι αξιοσημείωτο το ότι τα περισσότερα μοντέλα για το μέσο αυτί δημιουργήθηκαν στο πεδίο της συχνότητας, δείχνοντας έτσι ότι ο ήχος μεταφέρεται από την τυμπανική μεμβράνη μέσω των οσταρίων στο έσω αυτί, με τη συχνότητα. Υπάρχουν

βέβαια και μοντέλα στο πεδίο του χρόνου, όπως το μοντέλο των Koike, Wada και Kobayashi [32] που προαναφέρθηκε, το οποίο κάνει ανάλυση των δονήσεων των οσταρίων.

2.2.2 Για την κοιλότητα του μέσου ωτός

Στην έρευνα των Koike, Wada και Kobayashi [9] υπάρχει ένα μοντέλο για την κοιλότητα του μέσου ωτός, το οποίο φαίνεται στην Εικόνα 18. Το συγκεκριμένο μοντέλο περιλαμβάνει και την είσοδο στο μαστοειδές άντρο, το μαστοειδές άντρο χωρίς τις κυψέλες, καθώς και μια προσέγγιση του έξω ακουστικού πόρου. Όλα τα γεωμετρικά σχήματα είναι απλοποιημένα, λόγω της πολυπλοκότητας της γεωμετρίας του μέσου ωτός, όπως και η είσοδος του άντρου, που παρουσιάζεται απλώς ως ένα σωληνοειδές.

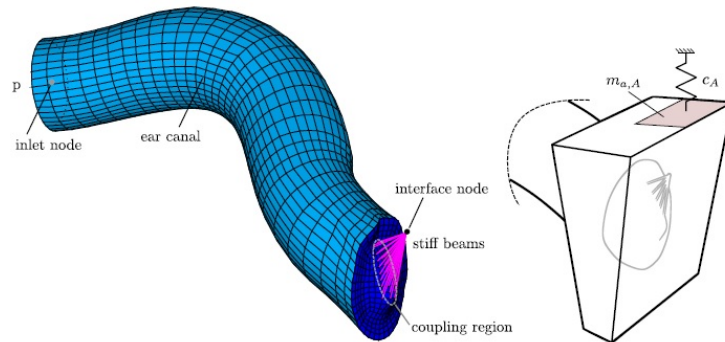
Στην έρευνα αυτή παρατηρείται ότι υπάρχουν μεγάλες διαφορές από άνθρωπο σε άνθρωπο στον ολικό όγκο της κοιλότητας του μέσου ωτός. Παρ' όλα αυτά η τυμπανική κοιλότητα από μόνη της δεν έχει μεγάλες αποκλίσεις και κυμαίνεται από 0.5 έως 1 ml.



Εικόνα 18: Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων (α) της κοιλότητας του μέσου ωτός, (β) του έξω ακουστικού πόρου [9]

Μια πιο πρόσφατη έρευνα [10], η οποία περιλαμβάνει και μη γραμμική ανάλυση του μέσου ωτός, έχει επίσης ένα απλοποιημένο μοντέλο για την κοιλότητα του

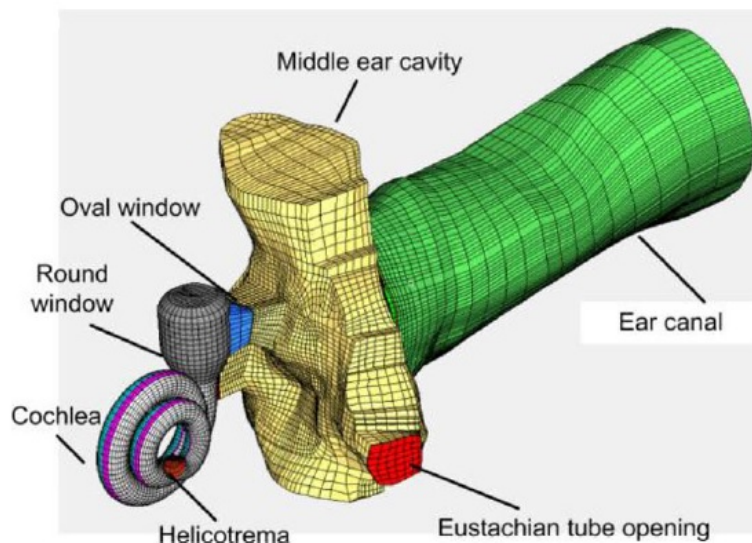
μέσου ωτός μαζί με τον έξω ακουστικό πόρο, αυτό που φαίνεται στην Εικόνα 19.



Εικόνα 19: Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων του έξω ακουστικού πόρου (αριστερά) και της τυμπανικής κοιλότητας (δεξιά) [10]

Σε αυτή τη μελέτη, η τυμπανική μεμβράνη και ο έξω ακουστικός πόρος έχουν ακριβή αναπαράσταση με δεδομένα από micro-CT, ενώ η τυμπανική κοιλότητα έχει σχεδιαστεί με απλοποιημένο τρόπο. Το μαστοειδές άντρο δεν έχει σχεδιαστεί καν με στοιχεία γεωμετρίας, αλλά έχει προσομοιωθεί με ένα ταλαντωτή μάζας. Αναφέρεται επίσης, ότι η είσοδος του άντρου λειτουργεί ως "bottleneck" (λαιμός μπουκαλιού), ανάμεσα στην τυμπανική κοιλότητα και το άντρο, καθώς και ότι οι μαστοειδείς κυψέλες κάνουν αντιστάθμιση της πίεσης με τον όγκο του αέρα που διαθέτουν, ο οποίος είναι έως 6 φορές μεγαλύτερος σε όγκο από της τυμπανικής κοιλότητας. Με αυτό τον τρόπο δημιουργείται το φαινόμενο του συντονισμού Helmholtz κατά την ταλάντωση του αέρα ανάμεσα στις δύο κοιλότητες.

Η πιο πρόσφατη μελέτη [11] αναλύει τη συμπεριφορά της τυμπανικής μεμβράνης παρουσία υγρού στο μέσο αυτί. Για το λόγο αυτό έχει σχεδιαστεί ολόκληρο το ανθρώπινο αυτί, όπως φαίνεται στην Εικόνα 20.



Εικόνα 20: Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων του ανθρώπινου ωτός [11]

Η ακρίβεια του μοντέλου είναι αρκετά μεγάλη και για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκαν πειραματικές μετρήσεις με Laser Doppler Vibrometry (LDV).

Μέσα στην κοιλότητα τοποθετήθηκε υγρό, το οποίο προσομοιώθηκε με εξαεδρικά στοιχεία 8 κόμβων (Fluid 80) στο λογισμικό ANSYS. Η μελέτη διαχωρίστηκε σε δύο περιπτώσεις ανάλογα με τον όγκο του υγρού, μία στα 0.3 ml (μέχρι τον ομφαλό) και μία στα 0.6 ml (σχεδόν γεμάτη τυμπανική κοιλότητα).

2.3 Παράμετροι για τη Μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων του μέσου ωτός

Για την εφαρμογή της ΜΠΣ σε ένα τρισδιάστατο μοντέλο του μέσου ωτός, πρέπει πρώτα να προσδιορίζονται όλες οι παράμετροι που θα ενσωματωθούν στην ανάλυση. Αυτές διαχωρίζονται σε:

- Γεωμετρικές παραμέτρους
- Μηχανικές ιδιότητες
- Απόσβεση και οριακές συνθήκες
- Μη γραμμικές παραμέτρους

2.3.1 Γεωμετρικές παράμετροι

Για τις γεωμετρικές παραμέτρους υπάρχουν δεδομένα από διάφορες ερευνητικές ομάδες. Ο προσδιορισμός τους έγινε με τη βοήθεια ανατομικών δεδομένων και με-

τρήσεων που αποκτήθηκαν άμεσα από μετρήσεις χροταφικών οστών. Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν από αρκετές ερευνητικές ομάδες:

Table 1
Summary of the human middle ear configurations reported by different researchers.

Middle ear component dimensions	Koike et al. [10]	Lee et al. [25]	Gan et al. [12]	Sun et al. [11]	Wever and Lawrence [30]
Ear drum					
Diameter along the manubrium (mm)	10.98	9.10	10.86	8.76	8.0–10.0
Diameter perpendicular to the manubrium (mm)	9.22	9.07	9.24	8.93	7.5–9.0
Height of the cone (mm)	1.50	1.42	1.46	1.46	2.0
Surface area (mm ²)	79.00	64.81	72.01	66.30	55.8–86.0
Thickness (mm)	0.074–0.169	0.43	0.05–0.10	0.05–0.074	0.04–0.1
Malleus					
Length from the manubrium to the end of the lateral process (mm)	4.53	4.26	4.71	4.20	5.8
Length from the lateral process to the end of the head (mm)	5.14	5.01	N/A	N/A	N/A
Total height (mm)	7.75	7.88	8.11	7.65	7.6–9.1
Weight (mg)	N/A	N/A	30.42	23.94	23–27
Incus					
Length along the long process (mm)	7.74	6.48	6.02	6.08	7.0
Length along the short process (mm)	5.12	4.16	4.58	4.49	5.0
Weight (mg)	N/A	N/A	26.47	24.77	25–32
Stapes					
Height (mm)	2.91	2.89	2.66	2.87	2.5–4.0
Length of the footplate (mm)	3.12	2.40	2.64	2.50	2.64–3.36
Width of the footplate (mm)	1.53	1.21	1.32	1.38	0.7–1.66
Thickness of the footplate (mm)	0.474	0.95	N/A	N/A	N/A
Weight (mg)	N/A	N/A	1.93	2.24	2.05–4.35

Πίνακας 2: Γεωμετρικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν από διαφορετικές ερευνητικές ομάδες [14]

Μπορεί να παρατηρηθεί ότι δεν υπάρχουν μεγάλες διαφορές ανάμεσα στα αποτελέσματα των διαφορετικών ερευνητών. Ο Lee όμως, παρατήρησε μελετώντας ανθρώπους με κανονική ακοή, ότι από άτομο σε άτομο τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά διαφέρουν, ενώ δεν υπάρχουν καθόλου διαφορές ανάμεσα σε αριστερό και δεξί αυτί.

Πλέον, όταν κατασκευάζονται μοντέλα για φυσιολογικό αυτί δε δίνεται τόση σημασία στις διαφορές αυτές, εφόσον είναι μέσα στα επιτρεπτά όρια. Οι γεωμετρικές παράμετροι παίζουν ρόλο όταν μελετώνται άνθρωποι που πάσχουν από ασθένειες του μέσου ωτός, διότι ο κάθε ένας ξεχωριστά μπορεί να παρουσιάσει διαφορετικές ανωμαλίες, οπότε αυτές πρέπει να μελετηθούν λεπτομερώς.

2.3.2 Μηχανικές ιδιότητες

Κατά την κατασκευή ενός μοντέλου Πεπερασμένων Στοιχείων για το μέσο αυτί, είναι επιθυμητή η ενωμάτωση όλων των μηχανικών χαρακτηριστικών και λειτουργιών του μέσου ωτός. Αυτό επιτυγχάνεται με την ανάθεση διαφορετικών υλικών στα διάφορα μέρη του μοντέλου, τα οποία βασίζονται στα βιολογικά χαρακτηριστικά του μέσου ωτός.

Από έρευνες ([14]) έχουν προκύψει για παράδειγμα, η σταθερά ελατηρίου για τον τυμπανικό δακτύλιο, οι μηχανικές ιδιότητες διάφορων τενόντων, συνδέσμων, καθώς και της ακινοαναβολικής άρθρωσης. Οι διάφορες τιμές που έχουν προκύψει από μελέτες φαίνονται στον Πίνακα 3:

Table 2
Mechanical properties used for the human middle ear finite element model.

Middle ear component	Mechanical property	Element type description
Eardrum		
Density (kg/m ³)	1.2×10^3	<ul style="list-style-type: none"> • Pentahedral elements [40]
Young's modulus (N/m ²)	$(3.34 [10]-3.5 [12,25,40]) \times 10^7$ (radial direction)	<ul style="list-style-type: none"> • Linear elastic, homogeneous, orthotropic shell elements [12,25]
pars tensa	$2.0 \times 10^7 [12,40]$ (circumferential direction)	<ul style="list-style-type: none"> • Linear elastic, homogeneous, isotropic shell elements [10]
pars flaccida	$1.01 \times 10^7 [12]$	
	$1.11 \times 10^7 [10]$	
	$2.0 \times 10^7 [25,40]$	
Malleus		
Density (kg/m ³)	$(2.55-2.67) \times 10^3$	<ul style="list-style-type: none"> • Linear elastic, isotropic, and homogenous elements [10,12,25,40]
Head	$(4.53-6.15) \times 10^3$	
Neck	$(2.67-3.70) \times 10^3$	
Handle	$(1.20-1.41) \times 10^{10}$	
Young's modulus (N/m ²)		
Incus		
Density (kg/m ³)	$(2.36-2.70) \times 10^3$	<ul style="list-style-type: none"> • Linear elastic, isotropic, and homogenous elements [10,12,25,40]
Body	$(2.26-2.70) \times 10^3$	
Short process	$(5.08-5.86) \times 10^3$	
Long process	$(1.20-1.41) \times 10^{10}$	
Young's modulus (N/m ²)		
Stapes		
Density (kg/m ³)	2.20×10^3	<ul style="list-style-type: none"> • Linear elastic, isotropic, and homogenous elements [10,12,25,40]
Young's modulus (N/m ²)	$(1.20-1.41) \times 10^{10}$	
Superior malleolar ligament		
Young's modulus (N/m ²)	$4.9 \times 10^4 [25]$	<ul style="list-style-type: none"> • Linear elastic, isotropic, and homogenous elements [10,12,25,40]
	$4.9 \times 10^6 [12,40]$	
Lateral malleolar ligament		
Young's modulus (N/m ²)	$6.7 \times 10^4 [25]$	<ul style="list-style-type: none"> • Linear elastic, isotropic, and homogenous elements [10,12,25,40]
	$6.7 \times 10^6 [12,40]$	
Posterior incudal ligament		
Young's modulus (N/m ²)	$6.5 \times 10^5 [10,25]$	<ul style="list-style-type: none"> • Linear elastic, isotropic, and homogenous elements [10,12,25,40]
	$6.5 \times 10^6 [12,40]$	
Anterior malleolar ligament		
Young's modulus (N/m ²)	$2.1 \times 10^6 [25]$	<ul style="list-style-type: none"> • Linear elastic, isotropic, and homogenous elements [10,12,25,40]
	$2.1 \times 10^7 [10,12,40]$	
Posterior stapedial muscle		
Young's modulus (N/m ²)	$5.2 \times 10^5 [10,25]$	<ul style="list-style-type: none"> • Linear elastic, isotropic, and homogenous elements [10,12,25,40]
	$5.2 \times 10^7 [12,40]$	
Tensor tympani muscle		
Young's modulus (N/m ²)	$2.6 \times 10^6 [10,25]$	<ul style="list-style-type: none"> • Linear elastic, isotropic, and homogenous elements [10,12,25,40]
	$7.0 \times 10^7 [12,40]$	
Stapedial annular ligament		
Young's modulus (N/m ²)	$2.0 \times 10^5 [40]$	<ul style="list-style-type: none"> • Shell elements [40]
	$4.9 \times 10^5 [10]$	<ul style="list-style-type: none"> • Linear elastic elements [10]
Spring constant (N/m)	$9 [25], 40 [12]$	<ul style="list-style-type: none"> • Linear spring elements [12,25]
Incudomalleal joint		
Young's modulus (N/m ²)	$1.41 \times 10^{10} [12,40]$	<ul style="list-style-type: none"> • Linear elastic, homogeneous, isotropic elements [12,40] • Rigid element [10]
Incudostapedial joint		
Young's modulus (N/m ²)	$6.0 \times 10^5 [12,40]$	<ul style="list-style-type: none"> • Linear elastic, homogenous, isotropic elements [10,12,40]
	$6.0 \times 10^6 [10]$	
Cochlear fluid		
Spring constant (N/m)	$60 [25]$	<ul style="list-style-type: none"> • Mass block and dashpot [12]
Damping (Ns/m)	$0.02 [12]$	<ul style="list-style-type: none"> • Spring-dashpot elements [25]
	$0.06 [25], 0.891 [10]$	<ul style="list-style-type: none"> • Damper [10]

Πίνακας 3: Μηχανικές ιδιότητες που χρησιμοποιήθηκαν από διαφορετικές ερευνητικές ομάδες [14]

Παρατηρείται ότι δεν υπάρχουν σημαντικές διαφορές ανάμεσα στα αποτελέσματα, εκτός από τους συνδέσμους, τους τένοντες και την ακμονοαναβολική άρθρωση, λόγω της δυσκολίας μέτρησης βιολογικών ιστών μέσα στο μέσο αυτί. Επίσης, ο λόγος Poisson θεωρείται πάντα 0.3, διότι αφενός δεν έχει μεγάλη απόκλιση από τα πειραματικά δεδομένα και αφετέρου δεν παίζει σημαντικό ρόλο στη δυναμική συμπεριφορά του όλου συστήματος.

2.3.3 Απόσβεση και οριακές συνθήκες

Η απόσβεση σε ένα μηχανικό σύστημα που δονείται, είναι η απώλεια ενέργειας που έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του πλάτους ταλάντωσης, την αλλαγή της συχνότητας συντονισμού, καθώς και την αλλαγή της απόκρισης του συστήματος. Λόγω της σύνθετης γεωμετρίας του μέσου ωτός δεν είναι εύκολη η μέτρηση της απόσβεσης, γι' αυτό και χρησιμοποιείται η απόσβεση Rayleigh [9]. Η θεώρηση αυτή χρησιμοποιεί τον παρακάτω μαθηματικό τύπο για να περιγράψει την απόσβεση του συστήματος:

$$C = aM + K \quad (\text{Εξ. 3})$$

Όπου:

- C ο πίνακας απόσβεσης του συστήματος
- M η μάζα του συστήματος
- K η ακαμψία του συστήματος

Ο λόγος απόσβεσης ορίζεται ως:

$$\zeta = \frac{\alpha + \beta}{2\omega} \quad (\text{Εξ. 4})$$

με ω να είναι η γωνιακή συχνότητα και α, β οι παράμετροι απόσβεσης. Ο Sun και η ερευνητική του ομάδα [37] είπαν ότι στοιχεία με παρόμοια ιστολογική δομή έχουν ίδιες μηχανικές ιδιότητες. Έτσι, υπέθεσαν ότι όλοι οι σύνδεσμοι και οι τένοντες έχουν τις ίδιες παραμέτρους απόσβεσης, με τιμές $\alpha = 0 \text{ s}^{-1}$ και $\beta = 0.0001 \text{ s}$. Επίσης, υπολόγισαν μια σταθερά ελατηρίου ως 9.0 N/m ώστε να αναπαραστήσουν την ακαμψία του συνδέσμου του αναβολέα.

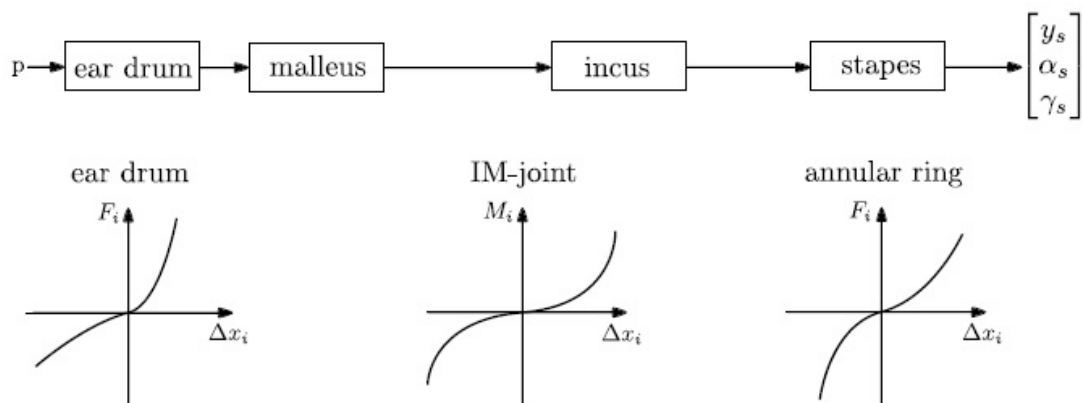
Οι οριακές συνθήκες είναι επίσης, πολύ σημαντικοί παράγοντες στη συμπεριφορά ενός μοντέλου για το μέσο αυτί. Περιλαμβάνουν συνδέσμους, το κοχλιακό υγρό, το δακτυλιοειδή σύνδεσμο του αναβολέα, καθώς και τον τυμπανικό δακτύλιο.

2.3.4 Μη γραμμικές παράμετροι

Από πειράματα της ομάδας του Gan, βρέθηκε η μη γραμμική σχέση πίεσης-ακαμψίας του οπίσθιου συνδέσμου της σφύρας και φάνηκε η εξάρτηση της σταθεράς ελαστικότητας από την πίεση.

Όπως αυτή η έρευνα, έτσι και άλλες προτείνουν να συμπεριλαμβάνεται η μη γραμμική συμπεριφορά του μέσου ωτός όταν εφαρμόζεται μεγάλη στατική πίεση στην τυμπανική μεμβράνη, όπως οι πιέσεις που χρησιμοποιούνται στην κλινική τυμπανομετρία. Οπότε, στα τελευταία μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων έχουν συμπεριληφθεί μη γραμμικές γεωμετρικές ιδιότητες, καθώς και μη γραμμικά χαρακτηριστικά των υλικών που χρησιμοποιούνται.

Για το σχεδιασμό της μη γραμμικής συμπεριφοράς των διάφορων συνδέσμων, τενόντων και αρθρώσεων έχουν αναπτυχθεί σχέσεις δύναμης - μετατόπισης και στρωφής. Έτσι, για να παρουσιαστεί η μεταφορά της πίεσης από ένα σημείο του συστήματος σε ένα άλλο διέρχεται από συγκεκριμένες χαρακτηριστικές καμπύλες του κάθε στοιχείου, όπως για παράδειγμα στην Εικόνα 21.



Εικόνα 21: Μη γραμμικά στοιχεία και γραφικές σχέσεις [10]

Τα μοντέλα που συμπεριλαμβάνουν τα μη γραμμικά χαρακτηριστικά αποδείχτηκαν από συγκρίσεις με πραγματικές τιμές ότι παρουσιάζουν καλύτερα αποτελέσματα ως προς τη συμπεριφορά του μέσου ωτός.

3 Μοντελοποίηση της κοιλότητας του μέσου ωτός και παθολογίες της

3.1 Εισαγωγή

Όπως προαναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 1, στο ανθρώπινο αυτί, αμέσως μετά την πρόσκρουση των ηχητικών κυμάτων στην τυμπανική μεμβράνη, υπεύθυνος για τη μετάδοση του ήχου είναι ο μηχανισμός που περιέχεται στο μέσο αυτί. Σε αυτή τη διαδικασία, το κάθε εξάρτημα παίζει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο, ώστε να επιτευχθεί η πλήρης ακουστική ικανότητα.

Ο μοχλός των οσταρίων, που είναι και το κύριο μέρος του μέσου ωτός, περιβάλλεται από την τυμπανική κοιλότητα, ένα χώρο γεμάτο με αέρα ο οποίος είναι πολύ σημαντικός για την ορθή λειτουργία του αυτιού, αλλά επίσης μπορεί να εμφανίσει και σημαντικές παθολογίες.

3.2 Τα σημαντικότερα τμήματα της κοιλότητας

Αρχικά, η τυμπανική κοιλότητα βρίσκεται στο μέσο του κροταφικού οστού στη διασταύρωση δύο πολύ σημαντικών αξόνων που ενώνουν νοητά το έξω με το έσω αυτί και το μαστοειδές άντρο με την ευσταχιανή σάλπιγγα. Περιτριγυρίζεται από έξι τοιχώματα και χωρίζεται σε τρεις βασικές περιοχές, τον υποτυμπάνιο χώρο, το μεσοτυμπάνιο χώρο και τον επιτυμπάνιο ή αττικό χώρο. Οι περιοχές αυτές προκύπτουν με βάση τη θέση τους ως προς τον τυμπανικό υμένα.

Σημαντικό για τον όγκο της κοιλότητας είναι το οπίσθιο τοίχωμα, που όπως έχει προαναφερθεί περιέχει την είσοδο του άντρου (aditus ad antrum). Από το χώρο εκείνο και μετά περιέχεται επίσης αέρας, στις μαστοειδείς κυψέλες, οι οποίες είναι σημαντικές για τις παθολογίες του ωτός, καθώς μπορούν να μεταδώσουν φλεγμονές από το μέσο αυτί στη μαστοειδή χώρα.

Τα ακουστικά οστά αποτελούν την οσταριακή αλυσίδα, δηλαδή το μοχλό που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο ο οποίος μεταδίδει τις δονήσεις από το έξω προς το έσω αυτί, αυξάνοντας την ικανότητα του ήχου, θεωρητικά κατά 20 φορές περίπου. Πολύ σημαντικές είναι οι συνδέσεις μεταξύ τους, καθώς και η σύνδεση της σφύρας στον τυμπανικό υμένα, στο σημείο του ομφαλού, όπως και η σύνδεση του αναβολέα στην ωσειδή θυρίδα.

Υπάρχουν επιπλέον, πολλοί σύνδεσμοι στο μέσο αυτί, οι οποίοι σε ένα ακριβές μοντέλο πρέπει να απεικονίζονται. Αυτοί είναι:

- Ο άνω σφυριαίος σύνδεσμος
- Ο έξω σφυριαίος σύνδεσμος
- Ο πρόσθιος σφυριαίος σύνδεσμος
- Ο οπίσθιος σύνδεσμος του άχμονα [8]

Τέλος, η τυμπανική μεμβράνη είναι προσανατολισμένη πλαγίως μέσα στον έξω ακουστικό πόρο, σχηματίζοντας μία γωνία 140° με το οπίσθιο τοίχωμά του, με αποτέλεσμα να έχει μεγαλύτερη επιφάνεια από τη διατομή του, ενώ η διάμετρός της είναι περίπου 1cm. Χωρίζεται σε χαλαρή και τεταμένη μοίρα, με τη μεγαλύτερη επιφάνεια να ανήκει στη δεύτερη και γύρω της περιβάλλεται από δακτύλιο ο οποίος προσφύεται στο κροταφικό οστό.

3.3 Μηχανικές ιδιότητες των συστατικών του μέσου ωτός

Για τη μοντελοποίηση οποιουδήποτε συστήματος, δεν αρκεί φυσικά ο σχεδιασμός της γεωμετρίας του. Απαραίτητη είναι και η απόδοση ιδιοτήτων στα στερεά σώματα και τις επιφάνειες του μοντέλου, ανάλογα με την ανάλυση που θα πραγματοποιηθεί. Καθώς στο ανθρώπινο αυτί το ενδιαφέρον στρέφεται στη μετάδοση του ήχου, πρέπει να προσδιοριστούν οι μηχανικές ιδιότητες όλων των συστατικών του μέσου ωτός. Σημειώνεται ότι στην ανάλυση που γίνεται θεωρούνται όλα τα υλικά γραμμικά ιστροπικά με σταθερή πυκνότητα.

Οι πιο σημαντικές μηχανικές ιδιότητες που ενδιαφέρουν για τη μοντελοποίηση είναι:

- Η ελαστικότητα
- Ο λόγος του Poisson
- Η πυκνότητα [20]
- Η σταθερά ελατηρίου
- Το όριο συμπίεστικότητας
- Το μέτρο ελαστικότητας σε διάτμηση

3.3.1 Ελαστικότητα

Η ελαστικότητα (elasticity) είναι η ικανότητα των σωμάτων να αντιστέκονται σε παραμορφωτικές επιδράσεις και τάσεις, καθώς και να επιστρέφουν στο αρχικό τους σχήμα όταν αυτές αφαιρούνται. Η **σταθερά ελαστικότητας** ή αλλιώς **μέτρο ελαστικότητας Young** (Young's modulus) είναι η κλίση της καμπύλης τάσης - παραμόρφωσης και μετριέται σε Pascal [38]. Με τη σταθερά αυτή ορίζεται η δυσκαμψία των σωμάτων (για παράδειγμα σε ένα μικρό λάστιχο η σταθερά Young είναι πολύ μικρή). Έχουν γίνει διάφορες μελέτες για την εύρεση της ελαστικότητας Young στην τυμπανική μεμβράνη και τα αποτελέσματα κυμαίνονται από 20 έως 40 MPa [20], όπως και για τα υπόλοιπα στοιχεία του μέσου ωτός που έχουν προαναφερθεί και στον Πίνακα 3 του προηγούμενου κεφαλαίου.

3.3.2 Λόγος Poisson

Ο **λόγος του Poisson** είναι η δεύτερη σταθερά ελαστικότητας, η οποία μαζί με τη σταθερά Young περιγράφουν το νόμο του Hooke για ιστροπικά υλικά. Είναι

ο λόγος της εγκάρσιας προς την αξονική παραμόρφωση και δεν έχει μονάδες αφού αυτά είναι όμοια μεγέθη [38]. Οι μελέτες έχουν δείξει δύο πιθανές τιμές για το λόγο Poisson, είτε 0.3 είτε 0.5, με την τελευταία να χρησιμοποιείται περισσότερο τελευταία, χωρίς βέβαια να έχει μεγάλη επίδραση στα αποτελέσματα [20].

3.3.3 Πυκνότητα

Η πυκνότητα είναι ως γνωστόν ο λόγος της μάζας ανά μονάδα όγκου και είναι χαρακτηριστική για κάθε υλικό. Οπότε αφού σε ένα μοντέλο θεωρούνται όλα τα σώματα ομοιόμορφα, το καθένα έχει τη χαρακτηριστική του πυκνότητα. Τα δεδομένα της πυκνότητας αντλούνται από προηγούμενες έρευνες, που φαίνονται στον Πίνακα 3.

3.3.4 Σταθερά ελατηρίου

Για την προσομοίωση μερικών τενόντων ή συνδέσμων χρειάζεται η σταθερά ελατηρίου (spring constant), από το νόμο του Hooke. Τα στοιχεία αυτά μπορεί να προσομοιωθούν ως ελατήρια επειδή ασκούν ελκτικές δυνάμεις σε άλλα σώματα. Επίσης, το κοχλιακό υγρό μπορεί να αναπαρασταθεί ως ελατήριο με σταθερά ελατηρίου $k = 60 \frac{N}{m}$ (Πίνακας 2). Μπορεί να προστεθεί επίσης απόσβεση (damping).

3.3.5 Όριο συμπίεστικότητας

Το όριο συμπίεστικότητας (**Bulk modulus**) ενός υλικού δηλώνει την αντίσταση στην ομοιόμορφη συμπίεση (από όλες τις κατευθύνσεις), δηλαδή την αντίσταση στην αλλαγή του όγκου [39]. Η εξίσωση που ορίζει το όριο συμπίεστικότητας είναι:

$$K = -V \frac{dP}{dV} = \rho \frac{dP}{d\rho} \quad (\text{Εξ. 5})$$

όπου K το όριο συμπίεστικότητας, V ο όγκος, P η πίεση και ρ η πυκνότητα.

Συνδέεται όμως και με τα προηγούμενα μεγέθη από τη σχέση:

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)} \quad (\text{Εξ. 6})$$

με E το μέτρο ελαστικότητας Young και ν το λόγο Poisson.

3.3.6 Μέτρο ελαστικότητας σε διάτμηση

Το μέτρο ελαστικότητας σε διάτμηση ή αλλιώς ακαμψία (**shear modulus**) περιγράφει τις ελαστικές ιδιότητες ενός σώματος όταν σε αυτό ασκούνται διατμητικές δυνάμεις, δηλαδή την ικανότητα του να αντιστέκεται σε εγκάρσιες παραμορφώσεις. Είναι έγκυρο μέτρο ελαστικότητας μόνο σε μικρές παραμορφώσεις, καθώς μεγάλες

διατμητικές δυνάμεις προκαλούν μόνιμη παραμόρφωση [39]. Συνδέεται με το μέτρο ελαστικότητας Young (E) και το λόγο Poisson (ν) μέσω της σχέσης

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (\text{Εξ. 7})$$

3.4 Εφαρμογή των μηχανικών ιδιοτήτων σε Μοντέλο Πεπερασμένων Στοιχείων

Για τη σωστή μοντελοποίηση της κοιλότητας του μέσου ωτός, πρέπει να χρησιμοποιηθεί ως βάση ένα ορθό και ρεαλιστικό μοντέλο των συστατικών του ανθρώπινου ωτός. Βάση λοιπόν αποτελεί η προηγούμενη συνδυασμένη δουλειά του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και του Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών [16] για την προσομοίωση παθολογιών του μέσου ωτός πάνω στο μοντέλο του Τμήματος Ωτορινολαρυγγολογίας Klinikum rechts der Isar, στο Munich University of Technology (TUM), στη Γερμανία [15]. Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε είναι το ANSYS και παρακάτω αναφέρονται όλες οι μηχανικές ιδιότητες που εμφανίζονται στην καρτέλα Engineering Data του ANSYS Workbench, όπου και περιγράφονται οι ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση:

Material	Density (kg m ⁻³)	Young's Modulus (Pa)	Poisson's Ratio
Middle Ear Cavity Bone	2200	1.41e+10	0.33
Pars Tensa	1200	2e+07	0.33
Stapedial Annular Ligament	1200	41000	0.33
Tympanic Annular Ligament	1200	4e+05	0.33
Stapes	2200	1.41e+10	0.33
Middle Ear Torp	4510	1.05e+11	0.37

Πίνακας 4: Κύριες μηχανικές ιδιότητες στοιχείων μέσου ωτός [15] [16]

Material	Bulk Modulus (Pa)	Shear Modulus (Pa)
Middle Ear Cavity Bone	1.3824e+10	5.3008e+09
Pars Tensa	1.9608e+07	7.5188e+06
Stapedial Annular Ligament	40196	15414
Tympanic Annular Ligament	3.9216e+05	1.5038e+05
Stapes	1.3824e+10	5.3008e+09
Middle Ear Torp	1.3462e+11	3.8321e+10

Πίνακας 5: Προκύπτουσες μηχανικές ιδιότητες

3.5 Παθολογίες του μέσου ωτός

Η μελέτη των παθολογιών σε αυτό το σημείο είναι σημαντική, επειδή αυτές αλλοιώνουν τα χαρακτηριστικά του μέσου ωτός. Ορισμένες παθολογίες είναι δυνατόν να αλλάξουν κάποιες ιδιότητες των συστατικών στοιχείων του μέσου ωτός, όπως επίσης και να αλλοιώσουν τη γεωμετρία του (οριστικά σε μερικές περιπτώσεις). Σκοπός της ανάλυσης των παθολογιών είναι και η εύρεση τρόπων για την απεικόνιση και προσομοίωσή τους σε ένα Μοντέλο Πεπερασμένων Στοιχείων.

3.5.1 Ωτοσκλήρυνση

Η **ωτοσκλήρυνση (otosclerosis)** (τοπική δυσπλασία του οστού) [40] είναι από τις κύριες ασθένειες της ανθρώπινης οστέινης λαβυρινθικής κάψας [41] και της βάσης του αναβολέα. Ανάλογα με την περιοχή, το μέγεθος και τα ιστολογικά χαρακτηριστικά της εμπλεκόμενης με την ασθένεια περιοχής, επηρεάζονται η ακουστική ικανότητα και η ισορροπία. Όταν αναφερόμαστε σε αυτήν ξεχωρίζουμε δύο μορφές, την κλινική και την ιστολογική.

Η κλινική ωτοσκλήρυνση αναφέρεται στην ύπαρξη ωτοσκληρυντικών εστιών στην περιοχή όπου δημιουργείται απώλεια ακουστικής ικανότητας, οι οποίες εμποδίζουν τις κινήσεις του αναβολέα ή της μεμβράνης της στρογγυλής θυρίδας. Οι ωτοσκληρυντικές αυτές πλάκες εντοπίζονται κυρίως πριν από την ωσειδή θυρίδα, στη βάση του αναβολέα (80%), στη στρογγυλή θυρίδα (30%), στο ενδόστεο του κοχλίου (21%) και στο πρόσθιο τμήμα του έσω ακουστικού πόρου.

Η ιστολογική ωτοσκλήρυνση αναφέρεται στην πρόοδο της ασθένειας χωρίς κλινικά συμπτώματα και ανακαλύπτεται μόνο εάν πραγματοποιηθεί κάποια τομή του κροταφικού οστού. Έχει τρία στάδια: σπογγίωση (πρώιμο στάδιο), μεταβατικό (δευτερο) στάδιο και ωτοσκλήρυνση (τρίτο στάδιο). [40]

Η βλάβη που προκαλείται από την ωτοσκλήρυνση συνίσταται σε εντοπισμένη εστία νεοκλάστου οστίου ιστού σπογγιώδους συστάσεως, ο οποίος αντικαθιστά το φυσιολογικό οστίτη ιστό της λαβυρινθικής κάψας, καθώς αναπτύσσεται στις περιοχές του εμβρυϊκού χόνδρου. Όπως προαναφέραμε, η αλλοίωση αυτή παραμένει

κρυφή μέχρι να φτάσει στα κρίσιμα σημεία. Εάν προχωρήσει και φτάσει στην ωοειδή θυρίδα προκαλεί καθήλωση του αναβολέα, ενώ εάν φτάσει στο ενδόστεο του κοχλίου προκαλεί νευροαισθητήριο βαρηκοΐα. Μπορεί βέβαια να προκληθεί και συνδυασμός των δύο [41]. Η απώλεια ακοής που προκύπτει από ωτοσκλήρυνση κυμαίνεται από 5 έως 60 dB [8].

3.5.2 Τυμpanοσκλήρυνση

Η **τυμpanοσκλήρυνση (tympanosclerosis)** είναι η δημιουργία σκληρών, λείων, συμπαγών λευκοκίτρινων πλακών ασβεστίου στον τυμpanικό υμένα, αλλά και στον τυμpanικό δακτύλιο. Προκαλείται από ανώμαλη επούλωση, τραυματισμό ή χρόνιες φλεγμονές του τυμπάνου, όπως η χρόνια μέση ωτίτιδα. Επίσης, είναι αυξημένος κατά 11-37% ο κίνδυνος εμφάνισης τυμpanοσκλήρυνσης σε ασθενείς οι οποίοι είχαν σωληνίσκους αερισμού για την αντιμετώπιση της εκκριτικής ωτίτιδας.

Ως συμπτώματα σημειώνεται ότι προκαλεί *βαρηκοΐα αγωγιμότητας*, αφού εμποδίζει την κίνηση του τυμπάνου, αλλά μπορεί να προκαλέσει και *εμβοές*.

Για την αντιμετώπιση της τυμpanοσκλήρυνσης πραγματοποιείται χειρουργική επέμβαση (τυμpanοπλαστική), με την οποία αφαιρούνται οι προσβεβλημένες περιοχές και βελτιώνεται η ακουστική ικανότητα. Η επέμβαση γίνεται μόνο σε περιπτώσεις που υπάρχουν κλινικά συμπτώματα, διότι είναι επικίνδυνη η ζημιά του μέσου ωτός. [20] [42]

3.5.3 Καθήλωση της κεφαλής της σφύρας

Οφείλεται σε **οστεοποίηση του προσθίου συνδέσμου της σφύρας** στο επιτυμπάνιο. Αντίθετα με την ωτοσκλήρυνση, η καθήλωση της κεφαλής της σφύρας προκαλεί μικρότερη απώλεια ακουστικής ικανότητας, ίση με 15 - 25 dB. Αιτία για αυτό είναι ότι το σημείο καθήλωσης είναι κοντά στον άξονα περιστροφής της οσταριακής αλυσίδας, οπότε η μετατόπιση είναι μικρή σε εκείνο το σημείο. [8]

3.5.4 Διάτρηση τυμpanικού υμένα

Σε διάφορες περιπτώσεις όπως καθαρισμός του έξω ακουστικού πόρου, χαστούκι στο αυτί, βουτιά σε πισίνα, έκρηξη, κάταγμα του λιθοειδούς οστού κτλ. μπορεί να προκληθεί **τραυματική διάτρηση του τυμpanικού υμένα (tympanic membrane perforation)**. Η διάγνωση γίνεται είτε με επισκόπηση, όπου εντοπίζονται εμφανείς εξωτερικοί τραυματισμοί, είτε με ωτοσκόπηση ή και με ακούγραμμα.

Με τη διάτρηση μπορεί να προκαλεσθεί εξάρθρωση ή και κάταγμα της οσταριακής αλυσίδας, οπότε χρειάζεται θεραπεία με τυμpanοπλαστική. Για πιο μικρές διατρήσεις πραγματοποιείται μυριγοπλαστική ή κάλυψη του κενού με φύλλο σιλικόνης. Υπάρχουν βέβαια και πιο σοβαρές επιπλοκές όπως η δημιουργία *περιλεμφικού συριγγίου*, οξεία ή χρόνια *μέση ωτίτιδα* και *χρόνια έκκριση από τον ακουστικό πόρο*. [43]

Βασικό σύμπτωμα στην απώλεια ακουστικής ικανότητας είναι η *βαρηκοΐα αγωγιμότητας*, που μπορεί να φτάσει τα 40 - 50 dB. Ο μηχανισμός της βλάβης είναι η μείωση της οσταριακής σύζευξης λόγω της μείωσης της ενεργού επιφάνειας ταλάντωσης του υμένα. Το μέγεθος της απώλειας ήχου εξαρτάται από τη συχνότητά του (μεγαλύτερη απώλεια σε χαμηλές συχνότητες), το μέγεθος της διάτρησης και τον όγκο της κοιλότητας του μέσου ωτός. [8]

3.5.5 Εκκριτική ωτίτιδα

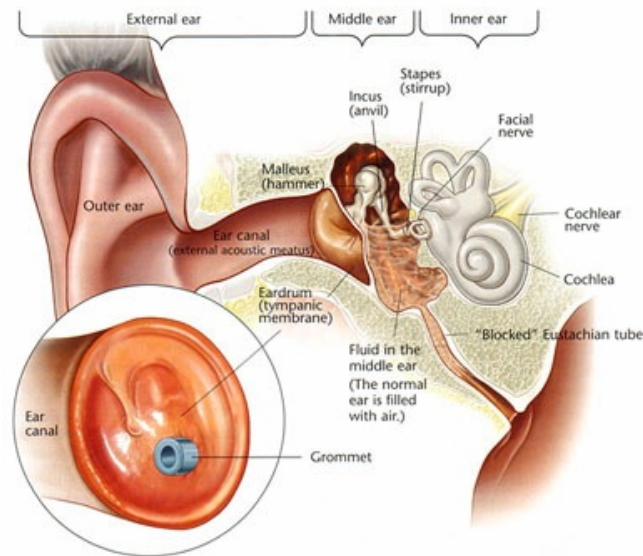
Η **εκκριτική ωτίτιδα** ή αλλιώς **μέση ωτίτιδα με εξίδρωμα (otitis media with effusion)** είναι η συσσώρευση άσηπτου υγρού στο μέσο αυτί έπειτα από απόφραξη ή δυσλειτουργία της ευσταχιανής σάλπιγγας, ενώ έχει περάσει κάποια λοίμωξη, αλλά με τον τυμπανικό υμένα αχέραιο. Αποτελεί τη συνηθέστερη αιτία παιδικής βαρηκοΐας.

Εμφανίζεται συνήθως στα παιδιά έπειτα από *οξεία μέση ωτίτιδα*, αλλά αναπτύσσεται και από μόνη της και μπορεί να μην προκαλεί συμπτώματα, αλλά εάν παραμείνει το υγρό για μεγάλο χρονικό διάστημα μπορεί να προκληθεί προσωρινή απώλεια ακοής ή μόνιμη βαρηκοΐα από *συμφυτική ωτίτιδα*. Σε ενήλικες προμηνύει *καρκίνο του ρινοφάρυγγα*.

Συμπτώματά της είναι η *βαρηκοΐα αγωγιμότητας*, το *αίσθημα βουλώματος-πληρότητας* του αυτιού, *εμβοές* ή σπανιότερα *ζάλη* και *ίλιγγος*. Η διάγνωση γίνεται με ωτοσκόπηση, όπου η τυμπανική μεμβράνη φαίνεται υποκίτρινη με μειωμένη κινητικότητα, ενώ μπορεί να φαίνεται και το υγρό από πίσω της. Με το τυμπανόγραμμα γίνεται τελικά σίγουρη η διάγνωση. [44]

Οι απώλειες στην ακοή φτάνουν έως και τα 30 - 35 dB και είναι μεγαλύτερες στις χαμηλές συχνότητες. Οφείλονται σε μείωση της οσταριακής σύζευξης, ενώ συγκεκριμένα για συχνότητες άνω των 1000 Hz, στην αύξηση της μάζας του συστήματος λόγω της παρουσίας του υγρού και τη μηχανική φόρτιση του τυμπανικού υμένα, ενώ κάτω των 1000 Hz, στην αύξηση της δυσκαμψίας του συστήματος λόγω της μείωσης του όγκου της τυμπανικής κοιλότητας. Έχει παρατηρηθεί επίσης, ότι το ιξώδες του υγρού δεν επηρεάζει τη συνολική απώλεια της ακοής. [8]

Η θεραπεία περιλαμβάνει χορήγηση φαρμάκων και φούσκωμα μπαλονιών από τον ασθενή για τη διάνοιξη της ευσταχιανής σάλπιγγας. Εάν σε 3 μήνες δεν υποχωρήσει το υγρό ή γίνει παχύρευστο πραγματοποιείται μυριγοτομή και τοποθέτηση σωληνίσκων αερισμού (grommets), όπως δείχνει η Εικόνα 22. [44]



Εικόνα 22: Μυριγγοτομή και τοποθέτηση σωληνίσκου αερισμού [12]

3.5.6 Διακοπή οσταριακής αλυσίδας με ακέραια τυμπανική μεμβράνη

Η διακοπή της οσταριακής αλυσίδας (**ossicular chain dislocation**) μπορεί να προκύψει από **κάταγμα του κροταφικού οστού** ή από **αερωτίτιδα (βαρότραυμα)**, δηλαδή απότομες αλλαγές στην πίεση της κοιλότητας του μέσου ωτός [45]. Στην περίπτωση αυτή, η μετάδοση του ήχου γίνεται μόνο μέσω της ακουστικής σύζευξης, δηλαδή χωρίς καθόλου οσταριακή αλυσίδα.

Η απώλεια του ήχου φτάνει τα 60 dB, εφόσον η ακουστική σύζευξη είναι κατά το ίδιο ποσό ασθενέστερη από την οσταριακή σύζευξη. Είναι το μεγαλύτερο χάσμα μεταξύ αέρινης και οστέινης αγωγής του ήχου που παρατηρείται σε βαρηκοΐα αγωγιμότητας.

Η αποκατάσταση της αλυσίδας γίνεται είτε με οσταριακό μόσχευμα (συνήθως από τον άκμονα), είτε με τεχνητή πρόθεση (Middle Ear Top - Porp). Η δομή της αποκατάστασης δε χρειάζεται να είναι σύνθετη, αρκεί να υπάρχει καλή και σταθερή σύζευξη μεταξύ του τυμπανικού υμένα και της βάσης του αναβολέα. Παράμετροι που επηρεάζουν το τελικό αποτέλεσμα είναι η μάζα της πρόθεσης, η δυσκαμψία της, η θέση της και η σύζευξή της με τα απομεινάρια της οσταριακής αλυσίδας. [8]

4 Το γεωμετρικό μοντέλο της κοιλότητας του μέσου ωτός

4.1 Εισαγωγή

Οι έρευνες που διεξάγονται για τη φυσιολογία και την παθολογία του αυτιού είναι συνήθως κλινικές και χρησιμοποιούν συνήθεις ακουολογικές ή απεικονιστικές μελέτες. Τα μη επεμβατικά διαγνωστικά εργαλεία επιπρόσθετα, συνήθως δεν επαρκούν στο να δίνουν τις απαραίτητες πληροφορίες για τη φυσιολογία της ακοής είτε να προβλέπουν τα αποτελέσματα μεθόδων αποκατάστασης.

Η μελέτη της μηχανικής του ωτός είναι δύσκολη με μεθόδους *in vivo*, οπότε έχουν χρησιμοποιηθεί Laser Doppler Vibrometry (LDV) τεχνικές κυρίως *in vitro* και μόνο πολύ πρόσφατα. Οι πρωτοποριακές τεχνικές της χειρουργικής του μέσου ωτός μπορούν να εφαρμοστούν μόνο σε προσομοιώσεις κροταφικών οστών είτε απευθείας σε κλινικά πειράματα, που όμως είναι δύσκολο να προβλεφθεί το αποτέλεσμα για κάθε ασθενή ξεχωριστά.

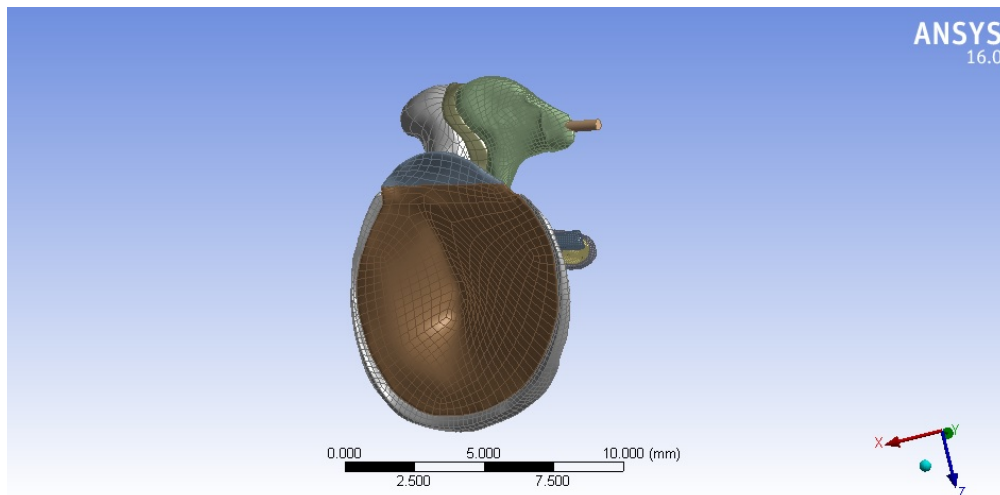
Οπότε, για να εξαλειφθούν αυτές όλες οι δυσκολίες, δημιουργούνται μαθηματικά μοντέλα μεγάλης πολυπλοκότητας και ακρίβειας, ειδικά με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, με την οποία μπορούν να αναπαρασταθούν τα σύνθετα χαρακτηριστικά του μέσου ωτός. [15]

4.2 Υπάρχον μοντέλο

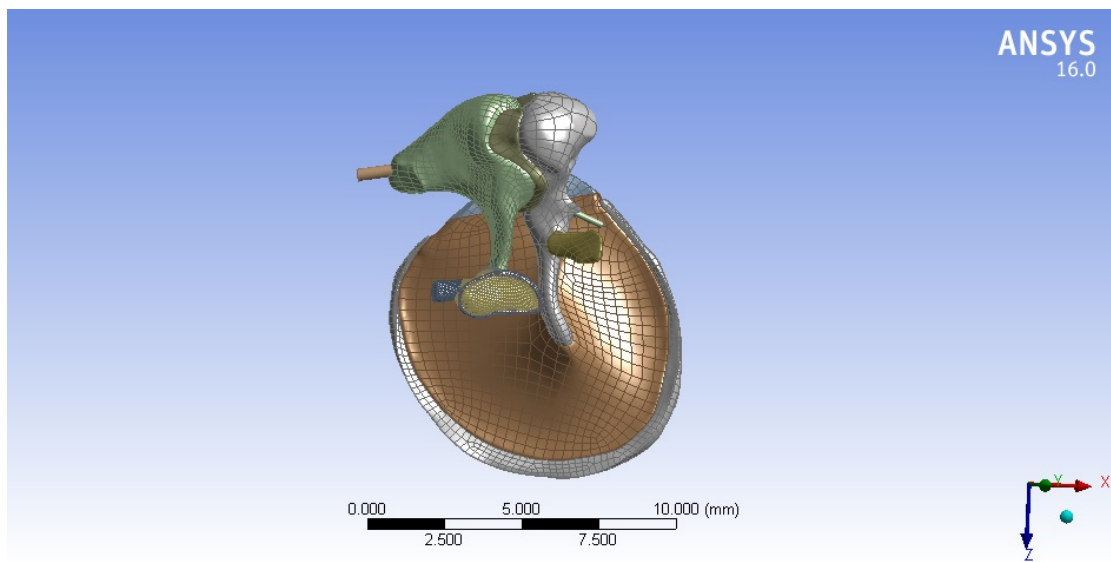
4.2.1 Δημιουργία και χαρακτηριστικά

Το υπάρχον μοντέλο είναι για την τυμπανική μεμβράνη και τα ακουστικά οστά-ρια και προέκυψε από ανακατασκευή δεδομένων από την απεικονιστική μέθοδο *microCT* σε κροταφικό οστό. Η έρευνα αυτή έγινε στο Τμήμα Ωτορινολαρυγγολογίας *Klinikum rechts der Isar*, στο Munich University of Technology (TUM), στη Γερμανία. Το αποτέλεσμα της μεθόδου αυτής ήταν να πάρουμε ένα λεπτομερές και ακριβές μοντέλο με όλα τα βασικά στοιχεία που χρειάζονται για την έρευνα πάνω στο μέσο αυτί. [20] [15]

Οι παρακάτω εικόνες παρουσιάζουν το μοντέλο στο πρόγραμμα που χρησιμοποιείται σε προσομοιώσεις, το ANSYS και συγκεκριμένα στο λογισμικό ANSYS WorkBench:



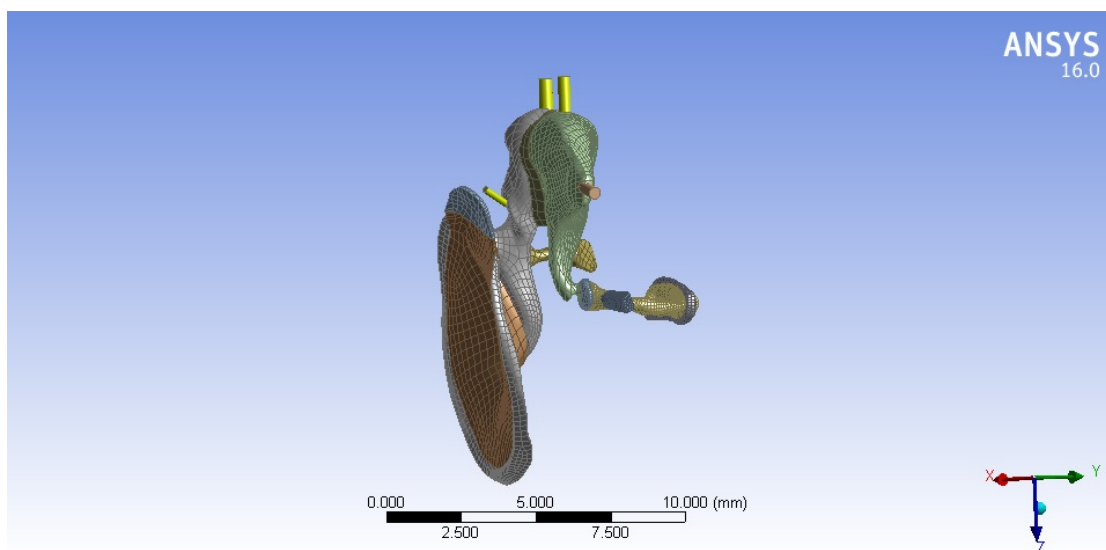
Εικόνα 23: Το αρχικό μοντέλο



Εικόνα 24: Το αρχικό μοντέλο

4.2.2 Προσθήκες

Το Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων έκανε κάποιες προσθήκες στο μοντέλο αυτό ώστε να αντιπροσωπεύει περισσότερο την πραγματικότητα. Οπότε η τρίτη προσπάθεια για την κατασκευή της κοιλότητας έγινε στο εχσυχρονισμένο μοντέλο, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί από μελοντικές μελέτες με περισσότερη ακρίβεια.



Εικόνα 25: Το ενημερωμένο μοντέλο

Με το κίτρινο χρώμα φαίνονται στο άνω μέρος οι προσθήκες που έγιναν.

4.3 Ανάγκη για κατασκευή της κοιλότητας

Η ανάγκη για την κατασκευή ενός μοντέλου για την κοιλότητα του μέσου ωτός προέκυψε από την αδυναμία προσομοίωσης διαφόρων ασθενειών, όπως π.χ. η διάτρηση της τυμπανικής μεμβράνης, έχοντας μόνο το σύστημα τυμπανικής μεμβράνης - ακουστικών οσταρίων. Αυτό συμβαίνει διότι μελετώνται μόνο οι εξαρτήσεις της μεμβράνης με τα οστά και παραλείπεται ο υπόλοιπος χώρος, που στην πραγματικότητα αλληλεπιδρά και αυτός μαζί τους. Με τη δημιουργία της κοιλότητας, υπάρχει η δυνατότητα να προστεθεί αέρας στον ενδιάμεσο χώρο, με αποτέλεσμα να προκύψει ένα πιο ολοκληρωμένο μοντέλο για το μέσο αυτί.

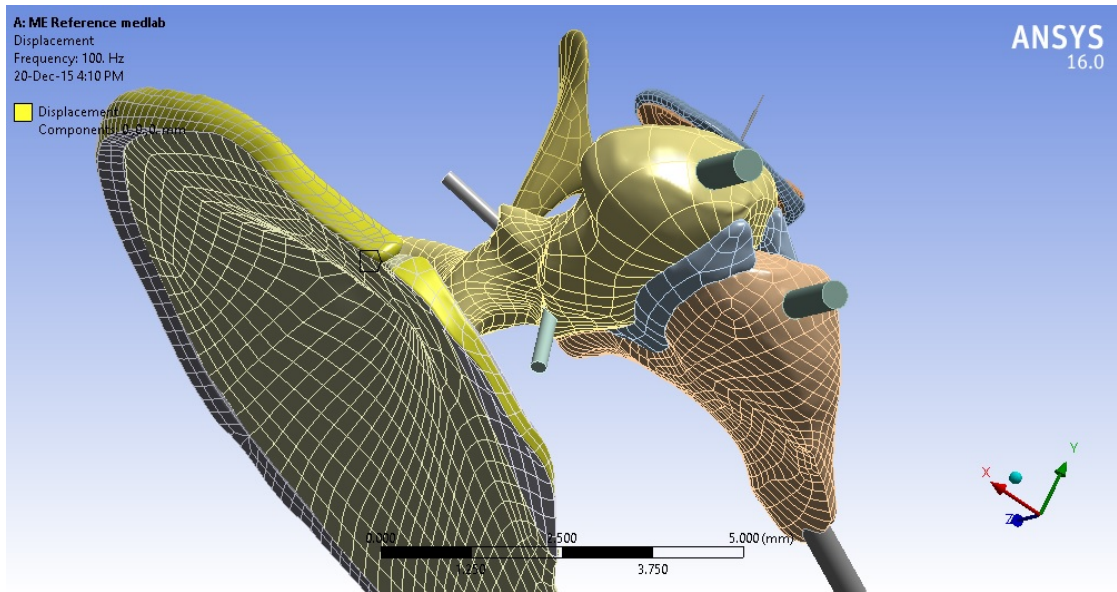
4.4 Σημεία αναφοράς για την κοιλότητα του μέσου ωτός

4.4.1 Οριακές συνθήκες

Η βασικότερη παράμετρος που πρέπει να ληφθεί υπόψη για την κατασκευή της κοιλότητας του μέσου ωτός είναι οι οριακές συνθήκες στο προϋπάρχον μοντέλο. Για να γίνουν οι προσομοιώσεις στις μελέτες που το χρησιμοποιούν ορίζονται κάποιες επιφάνειες οι οποίες έχουν μηδενική μετατόπιση (zero displacement) και συγκεκριμένα είναι οι επιφάνειες οι οποίες βρίσκονται στα άκρα και επικοινωνούν με άλλα μέρη του μέσου ωτός.

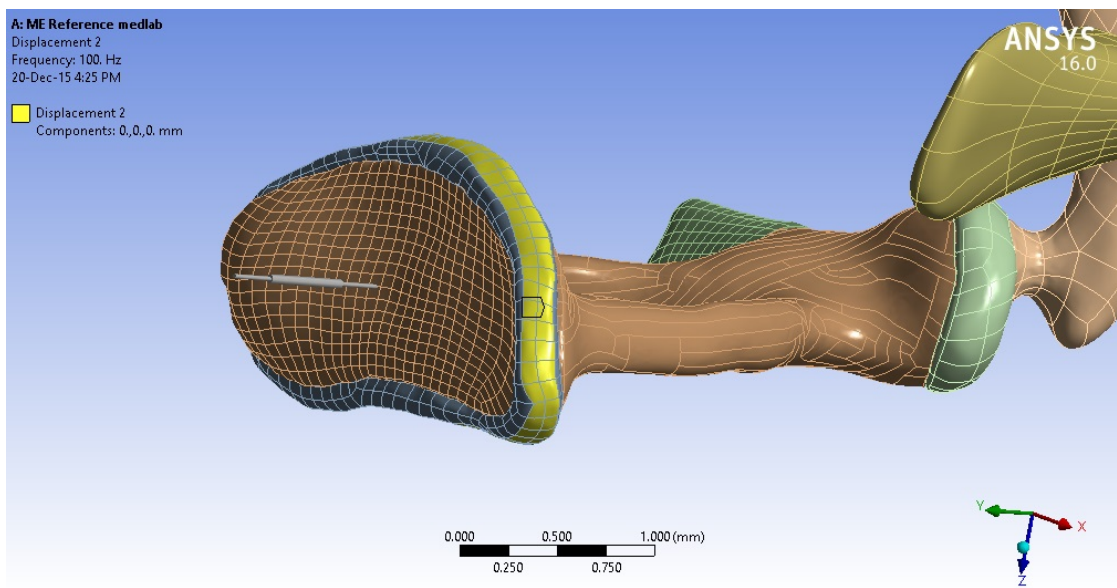
Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται με κίτρινο χρώμα όλες οι επιφάνειες που έχουν μηδενική μετατόπιση στο υπάρχον μοντέλο:

1. Περιφέρεια τυμπανικού δακτυλίου και χαλαρής μοίρας του τυμπανικού υμένα



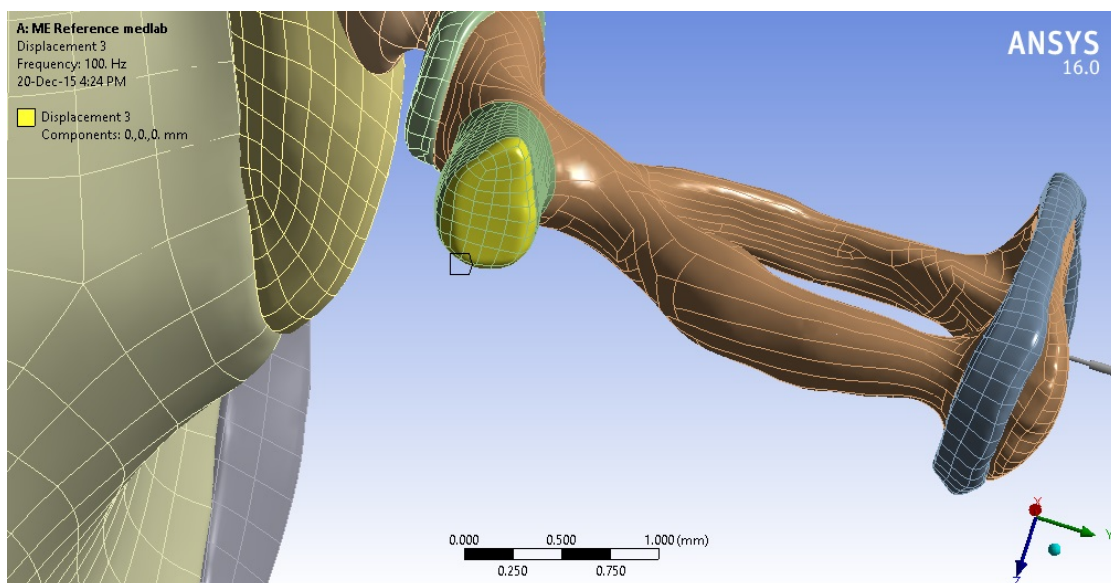
Εικόνα 26: Μηδενική μετατόπιση του τυμπανικού δακτυλίου και χαλαρής μοίρας

2. Περιφέρεια δακτυλιοειδούς συνδέσμου αναβολέα



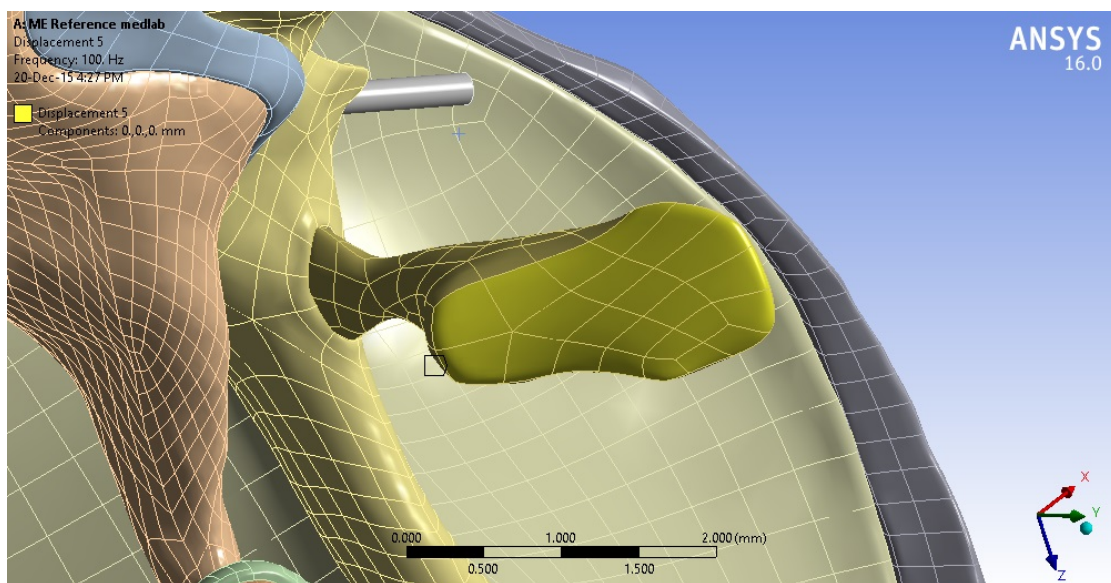
Εικόνα 27: Μηδενική μετατόπιση του συνδέσμου του αναβολέα

3. Ακραία σημεία του μυ του αναβολέα



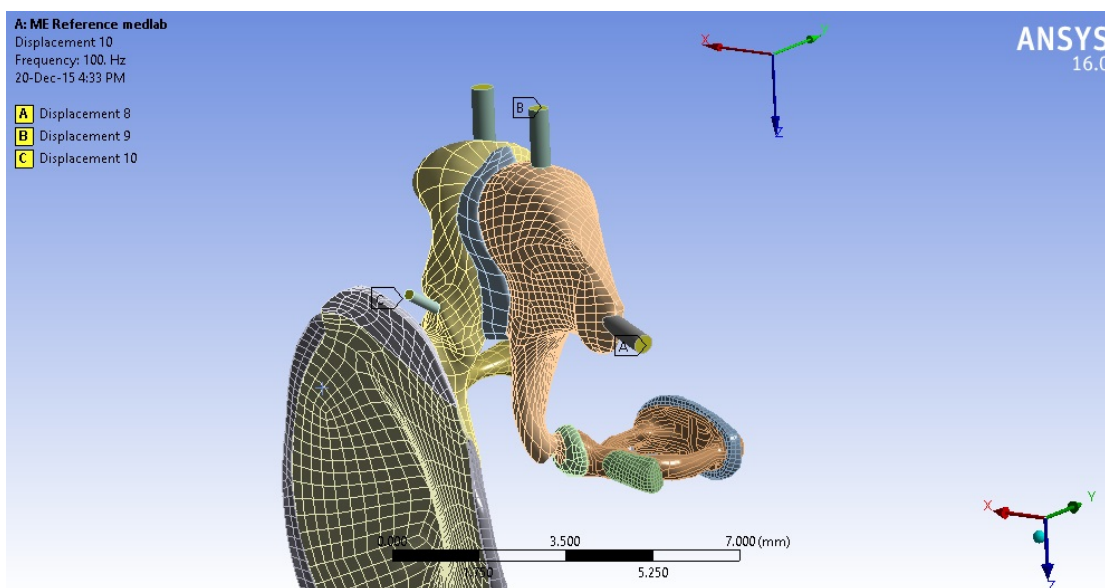
Εικόνα 28: Μηδενική μετατόπιση του μυ του αναβολέα

4. Ακραία σημεία του τείνοντα το τύμπανο μυ



Εικόνα 29: Μηδενική μετατόπιση του τείνοντα το τύμπανο μυ

5. Πρόσθετοι σύνδεσμοι με τη μορφή σχήματος κυλίνδρων



Εικόνα 30: Μηδενική μετατόπιση υπόλοιπων στοιχείων

Λαμβάνοντας υπόψιν αυτές τις οριακές συνθήκες, πρέπει η κοιλότητα του μέσου ωτός να κατασκευαστεί ώστε να εφάπτεται μόνο σε ακμές με μηδενική μετατόπιση. Η ίδια η κοιλότητα θα τεθεί αργότερα να έχει επίσης μηδενική μετατόπιση, αφού αποτελεί οριακή συνθήκη για την επαφή του μέσου ωτός με τα γύρω του στοιχεία της κεφαλής.

4.4.2 Όγκος

Ένα άλλο σημείο ενδιαφέροντος στην κοιλότητα είναι ο όγκος της, ο οποίος πρέπει να ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα. Κατά μέσο όρο η τυμπανική κοιλότητα περιέχει 2 ml αέρα, ενώ ο ελάχιστος όγκος αέρα για τη φυσιολογική λειτουργία του μέσου ωτός είναι 0.5 ml [3].

4.5 Κατασκευή του μοντέλου

Το μοντέλο της κοιλότητας του μέσου ωτός προορίζεται για προσομοιώσεις με το πρόγραμμα ANSYS, αλλά η σχεδίασή του γίνεται με το Solidworks 2015, το οποίο παρέχει μια πιο εύκολη επικοινωνία με το χρήστη και διαθέτει μια μεγάλη γκάμα σχεδιαστικών εργαλείων και αυτοματοποιημένων ενεργειών που διευκολύνουν τη σχεδίαση.

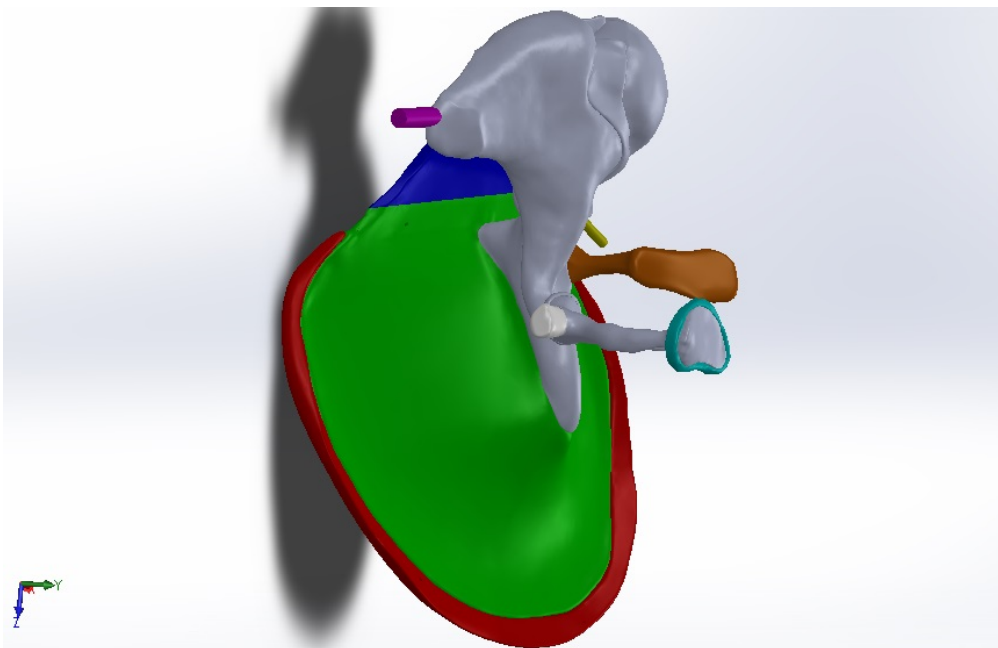
Αρχικά, πρέπει να γίνει η μεταφορά του υπάρχοντος μοντέλου από το ANSYS στο Solidworks. Έπειτα από δοκιμές, καθώς υπάρχουν πολλές μορφές αρχείων που εξάγονται τα μοντέλα, συμπεράστηκε ότι η πιο ασφαλής και χωρίς λάθη μορφή είναι η **Parasolid Text**, με κατάληξη αρχείου `.x_t`.

Από το λογισμικό Design Modeler του ANSYS επιλέγοντας *File*→*Export*, αποθηκεύεται το μοντέλο ως Parasolid Text. Έπειτα, η εισαγωγή στο Solidworks είναι εύκολη, αφού με απλό άνοιγμα αρχείου το ίδιο το πρόγραμμα το μετατρέπει σε μορφή **Part**, με κατάληξη *.SLDPRT*.

Οι πρώτες δύο προσπάθειες κατασκευής έγιναν πάνω στο αρχικό μοντέλο, ενώ η τρίτη έγινε πάνω στο ενημερωμένο.

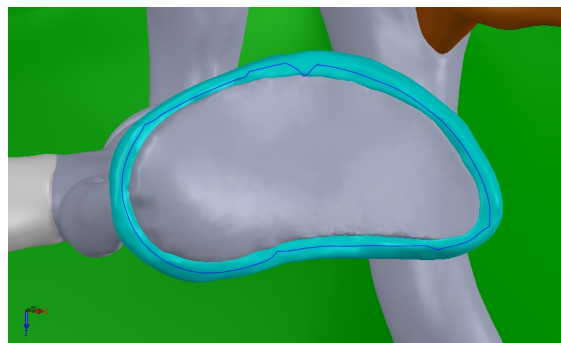
4.5.1 Πρώτη προσπάθεια κατασκευής

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το αρχικό μοντέλο όπως εισάχθηκε στο Solidworks, με χρωματισμένα τα σημεία ενδιαφέροντος, δηλαδή αυτά τα οποία περιέχουν πλευρές με μηδενική μετατόπιση.



Εικόνα 31: Αρχικό μοντέλο στο Solidworks

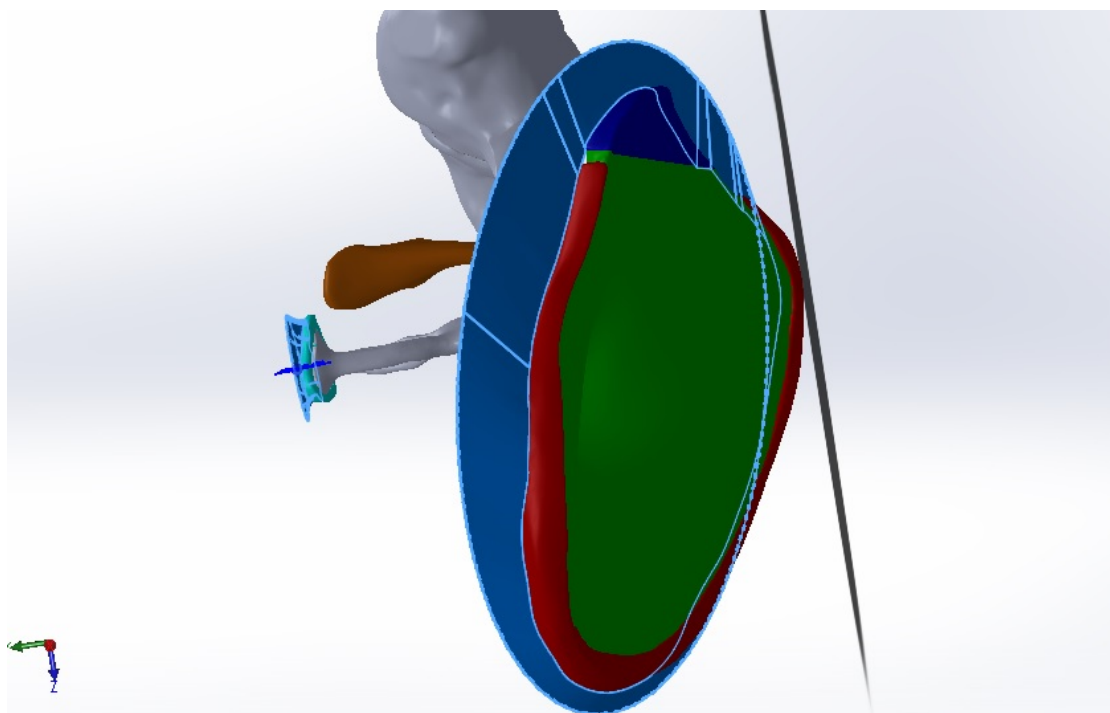
• Αρχικά σε συνδυασμό με τις Εικόνες 26 - 30 και χρησιμοποιώντας μεγάλη εστίαση (zoom), βρέθηκαν οι συγκεκριμένες ακμές - σύνορα με την κοιλότητα του μέσου ωτός. Με τη βιβλιοθήκη **Sketch** του Solidworks επιλέχθηκαν όλες οι ακμές και χωρίστηκαν σε ομάδες(καμπύλες) με το εργαλείο *Composite Curve*. Η Εικόνα 32 δείχνει την επιλογή μιας τέτοιας ακμής



Εικόνα 32: Composite Curve

στο δακτυλιοειδή σύνδεσμο του αναβολέα.

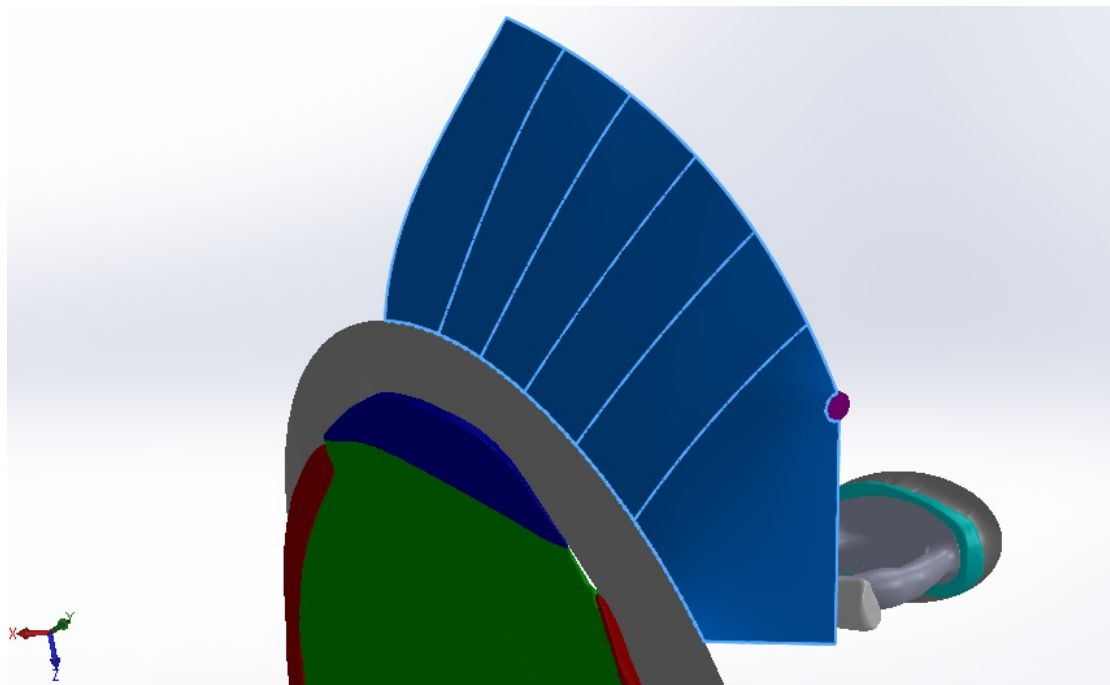
- Από τις καμπύλες του τυμπανικού δακτυλίου μαζί με την χαλαρή μοίρα και του συνδέσμου του αναβολέα, δημιουργήθηκαν οι δύο πρώτες βασικές επιφάνειες που φαίνονται στην Εικόνα 33. Για να γίνει αυτό χρησιμοποιήθηκε η βιβλιοθήκη **Surfaces** και συγκεκριμένα τα εργαλεία *Lofted Surface* και *Boundary Surface*. Τα εργαλεία αυτά επιτρέπουν τη δημιουργία επιφάνειας ανάμεσα σε δύο κλειστές καμπύλες. Η δεύτερη καμπύλη που χρησιμοποιήθηκε για τον τυμπανικό δακτύλιο ήταν κύκλος, ενώ για τον αναβολέα έλλειψη και σχεδιάστηκαν πάνω σε ένα επίπεδο αναφοράς σε μικρή απόσταση από τις αρχικές καμπύλες, με το εργαλείο *Reference Geometry*→*Plane*.



Εικόνα 33: Αρχικές επιφάνειες

- Έπειτα, έχοντας αυτές τις δύο αρχικές επιφάνειες ως αρχή και τέλος, πρέπει το σχήμα να κλείσει με μία επιφάνεια η οποία να περικλείει όλα τα μέρη του μοντέλου, αλλά και να εφάπτεται μόνο σε ακμές που έχουν μηδενική μετατόπιση. Στην προσπάθεια να επιτευχθεί αυτό με ένα βήμα, όλες οι απόπειρες απέτυχαν. Συμπερασματικά, η τελική επιφάνεια πρέπει να είναι χωρισμένη σε τμήματα - επιφάνειες, οι οποίες ενώνονται μεταξύ τους. Το βασικό εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε εδώ είναι το *Filled Surface*, το οποίο δημιουργεί μια επιφάνεια στην περιοχή μιας κλειστής καμπύλης. Οι κλειστές καμπύλες δημιουργούνται με *Splines*, τα οποία σχεδιάζονται στο χώρο με το *3D Sketch*. Σημαντικό στοιχείο του *Filled Surface* είναι η

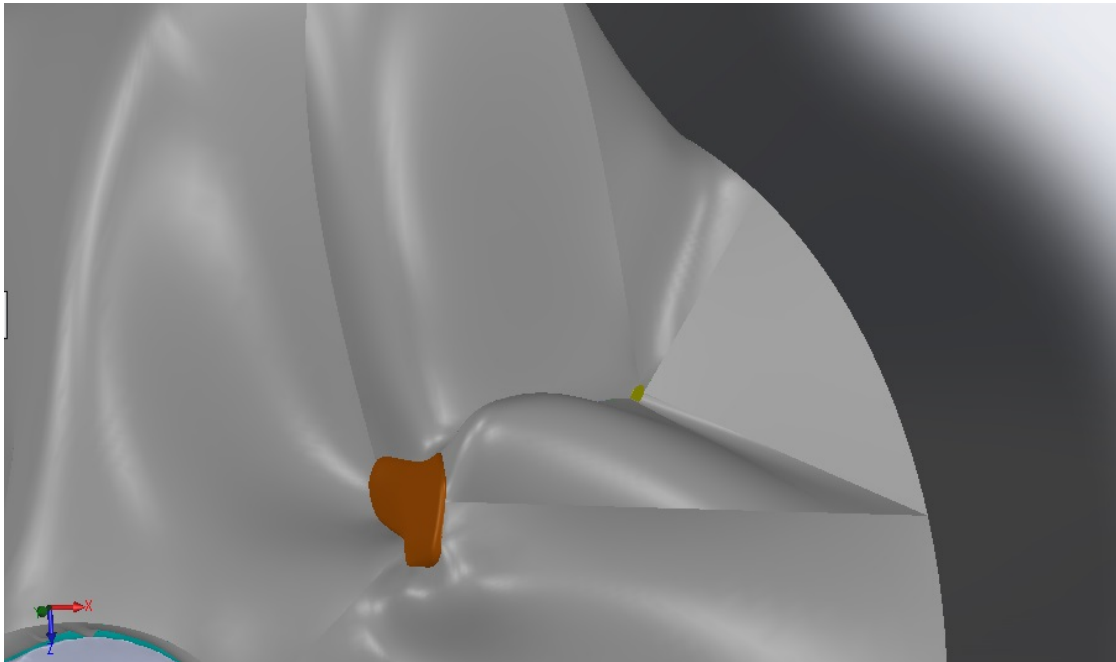
δυνατότητα να οριστούν καμπύλες οδηγού, ώστε η παραγόμενη επιφάνεια να πάρει το επιθυμητό σχήμα. Αυτοί οι οδηγοί είναι επίσης *Splines* τα οποία σχεδιάστηκαν κατάλληλα για κάθε επιφάνεια - τμήμα ξεχωριστά.



Εικόνα 34: Σχεδίαση μιας επιμέρους επιφάνειας

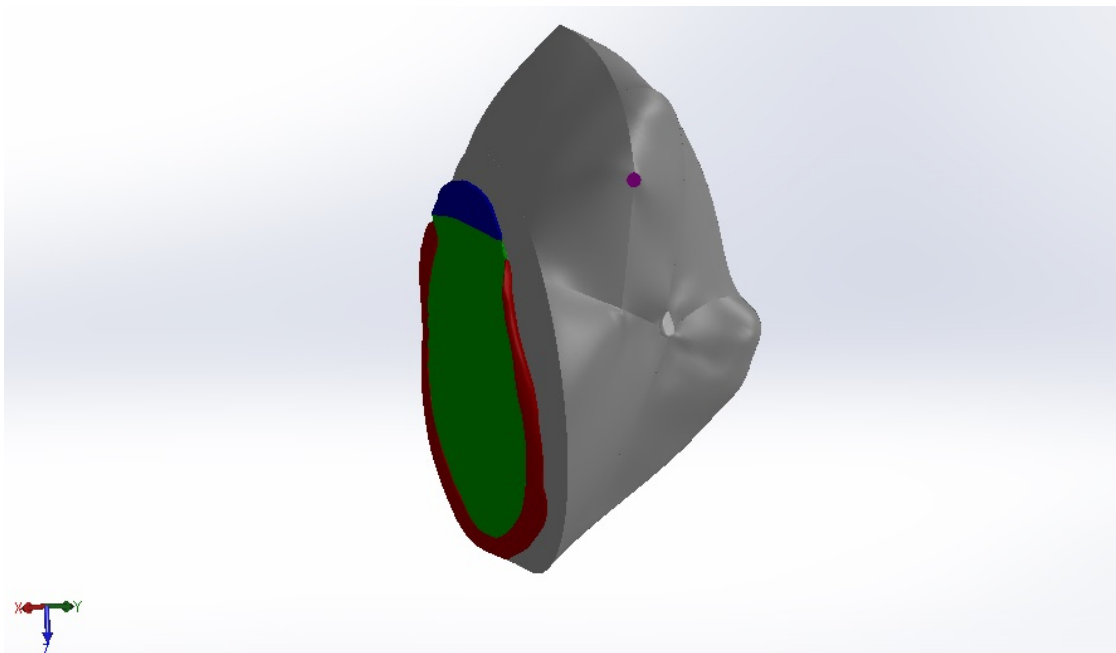
Η Εικόνα 34 παρουσιάζει την πρώτη από αυτές τις επιφάνειες - τμήματα. Παρατηρούμε ότι τηρεί τις οριακές συνθήκες, αφού είναι εφαπτόμενη στη βάση του κυλινδρικού στοιχείου(μωβ χρώμα), η οποία έχει μηδενική μετατόπιση σύμφωνα με την Εικόνα 30.

- Η διαδικασία κατασκευής των επιμέρους επιφανειών συνεχίζεται για όλο τον υπόλοιπο χώρο που πρέπει να καλυφθεί. Υπάρχουν αρκετές δυσχέρειες λόγω του σύνθετου σχήματος, όπως για παράδειγμα στην Εικόνα 35, όπου πρέπει η εξωτερική επιφάνεια να εφάπτεται στις ακμές μηδενικής μετατόπισης του τείνοντος το τύμπανο μυ(καφέ), αλλά και στη βάση του κυλινδρικού συνδέσμου(κίτρινο). Με αυτό τον τρόπο δημιουργούνται κάποιες αναπόφευκτες παραμορφώσεις, που όμως δεν επηρεάζουν το τελικό αποτέλεσμα, καθώς δεν είναι στόχος να γίνει ακριβής αντιγραφή της ανατομίας του μέσου ωτός, αλλά απλώς να τηρηθούν οι οριακές συνθήκες.

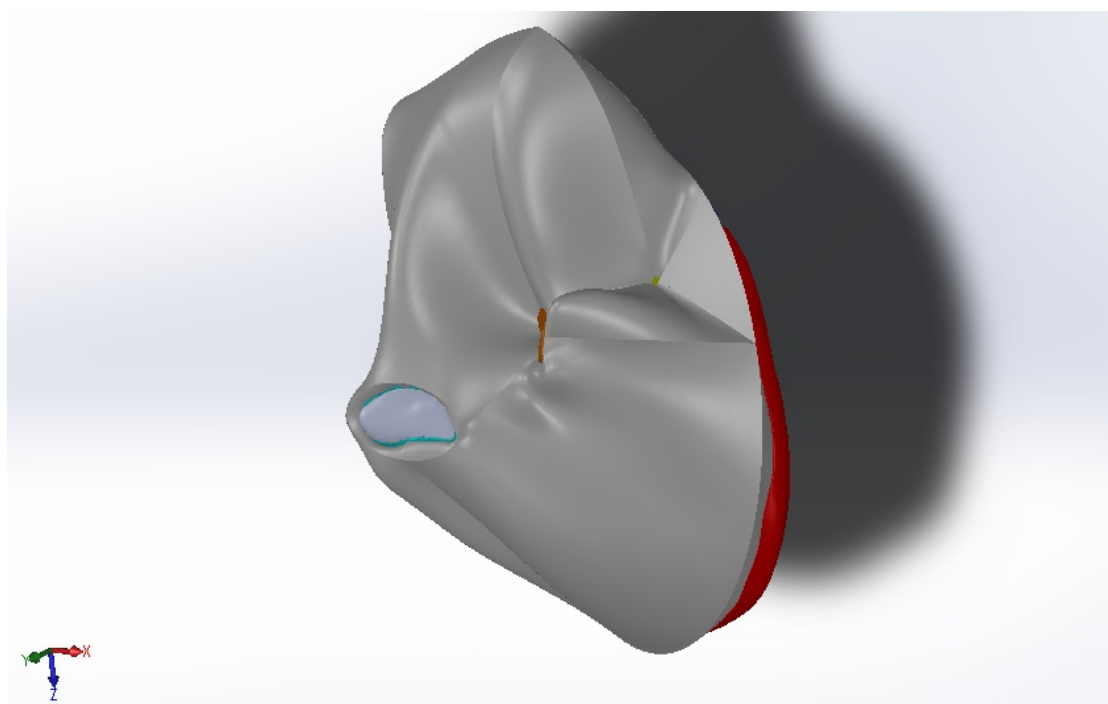


Εικόνα 35: Σημείο δυσκολίας στη σχεδίαση

- Η πρώτη τελική κοιλότητα μέσου ωτός φαίνεται στις Εικόνες 36 - 37



Εικόνα 36: 1η κοιλότητα μέσου ωτός - 1η όψη



Εικόνα 37: 1η κοιλότητα μέσου ωτός - 2η όψη

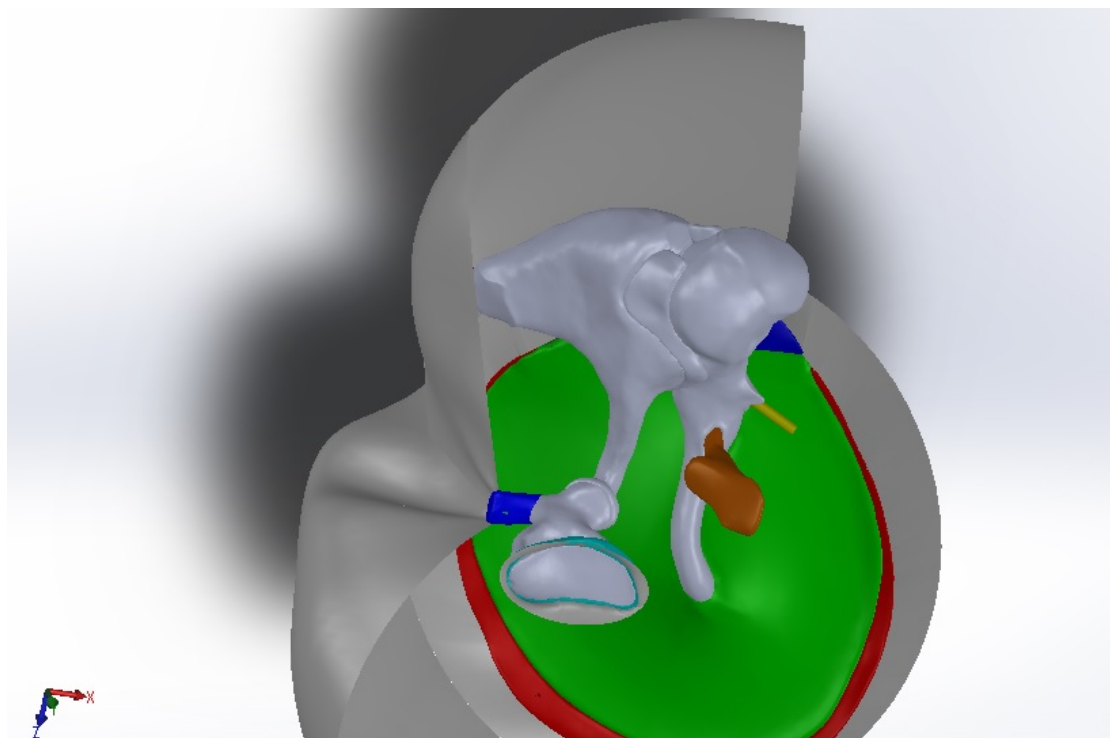
• Αυτό που απομένει είναι ο έλεγχος του όγκου της κοιλότητας, ώστε αυτή να είναι χρήσιμη σε πειράματα προσομοίωσης. Εφόσον το πρόγραμμα δε γνωρίζει από μόνο του ότι έχουμε μια κλειστή επιφάνεια, η οποία έχει μέσα κάποια στερεά σώματα (οστάρια), πρέπει να οριστεί μια επιφάνεια που περικλείει όλο το μοντέλο. Αυτό γίνεται με το εργαλείο *Knit Surface* της βιβλιοθήκης **Surfaces**. Όμως, πολλά από τα όρια του μοντέλου είναι στερεά σώματα (Τυμπανικός υμένας, αναβολέας, τείνων το τύμπανο μυς κτλ.), οπότε το εργαλείο θα αποτύχει όταν τα επιλέξουμε.

Επομένως, τα σώματα που δημιουργούν τρύπες στην κοιλότητα, κρύφθηκαν με την επιλογή *Hide* στο **FeatureManager Design Tree** και σχεδιάστηκαν επιφάνειες που κλείνουν τις τρύπες αυτές με το εργαλείο *Filled Surface*. Έπειτα, επιλέχθηκαν όλες οι εξωτερικές επιφάνειες και ενώθηκαν με το *Knit Surface*, όπως προαναφέραμε και τέλος, με το εργαλείο *Thicken* της ίδιας βιβλιοθήκης και την επιλογή του: *Create solid from enclosed volume*, δημιουργήθηκε ένα στερεό σώμα του οποίου ο όγκος μπορεί να μετρηθεί εύκολα πλέον. Αυτό γίνεται από την καρτέλα βιβλιοθήκης **Evaluate** και συγκεκριμένα από το εργαλείο *Mass Properties*, το οποίο έδωσε αποτέλεσμα: *0.427 ml*.

Παρατηρούμε λοιπόν, ότι ο όγκος δεν είναι επαρκής για να καλύψει τα πραγματικά δεδομένα και παρόλο που το μοντέλο της κοιλότητας καλύπτει όλες τις οριακές συνθήκες και περικλείει όλο το σύστημα οσταρίων, πρέπει να τροποποιηθεί ώστε να έχει μεγαλύτερο όγκο.

4.5.2 Δεύτερη προσπάθεια κατασκευής

Στη δεύτερη προσπάθεια κατασκευής της κοιλότητας του μέσου ωτός, σκοπός ήταν οι επιφάνειες να βρίσκονται πιο μακριά από τα εσωτερικά στοιχεία της κοιλότητας και συνεπώς οι άκρες τους να πέφτουν ακόμα πιο κάθετα πάνω στις ακμές με μηδενική μετατόπιση. Παράδειγμα αυτής της μεθόδου αποτελεί η Εικόνα 38 η οποία δείχνει ότι έχει ληφθεί μεγαλύτερη απόσταση της εξωτερικής

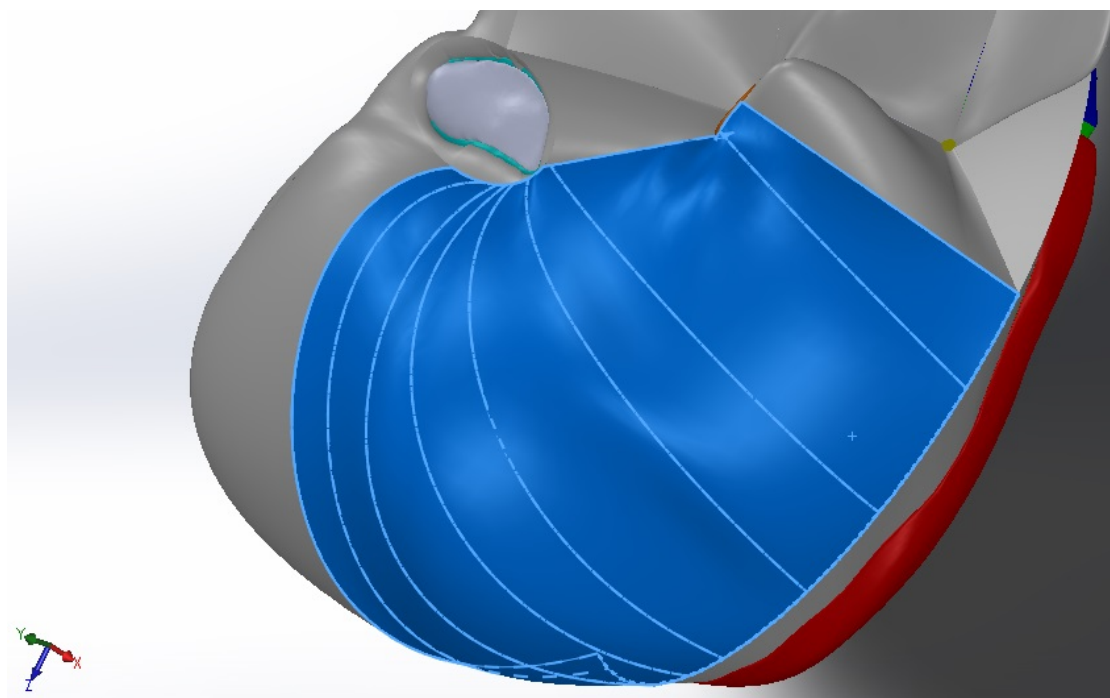


Εικόνα 38: Ενδιάμεσο βήμα στη δεύτερη προσπάθεια κατασκευής

επιφάνειας πάνω από τη σφύρα και τον άκμονα, ώστε να εξασφαλιστεί μεγαλύτερος όγκος, καθώς και η απότομη κλίση των επιμέρους επιφανειών προς το μυ του αναβολέα(μπλε).

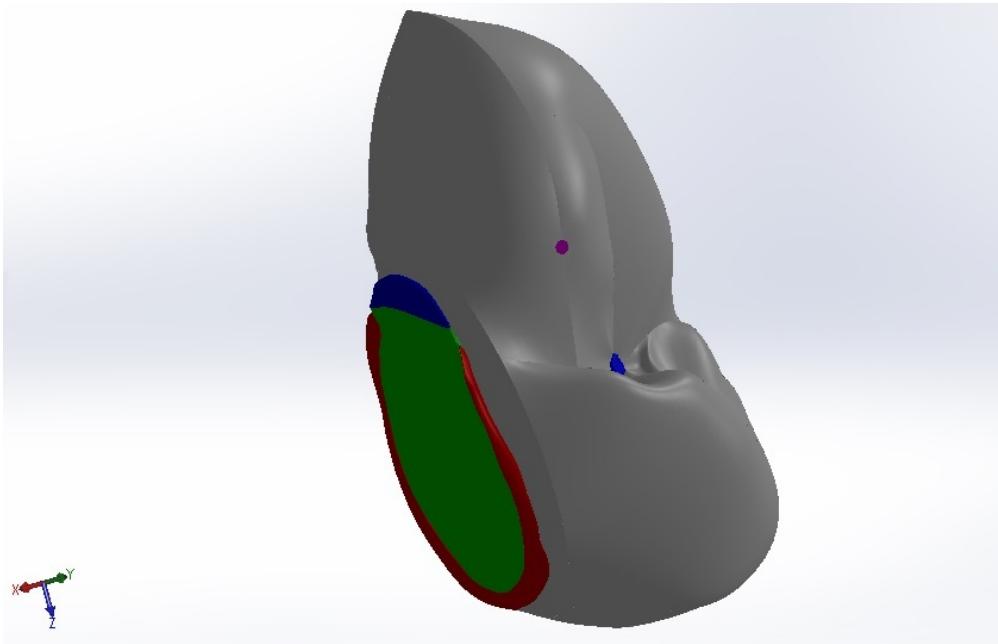
- Τα βήματα που πρέπει να ακολουθηθούν είναι σχεδόν ταυτόσημα με την πρώτη προσπάθεια κατασκευής. Εφόσον όμως υπάρχουν ήδη οι επιμέρους επιφάνειες, ένας πρώτος τρόπος θα ήταν να αλλαχθούν τα όριά τους και οι καμπύλες οδηγούς της καθεμίας, ώστε να επιτευχθεί το νέο σχήμα. Το πρόγραμμα Solidworks όμως, διατηρεί ισχυρές σχέσεις μεταξύ αντικειμένων που εφάπτονται, τέμνονται, είναι παράλληλα κτλ., τα λεγόμενα **Automatic Relations**. Οπότε, όταν τροποποιηθεί μια επιφάνεια, όλες οι υπόλοιπες που έχουν κάποια σχέση με αυτή παρουσιάζουν σφάλμα και ακυρώνεται η κατασκευή τους.

- Η διαδικασία λοιπόν, γίνεται πάλι βήμα βήμα, αλλάζοντας κάθε μια επιφάνεια ξεχωριστά και ορίζοντας καινούργια όρια ώστε να καλυφθούν οι νέες απαιτήσεις. Αυτή τη φορά οι καμπύλες - οδηγοί είναι πολύ καμπυλωτές, όπως στην Εικόνα 39 παρακάτω, ώστε να καλυφθεί όσο περισσότερος όγκος γίνεται, χωρίς όμως να δημιουργηθούν ακραίες γεωμετρίες. Οι παραμορφώσεις που δημιουργούνται πάλι από το εργαλείο *Filled Surface* είναι αναπόφευκτες και μάλιστα πιο αισθητές αυτή τη φορά, επειδή η γεωμετρία περιέχει μεγαλύτερες επιμέρους επιφάνειες με μεγαλύτερη καμπυλότητα, οπότε το εργαλείο δεν αντιλαμβάνεται ακριβώς τη γεωμετρία που θέλουμε εμείς να του ορίσουμε με τις οδηγούς καμπύλες.

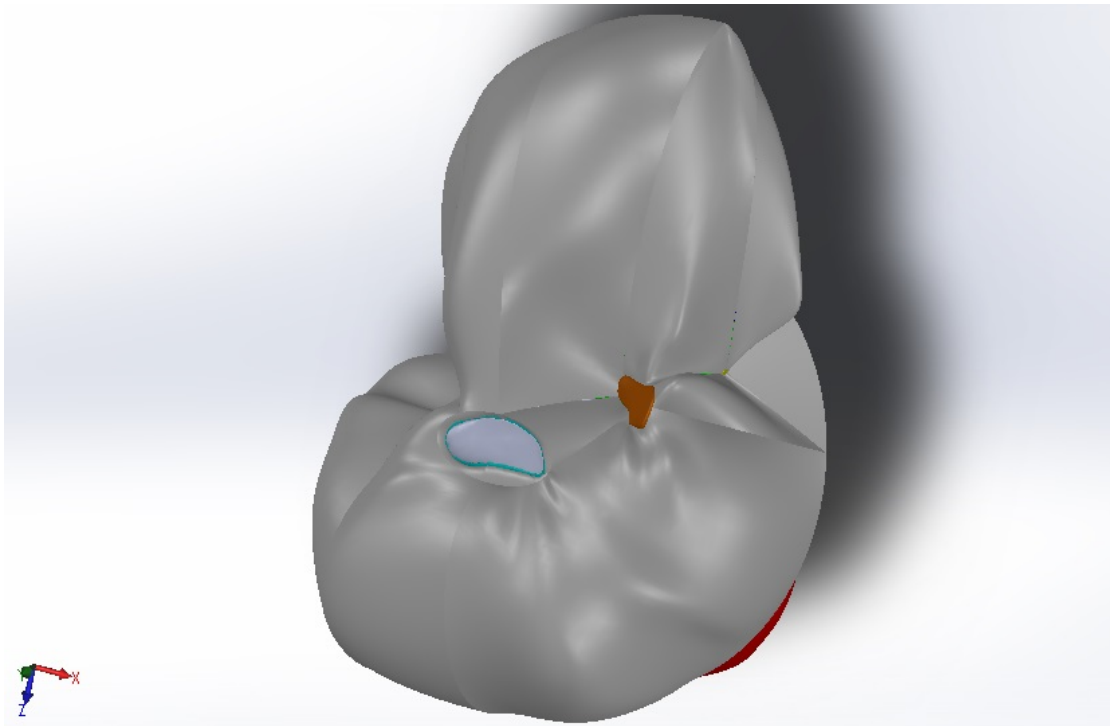


Εικόνα 39: Μεγάλη καμπυλότητα Splines σε επιμέρους επιφάνεια

- Το τελικό μοντέλο της δεύτερης προσπάθειας κατασκευής φαίνεται στις Εικόνες 40 - 41



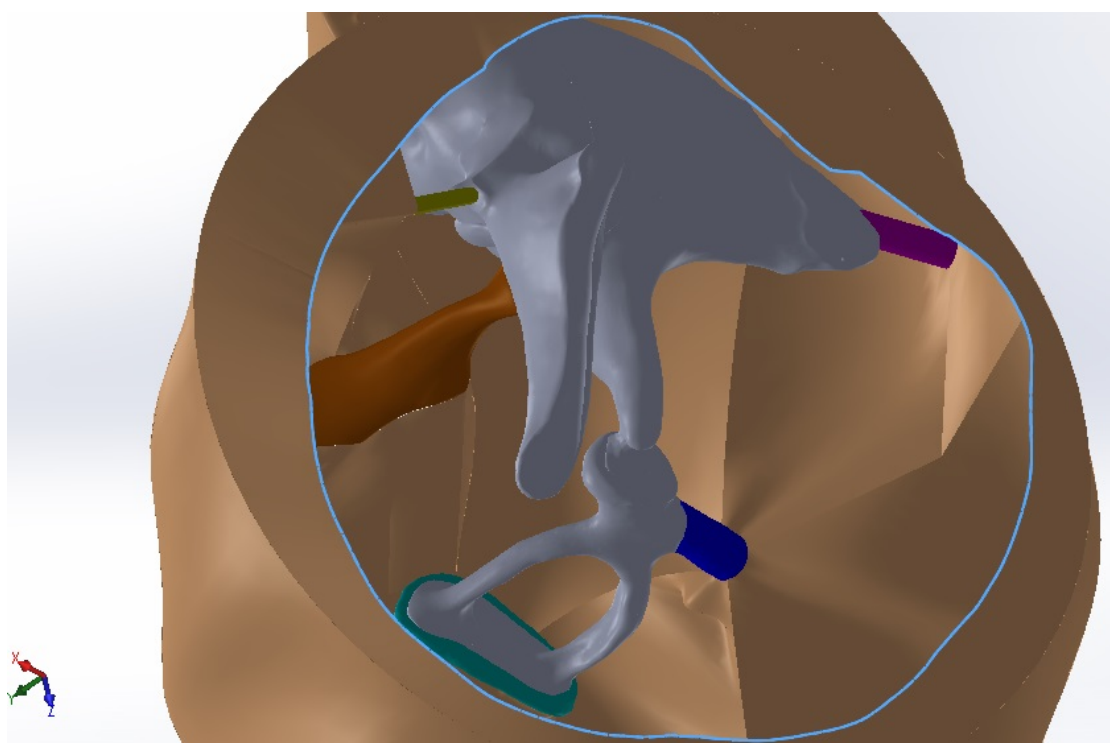
Εικόνα 40: 2η κοιλότητα μέσου ωτός - 1η όψη



Εικόνα 41: 2η κοιλότητα μέσου ωτός - 2η όψη

Ενδιαφέρον παρουσιάζει μάλιστα η όψη μέσα από τον τυμπανικό υμένα, έχοντας κρύψει με *Hide* τον υμένα, τον τυμπανικό δακτύλιο και τη χαλαρή μούρα. Η γαλάζια γραμμή δείχνει το όριο από όπου ξεκινάει η κοιλότητα, δηλαδή την επαφή της με την περιφέρεια του τυμπανικού δακτυλίου. Με αυτή την όψη φαίνεται η επαφή με όλες τις ακμές μηδενικής μετατόπισης, καθώς και η κάλυψη όλου του συστήματος των οσταρίων.

• Όσον αφορά τον όγκο, ακολουθείται η ίδια διαδικασία, αφαιρώντας τα οριακά σώματα, κλείνοντας τις τρύπες με επιφάνειες και σχηματίζοντας το ενιαίο στερεό του οποίου ο όγκος μετριέται αυτόματα από το *Evaluate*→*Mass Properties*. Στη δεύτερη προσπάθεια λοιπόν, ο όγκος υπολογίζεται: *0.83 ml*.



Εικόνα 42: Εσωτερική όψη

Ο όγκος της κοιλότητας αυτή τη φορά διπλασιάστηκε και είναι πάνω από το όριο του 0.5 ml, αλλά και πάλι παρατηρείται ότι δε μπορεί να φτάσει αρκετά ανώτερα όρια, λόγω της εξάρτησής του από τις οριακές συνθήκες. Οι επιφάνειες που πρέπει να εφάπτονται στις ακμές με μηδενική μετατόπιση περιορίζουν το σχήμα της κατασκευής και σε μία νέα προσπάθεια για μεγαλύτερο όγκο θα παραμόρφωναν τόσο πολύ την κατασκευή που θα ήταν δύσχερηστη. Επιπλέον, το πρόγραμμα ANSYS στο οποίο θα εισαχθεί το μοντέλο ώστε να πραγματοποιηθεί ανάλυση με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων, δε θα μπορεί εύκολα να δημιουργήσει το πλέγμα σε μία

πολύπλοκη γεωμετρία, ή θα κάνει το πλέγμα πολύ σύνθετο με αποτέλεσμα να μην είναι χρήσιμο.

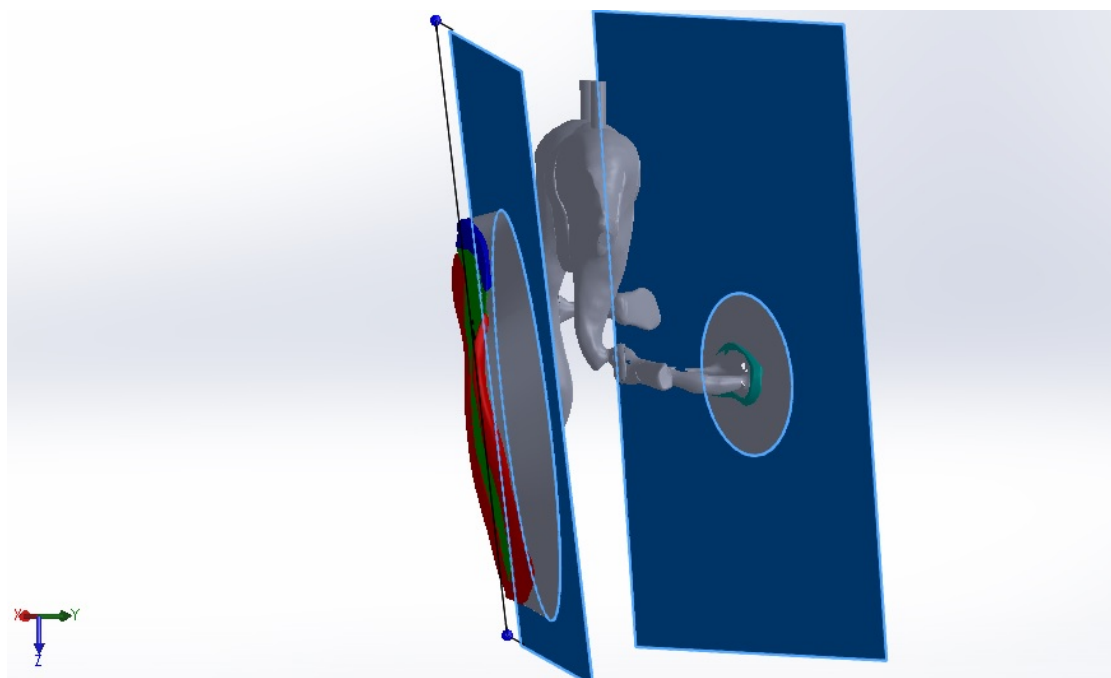
4.5.3 Τρίτη προσπάθεια κατασκευής

Στην τρίτη και τελευταία προσπάθεια κατασκευής γίνονται κάποιες παραδοχές:

1. Οι επιφάνειες μηδενικής μετατόπισης δε χρειάζεται να βλέπουν στον εξωτερικό χώρο, αλλά μπορούν να είναι και μέσα στην κοιλότητα. Αυτή η παραδοχή έγινε με το σκεπτικό ότι το ANSYS όταν θα επιλύσει το μοντέλο, θα λάβει τις επιφάνειες αυτές με τον ίδιο τρόπο είτε είναι μέσα στην κοιλότητα είτε έξω.
2. Η κοιλότητα πρέπει οπωσδήποτε να ικανοποιεί τις οριακές συνθήκες στον τυμπανικό δακτύλιο και στον αναβολέα.
3. Το σχήμα της κοιλότητας του μέσου ωτός είναι παρόμοιο με ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο. Αυτή η παραδοχή έγινε αφού αφαιρέσαμε πολλές περιοριστικές παραμέτρους, ώστε να δοθεί ένα συγκεκριμένο σχήμα στην κοιλότητα.

- Τα πρώτα δύο βήματα παραμένουν ίδια με την πρώτη προσπάθεια κατασκευής. Δημιουργούνται οι δύο αρχικές επιφάνειες, μία στον τυμπανικό δακτύλιο με τη χαλαρή μοίρα και μία στον αναβολέα. Οι επιφάνειες αυτές είναι σημαντικές σε κάθε προσπάθεια κατασκευής διότι το πρόγραμμα δε μπορεί να διαχειριστεί καλά τις καμπύλες που έχουμε ορίσει στις δύο ακραίες συνθήκες, οπότε τις απλοποιούμε σε κύκλο και έλλειψη αντίστοιχα.

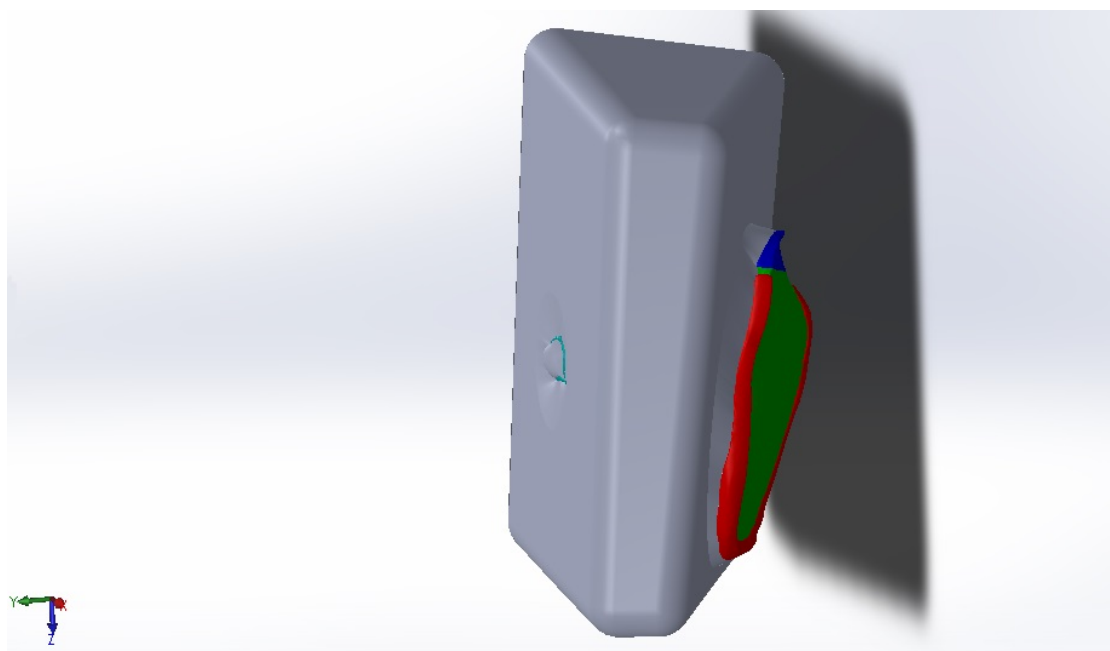
- Για να δημιουργηθεί το επιθυμητό ορθογώνιο σχήμα της κοιλότητας, χρησιμοποιούμε το εργαλείο της βιβλιοθήκης **Surfaces**, *Lofted Surface* και δημιουργούμε δύο τετράγωνα επιφάνειες με αρχικό προφίλ τις αρχικές του προηγούμενου βήματος. Το αποτέλεσμα φαίνεται στην Εικόνα 43.



Εικόνα 43: Τετράγωνες επιφάνειες - όρια της κοιλότητας

Οι ενδιάμεσες επιφάνειες μηδενικής μετατόπισης δε μας ενδιαφέρουν πλέον, οπότε περικλείονται όλες μέσα στο μοντέλο της κοιλότητας που θα δημιουργηθεί σε αυτό το βήμα. Αυτό θα φανεί καλύτερα στην επόμενη ενότητα όπου θα γίνει εισαγωγή του μοντέλου στο ANSYS.

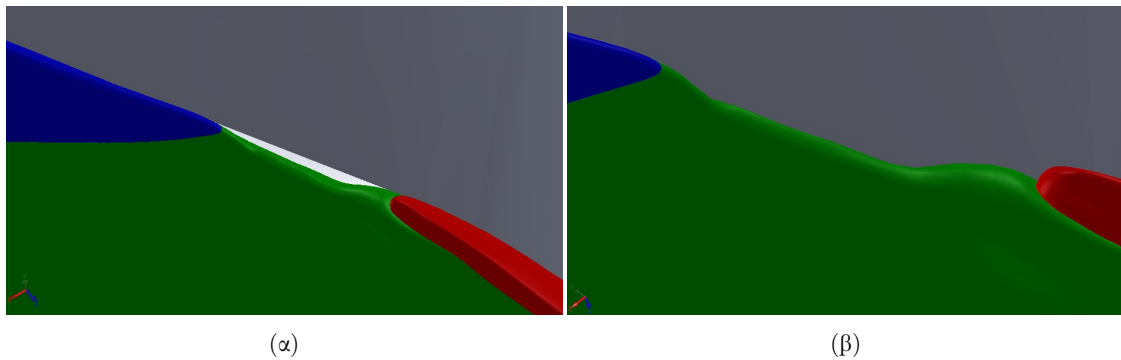
- Με ένα επιπλέον *Lofted Surface* κλείνονται οι τετράγωνες επιφάνειες σε παραλληλεπίπεδο σχήμα και τέλος εφαρμόζεται στις ακμές το εργαλείο *Fillet*, της βιβλιοθήκης **Features**, το οποίο εξομαλύνει τις γωνίες για να προκύψει το τελικό σχήμα της Εικόνας 44.



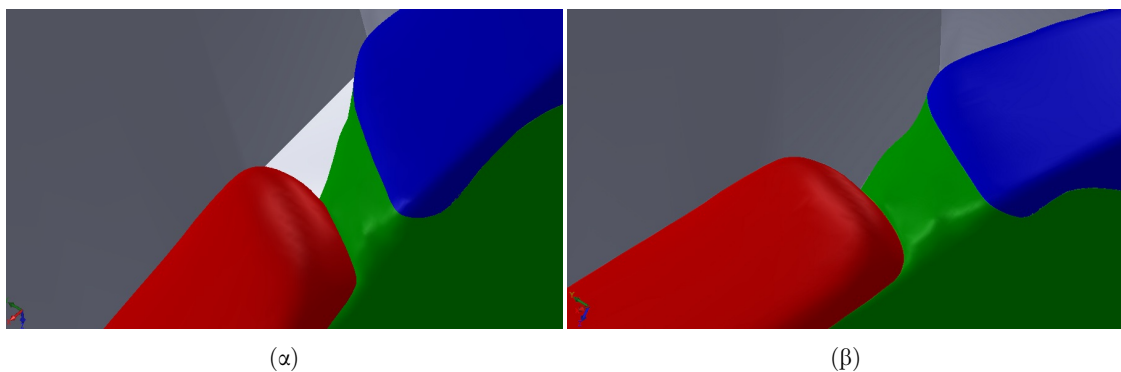
Εικόνα 44: 3η κοιλότητα μέσου ωτός

Το τελευταίο βήμα δεν πρέπει να θεωρηθεί προσθήκη που επηρεάζει μόνο αισθητικά το τελικό αποτέλεσμα. Πραγματοποιείται για τη διευκόλυνση της δημιουργίας πλέγματος στο ANSYS, ώστε δηλαδή να μην υπάρχουν γωνίες οι οποίες δυσκολεύουν το χωρισμό του χώρου σε *elements*.

- Το τελευταίο βήμα σε αυτή την προσπάθεια διαφοροποιείται από τις προηγούμενες. Εφόσον το συγκεκριμένο μοντέλο θα επιλεγεί για την είσοδο στο ANSYS, πρέπει η κοιλότητα να πληροί όλες τις σωστές προδιαγραφές για να είναι σωστή. Αυτό προϋποθέτει να μην έχει κενά σημεία, δηλαδή τρύπες, τα οποία θα δώσουν λάθη στην προσομοίωση και αυτό μέχρι στιγμής δεν ικανοποιείται απόλυτα από τις προηγούμενες προσπάθειες. Δύο είναι τα σημεία ενδιαφέροντος στο μοντέλο που πρέπει να διορθωθούν και φαίνονται στις Εικόνες 45(α) - 46(α).



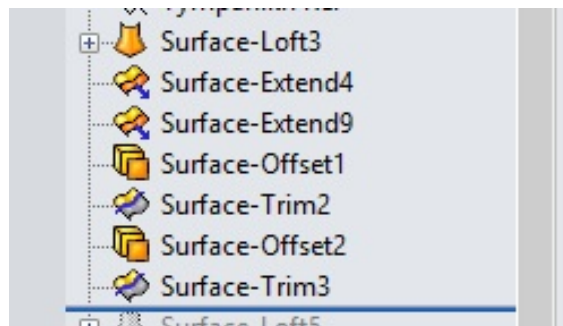
Εικόνα 45: Διόρθωση ανοιχτής επιφάνειας 1



Εικόνα 46: Διόρθωση ανοιχτής επιφάνειας 2

Αυτά βρίσκονται στο τέλος του τυμπανικού δακτυλίου (κόκκινο) και εκεί που αρχίζει το τμήμα της χαλαρής μοίρας (μπλε). Το ενδιαμέσο αυτό κομμάτι δεν ήταν δυνατό να επιλεγεί από την αρχή διότι προέκυπτε εσφαλμένη γεωμετρία (self intersecting geometry) στην προσπάθεια δημιουργίας της αρχικής επιφάνειας. Επίσης, οι ενδιαμέσες αυτές επιφάνειες της τυμπανικής μεμβράνης (πράσινο) δεν έχουν μηδενική μετατόπιση, αλλά είναι απαραίτητο να κλείσει επάνω σε αυτές η εξωτερική επιφάνεια, διότι διαφορετικά θα υπάρχει κενό.

Σε αυτό το βήμα χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο *Extend Surface* με την επιλογή *Up to surface*. Αυτό μας επιτρέπει να επιμηκύνουμε μια ακμή ή επιφάνεια μέχρι τα όρια μιας άλλης επιφάνειας. Το σημαντικό πρόβλημα που συναντήθηκε σε αυτή τη φάση είναι ότι τα σώματα που έχουν εισαχθεί από το ANSYS δεν έχουν ιδιότητες αντικειμένων που έχουν δημιουργηθεί στο Solidworks, δηλαδή



Εικόνα 47: Σειρά των εργαλείων επιφάνειας

δεν αναγνωρίζεται η εξωτερική επιφάνειά τους. Οπότε, η επιμηκυμένη επιφάνεια από το εργαλείο *Extend Surface* εισέρχεται μέσα στον τυμπανικό δακτύλιο και τον τέμνει.

Σε αυτό το σημείο βοήθησε η χρήση δύο άλλων εργαλείων της βιβλιοθήκης **Surfaces**, το *Offset Surface* και το *Trim Surface*. Το πρώτο δημιουργεί μία επιφάνεια παράλληλη σε μια επιφάνεια αναφοράς σε κάποια απόσταση. Οπότε, θέτοντας την απόσταση ίση με μηδέν δημιουργήθηκαν οι κρίσιμες επιφάνειες του τυμπανικού δακτυλίου. Με το δεύτερο εργαλείο, το οποίο κόβει επιφάνειες, επιλέχθηκαν σαν όρια τα κρίσιμα σημεία και κόπηκε η επιμηκυμένη επιφάνεια στο επιθυμητό όριο.

Το τελικό αποτέλεσμα φαίνεται στις Εικόνες 45(β) και 46(β), ενώ η πορεία σχεδίασης από το *FeatureManager Design Tree* στην Εικόνα 47.

- Τέλος, ο όγκος υπολογίστηκε με τις ίδιες μεθόδους προσεγγιστικά 1.5 ml, δηλαδή καλύπτει τις επιθυμητές προδιαγραφές για το μέσο αυτό.

4.6 Μια χρήσιμη προσθήκη

Όπως προαναφέρθηκε στην υποενότητα 1.1.2, στο ανώτερο μέρος της κοιλότητας του μέσου ωτός βρίσκεται η είσοδος για το μαστοειδές άντρο, το οποίο περιέχει τις μαστοειδείς κυψέλες, δηλαδή μικρές κοιλότητες με αέρα. Το μοντέλο που δημιουργήθηκε για την κοιλότητα δεν έχει προς το παρόν κάποια ευελιξία ως προς τον όγκο του. Οπότε, για να δοθεί η δυνατότητα να επεκταθεί ο όγκος προς το ανώτερο τμήμα και να προσομοιωθεί ο επιπλέον αέρας του μαστοειδούς μπορεί να γίνει εύκολα η προσθήκη ενός σχήματος μεταβλητού όγκου, το οποίο θα αλλάζει ο κάθε χρήστης ανάλογα με το πείραμα που θέλει να κάνει.

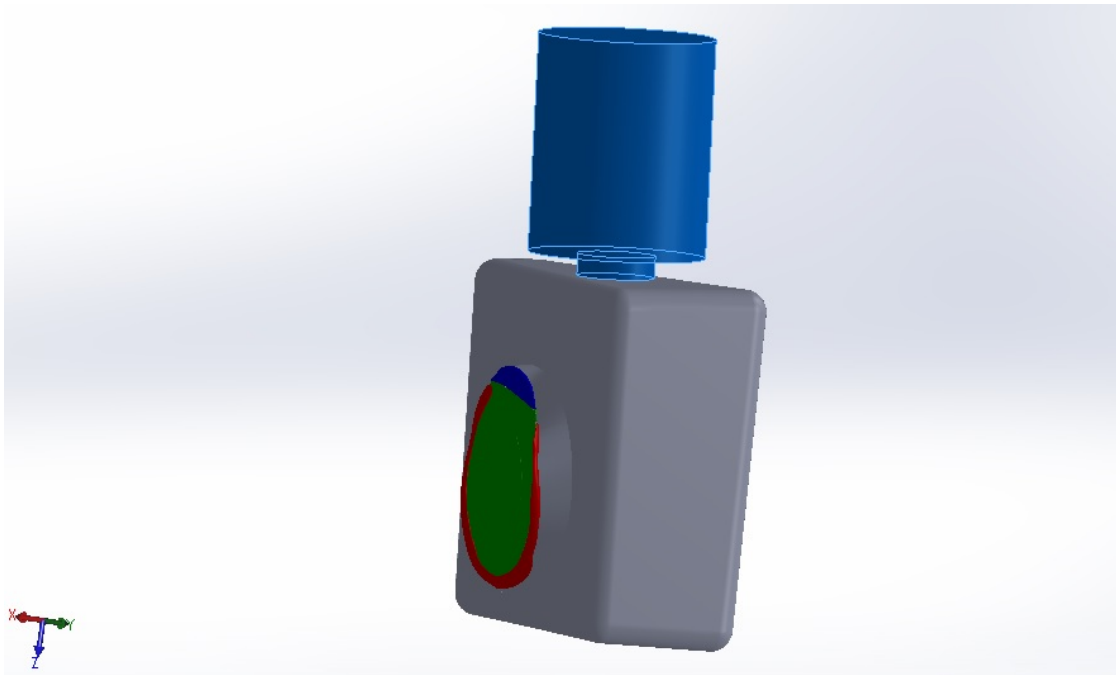
Το σχήμα που θα προστεθεί επιλέγεται να είναι κυλινδρικού σχήματος λόγω της ευκολίας με την οποία μπορεί να αλλάξει ο όγκος του, δηλαδή με αλλαγή του μήκους του.

Αρχικά, δημιουργείται με το *Reference Plane* ένα επίπεδο αναφοράς στην άνω επιφάνεια της κοιλότητας. Έπειτα, σχεδιάζεται πάνω στην επιφάνεια ένας κύκλος διαμέτρου 3.5 mm και μετατρέπεται σε κύλινδρο με μήκος 1 mm με το εργαλείο *Extruded Boss/Base* της βιβλιοθήκης **Features**. Αυτός ο κύλινδρος λειτουργεί σαν μεταβατικό στάδιο.

Στην άνω επιφάνειά του σχεδιάζεται μεγαλύτερος κύκλος με διάμετρο 8 mm. Το μήκος του δεύτερου κυλίνδρου που θα δημιουργηθεί εξαρτάται από το πόσο θα αυξηθεί ο όγκος. Για παράδειγμα, έστω ότι πρέπει να αυξηθεί ο όγκος του μοντέλου κατά 0.5 ml. Τότε, από τις σχέσεις όγκων προκύπτει:

$$\frac{\pi(r^2l_1 + R^2l_2)}{1000} = 0.5 \Rightarrow \pi((1.75)^2 \cdot 1 + (4)^2 l_2) = 500 \Rightarrow 16l_2 = \frac{500}{\pi} - (1.75)^2 \Rightarrow$$

$$l_2 = 9.9mm \quad (\text{Εξ. 8})$$



Εικόνα 48: Μοντέλο μαζί με την προσθήκη

Οπότε, το τελικό αποτέλεσμα που φαίνεται στην Εικόνα 48 είναι μια ευέλικτη λύση η οποία μπορεί να μετατραπεί με μεγάλη ευκολία, καθώς το εργαλείο *Extruded Boss/Base* με το οποίο δημιουργήθηκε ο κύλινδρος επιτρέπει την αλλαγή του μήκους του.

5 Το απλοποιημένο μοντέλο για τη μελέτη τεχνητής πρόθεσης τύπου TORP

5.1 Εισαγωγή

Στο προηγούμενο κεφάλαιο δημιουργήθηκε η γεωμετρία της κοιλότητας του μέσου ωτός με το λογισμικό Solidworks. Σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι η απλοποίηση του εσωτερικού προϋπάρχοντος μοντέλου τυμπανικού υμένα - ακουστικών οσταρίων, με σκοπό να μελετηθεί η εισαγωγή πρόθεσης τύπου TORP στην κλινική περίπτωση της διακοπής της οσταριακής αλυσίδας.

Όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο 3, η διακοπή της οσταριακής αλυσίδας είναι μία σοβαρή περίπτωση τραυματισμού του μέσου ωτός και απαιτεί χειρουργική αποκατάσταση. Εάν δεν προτιμηθεί η εισαγωγή μοσχεύματος, αλλά η χρήση τεχνητής πρόθεσης, τότε αυτή εισάγεται στο μέσο αυτί αντί της οσταριακής αλυσίδας και ενώνει τον τυμπανικό υμένα με τον αναβολέα. Η σύνδεση γίνεται συνήθως πάνω σε υπολοιπούμενα κομμάτια της σφύρας και του αναβολέα, σύμφωνα με την κρίση του χειρουργού για το πόσο ευσταθή είναι ή αν χρειάζονται κάποια τροποποίηση πρώτα.

Η μορφή μίας τέτοιας πρόθεσης τύπου TORP φαίνεται στην Εικόνα 49.



Εικόνα 49: Πρόθεση τύπου TORP [13]

Ανάλογα με τη μορφή των οσταρίων που απομένουν στο μέσο αυτί μετά τη διακοπή της αλυσίδας και ανάλογα με την κάθε περίπτωση του ασθενή, μπορεί να χρειάζεται να τοποθετηθεί διαφορετικής μορφής πρόθεση.

5.2 Κατασκευή απλοποιημένου μοντέλου

5.2.1 Απλοποίηση της γεωμετρίας

Αρχικά, αποκρύπτονται από το μοντέλο της υποενότητας 4.5.3 όλα τα συστατικά του μέσου ωτός και παραμένει μόνο η κοιλότητα του μέσου ωτός που έχει κατασκευαστεί. Το πρώτο βήμα στη διαδικασία της απλοποίησης είναι να κατασκευαστούν απλοποιημένος τυμπανικός υμένας, τυμπανικός δακτύλιος, βάση αναβολέα και δακτυλιοειδής σύνδεσμος αναβολέα.

Από το ακριβές προϋπάρχον μοντέλο μετρήθηκαν μέσω του προγράμματος Solidworks οι διαστάσεις των παραπάνω σωμάτων και παρουσιάζονται στους παρακάτω Πίνακες:

Σώμα	Κάθετη Διάμετρος (mm)	Οριζόντια Διάμετρος (mm)	Πάχος (mm)
Τυμπανικός υμένας	10.06	9.27	0.13
Βάση αναβολέα	1.13	2.46	0.18

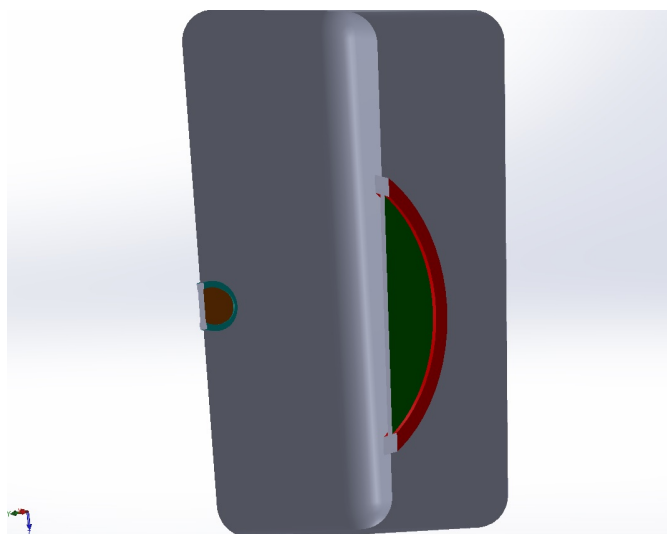
Πίνακας 6: Διαστάσεις βασικών σωμάτων

Σώμα	Μήκος (mm)		Πάχος (mm)	
	max	min	max	min
Τυμπανικός Δακτύλιος	0.63	0.33	0.62	0.21
Δακτύλιος Αναβολέα	0.21	0.20	0.23	0.23

Πίνακας 7: Διαστάσεις δακτυλίων

Όλα τα καινούργια σώματα θα είναι κυκλικά με σκοπό να επιτευχθεί η απλούστερη δυνατή γεωμετρία ως μία πρώτη προσέγγιση. Οπότε η τυμπανική μεμβράνη θα είναι κυκλικός δίσκος, ο τυμπανικός δακτύλιος θα είναι κυκλικός δακτύλιος και αντίστοιχα η βάση του αναβολέα θα είναι ελλειψοειδής δίσκος και ο δακτύλιός του ελλειψοειδής δακτύλιος. Οι διαστάσεις τους προκύπτουν από τους Πίνακες 6 και 7 παίρνοντας τη μέση τιμή για κάθε διάσταση που έχει μέγιστο και ελάχιστο.

Το τελικό σχήμα παρουσιάζεται στην Εικόνα 50. Φαίνονται καθαρά στην τομή αυτή η τυμπανική μεμβράνη (πράσινο), η βάση του αναβολέα (καφέ) και οι δακτύλιοί τους (κόκκινο και γαλάζιο αντίστοιχα).

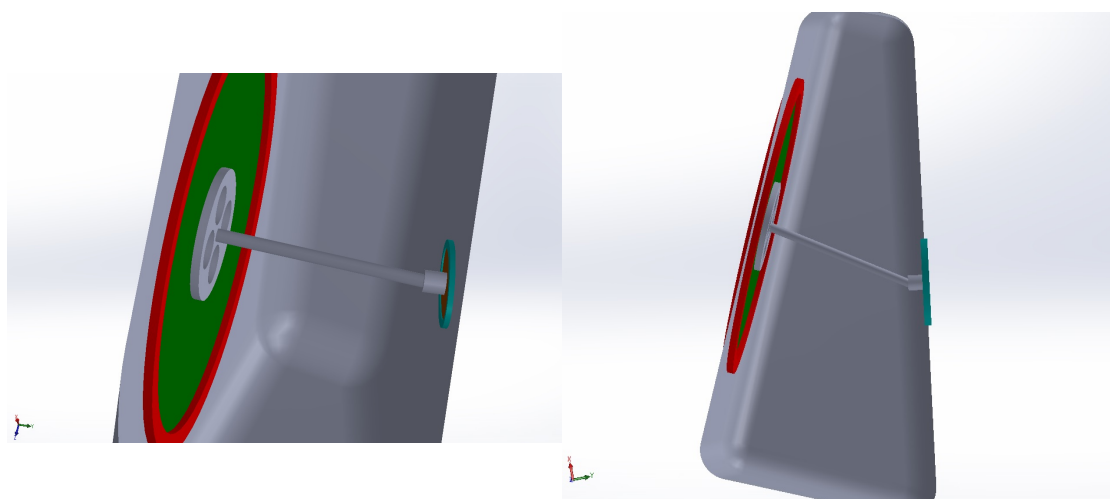


Εικόνα 50: Απλοποιημένο μοντέλο σε τομή

Οι επιφάνειες των σωμάτων κατασκευάστηκαν με τα εργαλεία *Circle* και *Ellipse* και έπειτα επεκτάθηκαν σε τρεις διαστάσεις με το εργαλείο *Extruded Boss/Base* της βιβλιοθήκης **Features**.

5.2.2 Κατασκευή TORP

Η κατασκευή της πρόθεσης βασίζεται στο σχήμα της Εικόνας 49. Επειδή στο μοντέλο αυτό δεν υπάρχουν υπολείμματα οσταρίων, η πρόθεση αναγκαστικά ξεκινάει με κλίση προς τον αναβολέα ώστε να εφάπτεται σε αυτόν, αλλά και τον τυμπανικό υμένα (Εικόνα 51).



Εικόνα 51: Μοντέλο πρόθεσης TORP

Η πρόθεση TORP βασίζεται στο μοντέλο της EON Meditech *Total Vario Cask, Osseous: Torp* και οι διαστάσεις της φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα:

Μέλος Torp	Διάμετρος (mm)	Πάχος (mm)	Μήκος (mm)
Εφαπτόμενο στην TM	3	0.2	-
Εφαπτόμενο στον αναβολέα	0.5	0.5	-
Άξονας	0.3	-	5

Πίνακας 8: Διαστάσεις πρόθεσης τύπου TORP

Για την κατασκευή ακολουθήθηκαν τα εξής βήματα:

- Σχεδιάστηκαν τα προφίλ που εφάπτονται στον τυμπανικό υμένα και τον αναβολέα με το εργαλείο *Circle*.

- Τα προφίλ έπειτα έγιναν τρισδιάστατα με το εργαλείο *Extruded Boss/Base* και ενώθηκαν στα κέντρα τους με το εργαλείο *Boundary Boss/Base*, της βιβλιοθήκης **Features**, το οποίο επιτρέπει τη δημιουργία τρισδιάστατου κυλινδρικού άξονα ανάμεσα σε δύο κυκλικά προφίλ.

- Τέλος, δημιουργήθηκαν οι τέσσερις "τρύπες" στον κυκλικό δίσκο που εφάπτεται στον τυμπανικό υμένα ώστε να υλοποιηθεί η ακριβής γεωμετρία της Εικόνας 49 με το εργαλείο *Extruded Cut*, το οποίο επιτρέπει την τομή ενός σώματος προς μία διάσταση σύμφωνα με ένα προφίλ. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιήθηκε κύκλος και κατεύθυνση τομής κάθετη στον κυκλικό δίσκο.

5.2.3 Τελικές προσθήκες

Για να τελειοποιηθεί το μοντέλο αυτό, πρέπει να είναι κατάλληλο για χρήση στο λογισμικό ANSYS. Για να επιτευχθεί αυτό πρέπει να μετατραπεί η περιβάλλουσα επιφάνεια της κοιλότητας του μέσου ωτός σε στερεό το οποίο θα προσομοιώνει το κροταφικό οστό, διότι δεν είναι δυνατή η σωστή δημιουργία πλέγματος με στοιχεία επιφάνειας. Επίσης, πρέπει ο ενδιάμεσος χώρος της κοιλότητας να μετατραπεί σε στερεό σώμα, ώστε μετέπειτα να του αποδωθούν ιδιότητες αέρα ή υγρού και να γίνει ανάλυση ρευστών. Τα βήματα που ακολουθήθηκαν είναι τα εξής:

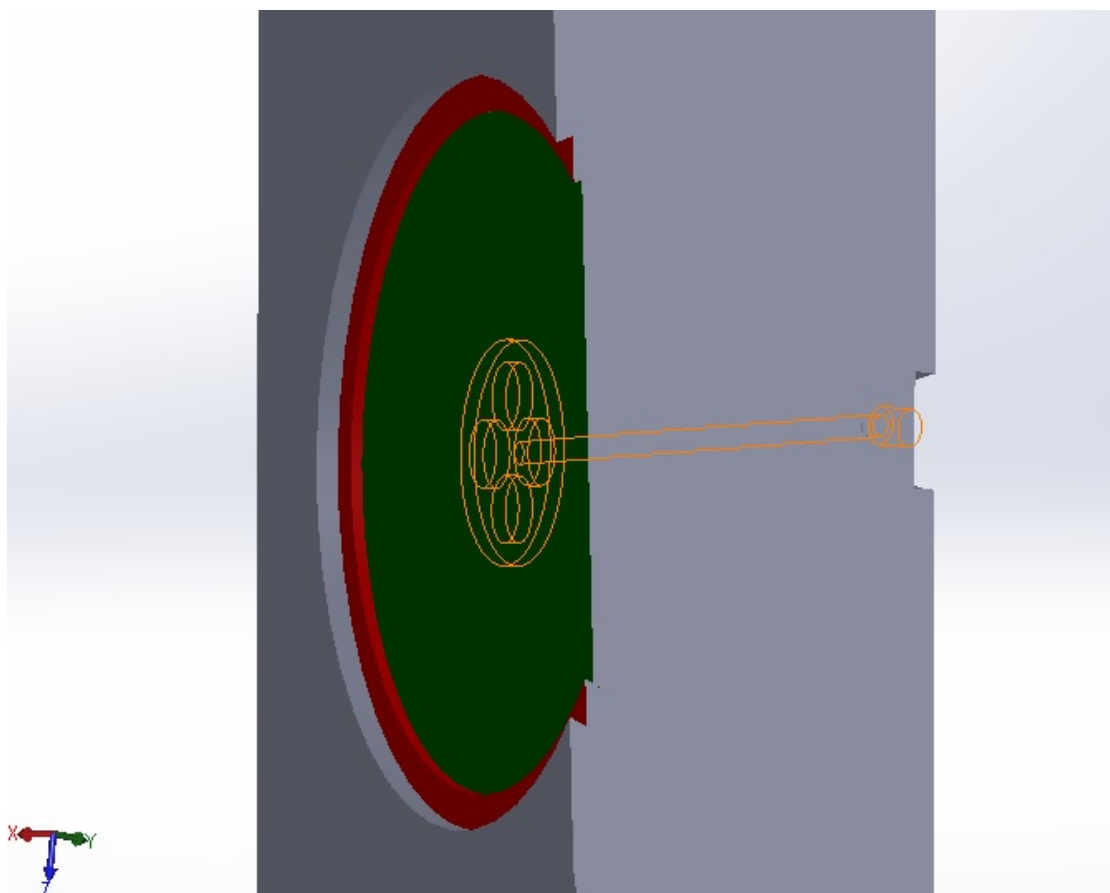
- Η δεύτερη διαδικασία πραγματοποιείται αρχικά με άμεσο τρόπο, με το εργαλείο *Thicken* της βιβλιοθήκης **Surfaces**. Σε αυτό, γίνεται η επιλογή *Create solid from enclosed volume* ώστε να μετατραπεί η εξωτερική επιφάνεια σε στερεό. Με τη μέθοδο αυτή θα επικαλυφθεί η πρόθεση TORP που έχει σχεδιαστεί, οπότε θα χρειαστεί μετέπειτα η αφαίρεσή της.

- Για τη σχεδίαση του κροταφικού οστού, το οποίο περιβάλλει το υπάρχον σχήμα,

δημιουργείται μία επιπλέον επιφάνεια σε μηδενική απόσταση από την εξωτερική επιφάνεια του σώματος του προηγούμενου βήματος με το εργαλείο *Offset Surface* της βιβλιοθήκης **Surfaces**. Οπότε, με το γνωστό εργαλείο *Thicken* δημιουργείται το κροταφικό οστό με πάχος 0.50 mm.

- Τέλος, στο οστό δημιουργούνται ανοίγματα με το εργαλείο *Extruded Cut* χρησιμοποιώντας κυλίνδρους κάθετους στις επιφάνειες του τυμπανικού υμένα, της βάσης του αναβολέα και των δακτυλίων τους.

Το τελικό αποτέλεσμα που προκύπτει φαίνεται στην Εικόνα 52, όπου φαίνονται ο ενδιάμεσος χώρος ως στερεό, τα οριακά στοιχεία του μέσου ωτός (τυμπανικός υμένας κτλ.), το κροταφικό οστό ως στερεό στην έξω περιοχή και η πρόθεση TORP μέσα στον εσωτερικό χώρο.



Εικόνα 52: Τελικό μοντέλο Solidworks

5.3 Μεταφορά της γεωμετρίας

Με βάση την τελευταία υποενότητα, είναι κατασκευασμένο το τελικό μοντέλο και έτοιμο προς εισαγωγή στο ANSYS, όπου θα γίνει και η τελική μελέτη. Για να γίνει σωστά η εισαγωγή πρέπει να ακολουθηθούν συγκεκριμένα βήματα, ώστε να μην υπάρχουν ανακρίβειες και να παραμείνουν οι σχέσεις μεταξύ των σωμάτων αχέραιες.

5.3.1 Εξαγωγή γεωμετρίας από το Solidworks

Αν από το *FeatureManager Design Tree* και κάτω από τον τίτλο *Solid Bodies* επιλεγούν τα σώματα ενδιαφέροντος, είναι δυνατή η αποθήκευσή τους ως ξεχωριστό σώμα με την επιλογή *Insert into New Part*.

Όπως και στην υποενότητα 4.5, πρέπει να εξαχθεί το αρχείο της γεωμετρίας του νέου σώματος από το Solidworks σε μορφή Parasolid Text.

5.3.2 Εισαγωγή γεωμετρίας στο ANSYS

Η εισαγωγή στο ANSYS γίνεται από το *Geometry* στην καρτέλα του μοντέλου. Με την επιλογή *Import External Geometry File* είναι εύκολη η εισαγωγή της γεωμετρίας, αλλά το καινούργιο σώμα βρίσκεται σε τυχαία θέση στο χώρο.

Το μοναδικό βήμα που απομένει ώστε η γεωμετρία να είναι λειτουργική είναι η αφαίρεση των σωμάτων που συμπίπτουν με το σώμα του εσωτερικού της κοιλότητας. Αυτό επιτυγχάνεται με την επιλογή *Boolean* της καρτέλας **Create** της γραμμής εργαλείων. Επιλέγεται ως τύπος το *Subtract*, ως κύριο σώμα το εσωτερικό και ως σώματα προς αφαίρεση ο τυμπανικός υμένας, η βάση του αναβολέα, οι δακτύλιοί τους και η πρόθεση TORP.

5.4 Απόδοση ιδιοτήτων στα σώματα

Τα σώματα που εισήχθησαν πρέπει να έχουν συγκεκριμένες ιδιότητες, ώστε να είναι δυνατό να αναλυθούν σε πλέγμα και να συμμετέχουν στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Όλα τα σώματα από την καρτέλα **Geometry** του ANSYS επιλέγονται να έχουν ιδιότητα *Solid*, ενώ ο εσωτερικός χώρος επιλέγεται ως *Fluid*, ώστε να μπορεί να συμμετέχει σε ανάλυση ρευστών. Έπειτα, επικεντρωνόμαστε στην καρτέλα **Engineering Data**, όπου και αποδίδονται ιδιότητες στα σώματα:

Από την καρτέλα αυτή δημιουργούνται εκ νέου όλα τα υλικά που χρειάζονται για την ανάλυση του μοντέλου και φαίνονται στην παρακάτω Εικόνα:

2	Material			
3	Air	<input type="checkbox"/>		
4	Middle Ear Cavity Bone	<input type="checkbox"/>		
5	Pars Tensa	<input type="checkbox"/>		
6	Stapedial Annular Ligament	<input type="checkbox"/>		
7	Stapes	<input type="checkbox"/>		
8	Torp	<input type="checkbox"/>		
9	Tympanic Annular Ligament	<input type="checkbox"/>		
*	Click here to add a new material			

Εικόνα 53: Υλικά που χρησιμοποιήθηκαν από το μοντέλο στο Engineering Data

Τα υλικά αυτά ορίστηκαν ως γραμμικά ιστροπικά ελαστικά και τους αποδόθηκαν όλες οι τιμές των Πινάκων 4 και 5.

Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για την πρόθεση TORP είναι *CP Titanium Medical Grade 2 (ASTM F67)* και οι βασικές του ιδιότητες είναι:

- Πυκνότητα = 4510 kg m^{-3}
- Young's Modulus = $1.05\text{e}+11 \text{ Pa}$
- Poisson's Ratio = 0.37

Η ανάθεση κάθε υλικού στο αντίστοιχο σώμα γίνεται από την καρτέλα **Model** και συγκεκριμένα από την επιλογή *Material*→*Assign*, του *Geometry*, στο μενού επιλογών *Project*.

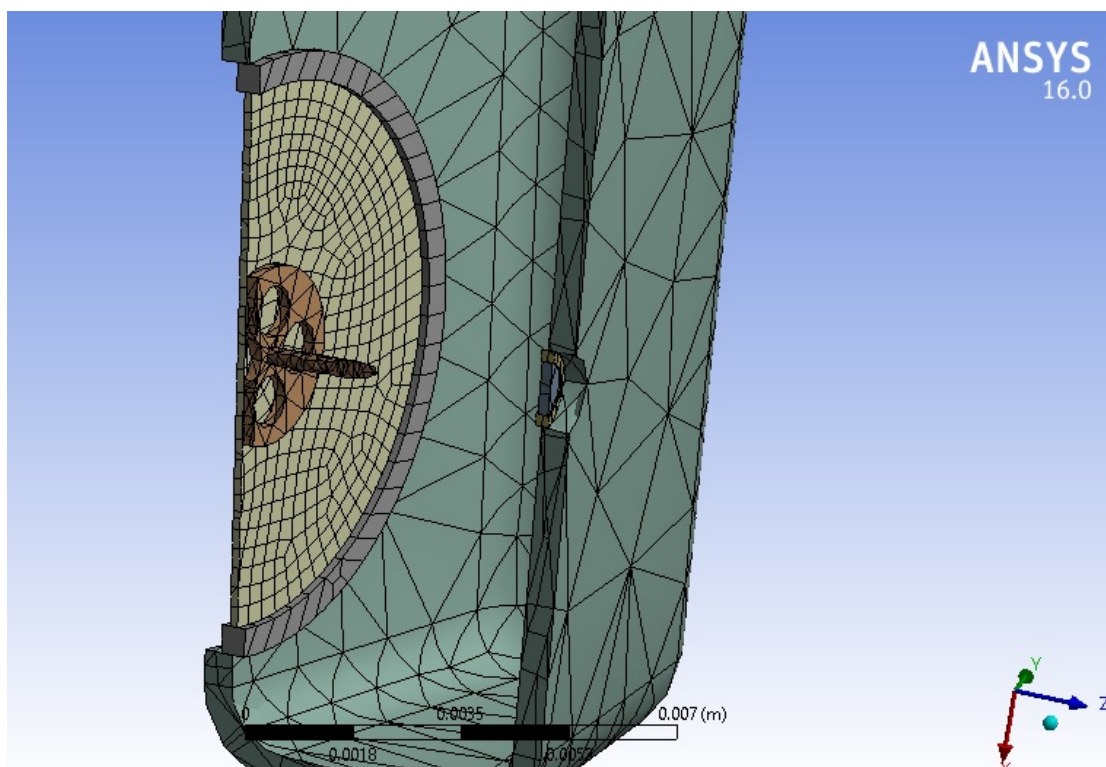
5.5 Μηχανική ανάλυση

Για να επαληθευθεί ότι το μοντέλο αυτό λειτουργεί με σωστό τρόπο, πρέπει να γίνει μηχανική ανάλυση, ώστε να επιβεβαιωθεί η σύζευξη τυμπανικού υμένα και αναβολέα, μέσω της τεχνητής πρόθεσης. Η μηχανική ανάλυση θα πρέπει να είναι ταυτόσημη ως προς τις παραμέτρους της με αυτήν της προηγούμενης έρευνας ([20]), με σκοπό να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων.

5.5.1 Προετοιμασία μοντέλου για την προσομοίωση

Η μηχανική ανάλυση δεν περιέχει στοιχεία υγρού, οπότε το σώμα "Middle Ear Cavity Air" το οποίο απεικονίζει τον αέρα της κοιλότητας του μέσου ωτός γίνεται *Suppress*, ώστε να μην συμμετέχει στη διαδικασία.

- Για τη δημιουργία του πλέγματος πραγματοποιείται η εντολή *Generate Mesh* και παρατηρείται ότι δεν παρουσιάζονται σφάλματα, οπότε η διαδικασία είναι επιτυχής. Το τελικό αποτέλεσμα παρουσιάζεται σε τομή στην Εικόνα 54



Εικόνα 54: Τελική μορφή πλέγματος

Τα στατιστικά στοιχεία του πλέγματος φαίνονται στην Εικόνα 55:

Details of "Geometry"	
Statistics	
Bodies	7
Active Bodies	6
Nodes	12292
Elements	3834
Mesh Metric	None

Εικόνα 55: Στατιστικά στοιχεία πλέγματος

- Το πρόγραμμα προσθέτει μόνο του τις επαφές μεταξύ των σωμάτων στο **Contacts** του μενού επιλογών Project. Οι επαφές αυτές πρέπει να είναι της μορφής *Bonded*, για να δηλωθεί η σύζευξη μεταξύ των σωμάτων χωρίς σχετικές μετατοπίσεις μεταξύ τους.

- Κάτω από τις επαφές προστίθεται ένα ελατήριο στη βάση του αναβολέα το οποίο έχει κατεύθυνση κάθετη σε αυτήν και προσομοιώνει το κοχλιακό υγρό, όπως αναφέρθηκε στην υποενότητα 3.3.4. Οι ιδιότητες του ελατηρίου τίθενται ταυτόσημες με αυτό του αρχικού μοντέλου [20]. Η εισαγωγή του επιτυγχάνεται με το

Insert→*Spring* και η θέση του καθορίζεται από δύο τεχνητά συστήματα συντεταγμένων που δημιουργήθηκαν στο **Coordinate Systems**.

- Στην επιλογή **Harmonic Response** καθορίζονται οι είσοδοι της προσομοίωσης, καθώς και οποιεσδήποτε μηδενικές μετατοπίσεις μπορεί να υπάρχουν σε επιφάνειες. Ως είσοδος ορίζεται πίεση στον τυμπανικό υμένα με το εργαλείο *Insert*→*Pressure*. Εφόσον υπάρχει το κροταφικό οστό, είναι υπεύθυνο για τον περιορισμό των κινήσεων των σωμάτων, αλλά μελετάται και η περίπτωση να υπάρχει μηδενική μετατόπιση στις εξωτερικές επιφάνειες των δακτυλιοειδών συνδέσμων, όπως και στην παλαιότερη έρευνα [20]. Η μηδενική μετατόπιση εισάγεται με το *Insert*→*Displacement* και θέτοντας όλες τις κατευθύνσεις μετατόπισης ίσες με μηδέν.

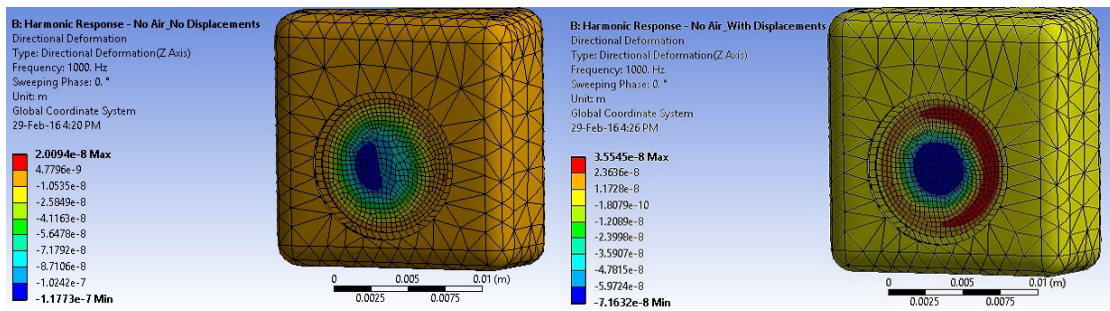
5.5.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Όπως αναφέρθηκε στην αμέσως προηγούμενη παράγραφο οι προσομοιώσεις έγιναν σε δύο μοντέλα, με τη μόνη διαφορά ότι το πρώτο (Μοντέλο Α) δεν περιέχει μηδενικές μετατοπίσεις, δηλαδή οι οριακές συνθήκες καθορίζονται από την κοιλότητα του μέσου ωτός, ενώ το δεύτερο (Μοντέλο Β) περιέχει ως επιφάνειες μηδενικής μετατόπισης τις εξωτερικές επιφάνειες των δακτυλιοειδών συνδέσμων.

Ως έξοδοι της προσομοίωσης θα ληφθούν οι ίδιες με της παλαιότερης ανάλυσης ([20]), δηλαδή παραμόρφωση (*Directional Deformation*) στον άξονα κάθετο στον αναβολέα (εδώ είναι ο άξονας *Z*), απόκριση συχνότητας τυμπανικού υμένα (*Tympanic Membrane Frequency Response*) και απόκριση συχνότητας της βάσης του αναβολέα (*Stapes Footplate Frequency Response*).

Η είσοδος, δηλαδή η πίεση που ασκείται στον τυμπανικό υμένα είναι της τάξης των 90 dB SPL (Sound Pressure Level) ή 0.6325 Pa και είναι ομοιόμορφη πάνω στην επιφάνειά του. Η περιοχή συχνοτήτων στην οποία γίνεται η προσομοίωση είναι 100 - 6000 Hz.

Η προσομοίωση της παραμόρφωσης είχε τα αποτελέσματα της Εικόνας 56. Στην 56(α) παρουσιάζεται το μοντέλο Α και στην 56(β) το μοντέλο Β.



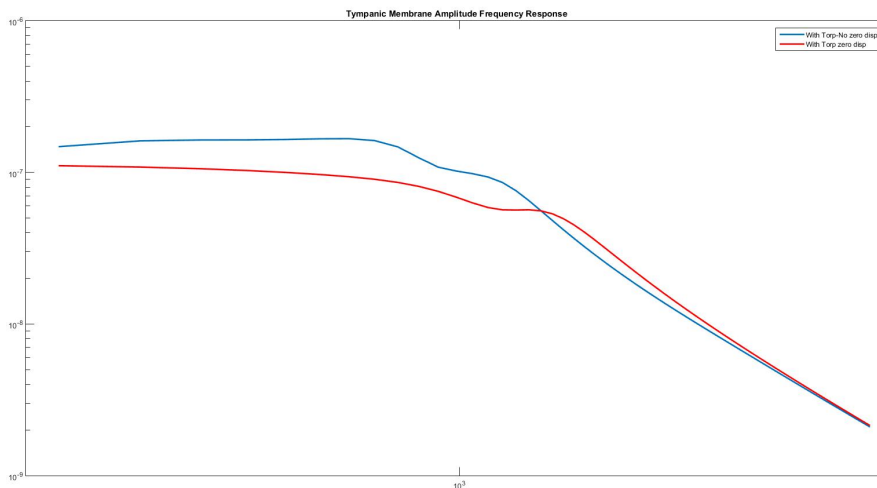
(α)

(β)

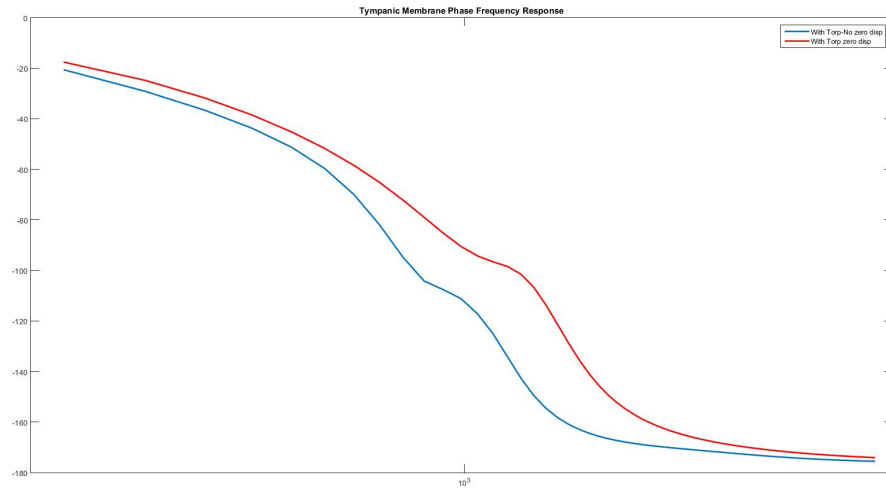
Εικόνα 56: Προσομοίωση Directional Deformation

Στις παρακάτω Εικόνες 57 έως 60 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα σε μορφή σύγκρισης ως εξής:

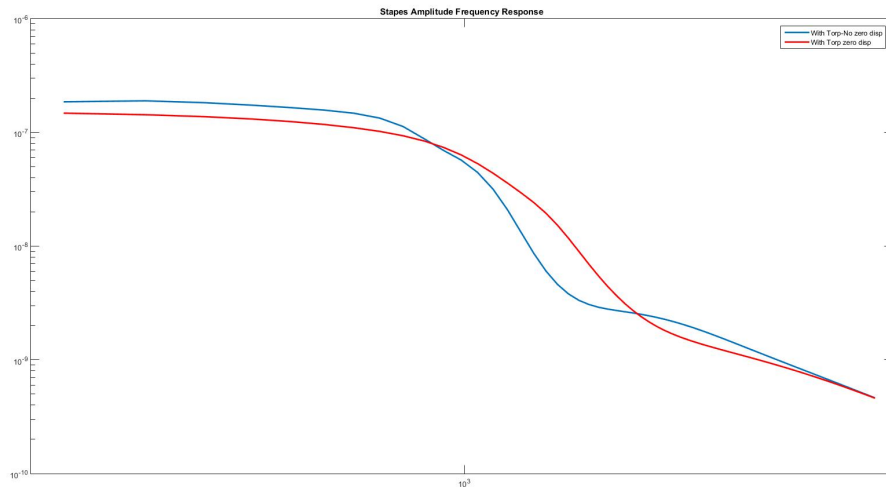
- Μοντέλο Α (μπλε)
- Μοντέλο Β (κόκκινο)



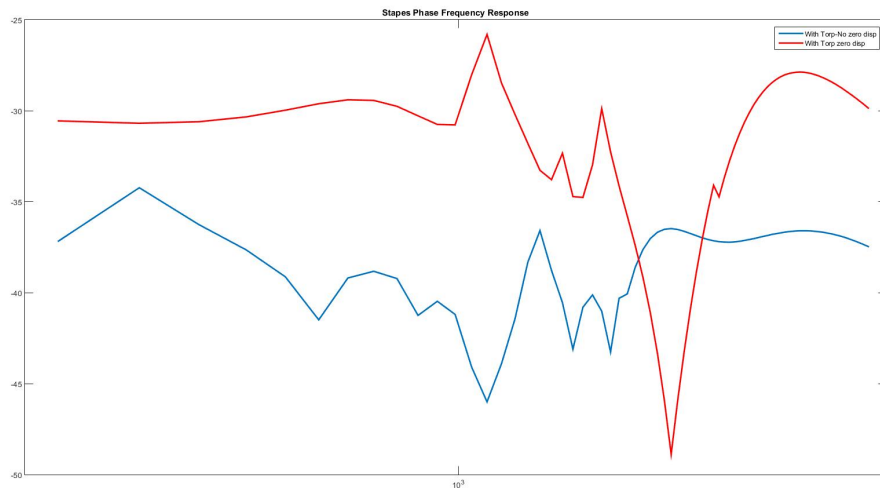
Εικόνα 57: Απόκριση πλάτους τυμπανικού υμένα



Εικόνα 58: Απόκριση φάσης τυμπανικού υμένα



Εικόνα 59: Απόκριση πλάτους βάσης αναβολέα



Εικόνα 60: Απόκριση φάσης βάσης αναβολέα

6 Αποτελέσματα και συμπεράσματα

6.1 Σύγκριση παραμόρφωσης

Αρχικά, για την παραμόρφωση, παρατηρώντας την Εικόνα 56 βλέπουμε ότι τα αποτελέσματα ανάμεσα στις (α) και (β) είναι της ίδιας περίπου τάξης μεγέθους, δηλαδή υπάρχει μικρή απόκλιση ανάμεσα στα δύο μοντέλα. Ωστόσο, στο μοντέλο Α σημειώνονται μεγαλύτερες κατά μέσο όρο τιμές παραμόρφωσης.

Αυτό που παρατηρείται επίσης, ανάμεσα στα δύο μοντέλα, είναι η διαφορά στην κατανομή της παραμόρφωσης. Στην περίπτωση του Α μοντέλου, η παραμόρφωση παρουσιάζει μέγιστο πάνω στον τυμπανικό υμένα σε μια μικρή μόνο περιοχή του (κόκκινη περιοχή), ενώ στο Β το μέγιστο είναι μεγαλύτερο σε τιμή και εντοπίζεται σε πολύ μεγαλύτερη περιοχή, πάλι όμως στον τυμπανικό υμένα. Ακόμη, στο Α παρατηρείται μεγαλύτερη παραμόρφωση στο κροταφικό οστό και πιο ομαλή μετάβαση των τιμών από έξω προς το κέντρο του τυμπανικού υμένα.

Από τα αποτελέσματα αυτά λοιπόν, μπορεί να συμπεράνει κανείς ότι η προσθήκη τεχνητής μηδενικής μετατόπισης μειώνει το φόρτο του κροταφικού οστού και περιορίζει την παραμόρφωσή του, ενώ διευκολύνεται η κίνηση του τυμπανικού υμένα, επιτρέποντάς του να έχει μεγαλύτερη στο σύνολο παραμόρφωση.

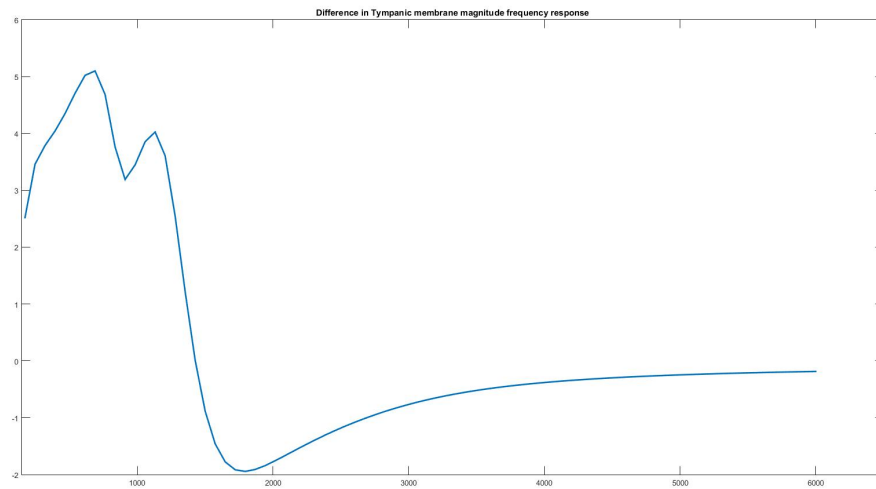
6.2 Σύγκριση αποκρίσεων συχνότητας

Οι αποκρίσεις πλάτους είναι σχεδιασμένες σε λογαριθμικό σύστημα συντεταγμένων, ενώ οι αποκρίσεις φάσης σε ημιλογαριθμικό, ώστε στον κάθετο άξονα να φαίνεται η γωνία σε μοίρες. Επίσης, στα διαγράμματα των διαφορών αφαιρούνται πάντα οι τιμές του μοντέλου Β από το μοντέλο Α.

6.2.1 Απόκριση πλάτους τυμπανικού υμένα

Στο διάγραμμα της Εικόνας 57 παρατηρείται ότι η απόκριση του μοντέλου Α έχει το μεγαλύτερο πλάτος στις χαμηλότερες συχνότητες, ενώ στις πιο υψηλές ξεπερνάται από το μοντέλο Β. Οι δύο προσομοιώσεις είναι παρόμοιες ως προς τη μορφή και την κλίση τους κατά την πτώση του πλάτους στις υψηλότερες συχνότητες. Μία εμφανής διαφορά είναι η συχνότητα στην οποία παρουσιάζεται το σημείο καμπής των αποκρίσεων, όπου αρχίζει η πτώση του πλάτους.

Η διαφορά ανάμεσα στις τιμές τους διατηρείται σχεδόν σταθερή, το οποίο υποδηλώνει ότι οι προσομοιώσεις δίνουν αρκετά παρόμοια αποτελέσματα για τη συγκεκριμένη απόκριση. Στην Εικόνα 61 παρουσιάζεται η γραφική παράσταση της διαφοράς ανάμεσα στις τιμές των δύο μοντέλων μετά από τη μετατροπή των μεγεθών πλάτους σε dB.

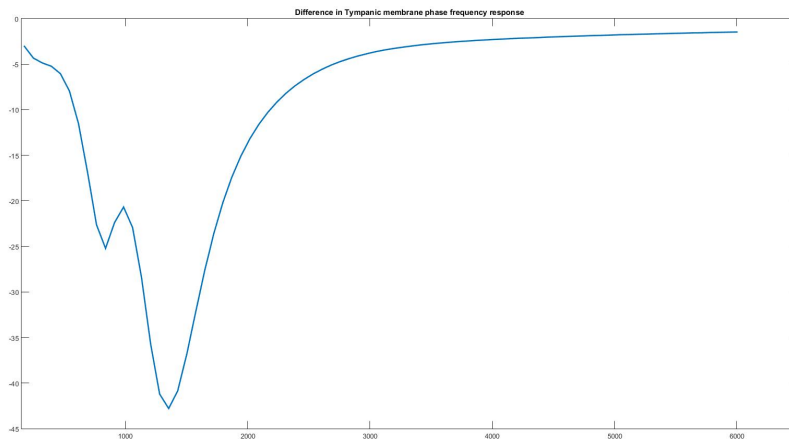


Εικόνα 61: Διαφορά στην απόκριση πλάτους τυμπανικού υμένα σε dB ανάμεσα στα μοντέλα

Παρατηρείται ότι διατηρείται πολύ μικρή διαφορά, με μικρές διακυμάνσεις. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι μεγαλύτερες διαφορές παρατηρούνται στις χαμηλότερες συχνότητες, κάτω από 2 kHz, ενώ στις υψηλότερες συχνότητες οι διαφορές τείνουν να εξαλειφθούν.

6.2.2 Απόκριση φάσης τυμπανικού υμένα

Όπως παρατηρείται στην Εικόνα 58, η φάση των δύο προσομοιώσεων έχει σχεδόν ίδια αρχική και τελική τιμή και ακολουθεί γενικά παρόμοια πορεία. Επίσης, η διαφορά της φάσης του μοντέλου A από το B παρουσιάζεται στην παρακάτω Εικόνα:



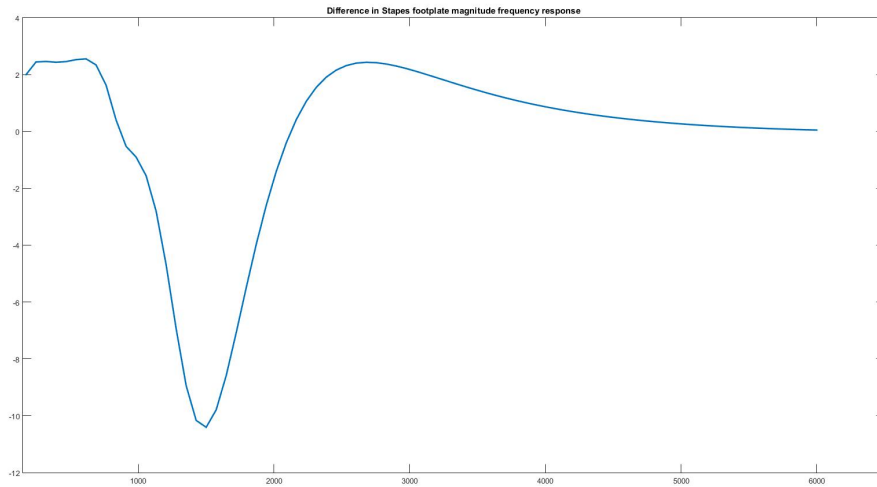
Εικόνα 62: Διαφορά στην απόκριση φάσης τυμπανικού υμένα σε μοίρες ανάμεσα στα μοντέλα

Η μορφή της καμπύλης της απόκρισης του μοντέλου A είναι αρκετά παρόμοια με του B. Υπάρχει βέβαια, αρκετή διαφορά στις τιμές τους στην περιοχή 1 - 2 kHz και αυτό απεικονίζεται στην Εικόνα 62. Η διαφορά αυτή έχει μέγιστο τις -43 περίπου μοίρες, ενώ όσο μεγαλώνει η συχνότητα, η διαφορά τείνει να εξαλειφθεί.

Άρα, η προσθήκη ή μη, μηδενικής μετατόπισης φαίνεται να μην επηρεάζει σημαντικά την απόκριση φάσης της τυμπανικής μεμβράνης. Η μορφή της καμπύλης και η κλίση της, καθώς και τα οποιαδήποτε όρη και κοιλάδες είναι ίδια και στις δύο προσομοιώσεις.

6.2.3 Απόκριση πλάτους βάσης αναβολέα

Η απόκριση πλάτους του αναβολέα παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, διότι στις χαμηλότερες συχνότητες (περιοχή 1 - 2 kHz) σημειώνεται μια διαφοροποίηση στις τιμές με μέγιστο τα -10 dB, ενώ όσο αυξάνεται η συχνότητα η διαφορά μειώνεται και φτάνει πολύ χαμηλές τιμές. Η Εικόνα 63 παρουσιάζει αυτά τα στοιχεία αναλυτικά για όλες τις συχνότητες που μελετήθηκαν.

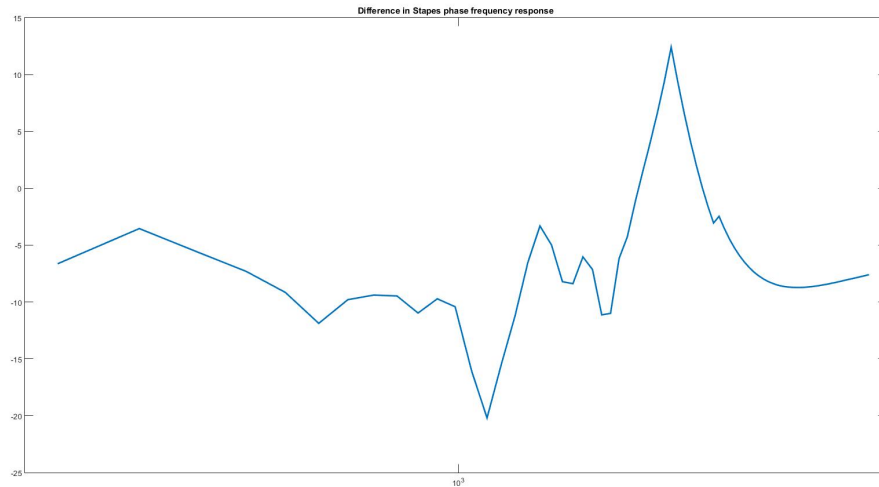


Εικόνα 63: Διαφορά στην απόκριση πλάτους της βάσης του αναβολέα σε dB ανάμεσα στα μοντέλα

Στη γραφική παράσταση της απόκρισης, στην Εικόνα 59, παρατηρείται η μεγάλη ομοιότητα των δύο προσομοιώσεων, κυρίως στις πολύ χαμηλές και στις πολύ υψηλές συχνότητες. Η μορφή των καμπυλών είναι ίδια σχεδόν σε όλα τα σημεία, με μοναδικές εξαιρέσεις τα σημεία καμπής των αποκρίσεων.

6.2.4 Απόκριση φάσης βάσης αναβολέα

Η απόκριση φάσης του αναβολέα παρουσιάζει άλματα άνω των 180 μοιρών, οπότε πρέπει να διορθωθεί για να προκύψει πιο ομαλό διάγραμμα φάσης. Η διόρθωση αυτή γίνεται με τη συνάρτηση του Matlab **unwrap**, η οποία σύμφωνα με τη βιβλιογραφία του προγράμματος [46] διορθώνει τη φάση προσθέτοντας πολλαπλάσια των 360 μοιρών όταν η απόλυτη διαφορά μεταξύ δύο διαδοχικών τιμών είναι πάνω από 180. Έτσι, προκύπτει το διάγραμμα της Εικόνας 60.



Εικόνα 64: Διαφορά στην απόκριση φάσης της βάσης του αναβολέα σε μοίρες ανάμεσα στα μοντέλα

Η μορφή της απόκρισης του μοντέλου A είναι σχετικά κοντά σε αυτή του B, αλλά παρατηρούνται διαφορετικές διακυμάνσεις της φάσης στην κάθε περίπτωση. Επίσης, το μοντέλο B προηγείται σε όλες τις συχνότητες εκτός από μια μικρή περιοχή. Όπως παρατηρείται και στην Εικόνα 64, στις χαμηλές συχνότητες η διαφορά είναι μικρή, περίπου -5 έως -10 dB, ενώ μετά τα 1000 Hz αυξομειώνεται αλλά με μέγιστη απόλυτη διαφορά τα 20 dB. Οπότε, παρά τη διαφοροποίηση στη μορφή τους, οι δύο καμπύλες παραμένουν αρκετά κοντά ως προς τις τιμές.

6.3 Περαιτέρω βελτίωση - έρευνα

Το μοντέλο στο οποίο έγιναν οι προσομοιώσεις ήταν ένα απλοποιημένο μοντέλο για την εύκολη προσομοίωση της αποκατάστασης της οσταριακής αλυσίδας με την τεχνητή πρόθεση τύπου TORP. Η γεωμετρία του βασίστηκε στο ρεαλιστικό μοντέλο προηγούμενων ερευνών ([15] [16] [20]). Με βάση το μοντέλο αυτό κατασκευάστηκε η κοιλότητα του μέσου ωτός με σωστό προσανατολισμό και όγκο και έπειτα έγινε απλοποίηση των δεδομένων από microCT που είχαν απεικονιστεί στο λογισμικό ANSYS, με απλές κυκλικές και ελλειψοειδείς γεωμετρίες, οι οποίες κάνουν τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων εύκολη, γρήγορη και όπως παρατηρήθηκε αρκετά αξιόπιστη για τη μελέτη του μέσου ωτός.

Είναι φανερό βέβαια, ότι το μοντέλο αυτό χρήζει βελτίωσης με σκοπό να απεικονιστούν με πιο ρεαλιστικό, αλλά ταυτόχρονα εξίσου απλοποιημένο τρόπο τα συστατικά του μέσου ωτός. Με τις βελτιώσεις αυτές θα αποτελέσει ένα σημαντικό εργαλείο για τη μελέτη των τεχνητών προθέσεων στο μέσο αυτί και τη μετέπειτα ανάλυση των παθολογιών που μπορεί να προκύψουν.

Παράρτημα

Το λογισμικό Solidworks



Εικόνα 65: Λογισμικό Solidworks logo

Ο σχεδιασμός των τρισδιάστατων μοντέλων και η επεξεργασία της γεωμετρίας τους έγινε στο λογισμικό *Solidworks*, το οποίο παρέχεται από το κέντρο δικτύων του Ε.Μ.Π. στην ιστοσελίδα: <http://www.central.ntua.gr/wiki/software/solidworks>. Η νόμιμη άδεια χρήσης του προγράμματος παρέχεται επίσης στο σύνδεσμο αυτό.

Το λογισμικό ANSYS



Εικόνα 66: Λογισμικό ANSYS logo

Οι προσομοιώσεις της Μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων έγιναν στο λογισμικό *ANSYS Workbench*. Από το χώρο εργασίας του, υπάρχει πρόσβαση στα τρία εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν.

- Επιλέγοντας την καρτέλα **Mechanical Data**, ανοίγει το εργαλείο που μπορεί ο χρήστης να καθορίσει τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών του μοντέλου.
- Κάνοντας διπλό-κλικ στην καρτέλα **Geometry**, ανοίγει το εργαλείο *ANSYS DesignModeler*, στο οποίο γίνεται επεξεργασία της γεωμετρίας του μοντέλου.
- Με την επιλογή της καρτέλας **Model**, ο χρήστης ανοίγει το εργαλείο *ANSYS Mechanical*, στο οποίο γίνεται όλη η διαδικασία της Μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων, δηλαδή δημιουργείται το πλέγμα (mesh), αποδίδονται οι ιδιότητες στο κάθε σώμα, ορίζονται οι οριακές συνθήκες και καθορίζονται οι είσοδοι και οι έξοδοι της προσομοίωσης.

Χρησιμοποιήθηκε το Student Version του λογισμικού και η άδεια χρήσης του είναι η παρακάτω:

```
# The following key is for 'ANSYS Academic Teaching Introductory'
INCREMENT aa_t_i ansyslmd 9999.9999 31-jul-2016 uncounred \
64DB337664EB \VENDOR_STRING=customer:01055371 HOSTID=DEMO \
SUPERSEDE ISSUED=10-dec-2015 START=10-dec-2015 TS_OK \
SIGN2="0025 8A40 CF7D E661 B86B 3DB5 076C 2400 96AC 66AD 78DE \
DFD9 022C 5969 0282"
```

Εικόνα 67: Άδεια χρήσης του λογισμικού ANSYS

Αναφορές

- [1] “<http://www.soundintel.com/en/technology/how-the-human-ear-works>”
- [2] R. L. Drake, W. Vogl and A. W. Mitchell, *GRAY'S Ανατομία, Τόμος 2*. Π.Χ. Πασχαλίδης, 2007.
- [3] S. Mansour, J. Magnan, H. Haidar, K. Nicolas and S. Louryan, *Comprehensive and Clinical Anatomy of the Middle Ear*. Springer, 2013.
- [4] Δ. Ρογκάλας, *Ανάπτυξη προσομοιωτή λειτουργίας μέσου ωτός με σκοπό την υποστήριξη στη διάγνωση*. 2013.
- [5] E. G. Wever and M. Lawrence, *Physiological Acoustics*. Princeton University Press, 1954.
- [6] U. B. Willi, *Middle-ear Mechanics: The Dynamic Behavior of the Incudo-Malleolar Joint and its Role During the Transmission of Sound*. 2003.
- [7] G. Vollandri, F. D. Puccio, P. Forte and C. Carmignani, “Biomechanics of the tympanic membrane” 2010.
- [8] Α. Αθανασιάδης-Σισμάνης, *Ωτορινολαρυγγολογία, Χειρουργική κεφαλής και τραχήλου*. Παρισσιανού Α.Ε., 2011.
- [9] T. Koike, H. Wada and T. Kobayashi, “Modeling of the human middle ear using the finite-element method” 2002.
- [10] S. Ihrle, M. Lauxmann, A. Eiber and P. Eberhard, “Nonlinear modelling of the middle ear as an elastic multibody system — applying model order reduction to acousto-structural coupled systems” 2012.
- [11] X. Zhang, X. Guan, D. Nakmali, V. Palan, M. Pineda and R. Z. Gan, “Experimental and modeling study of human tympanic membrane motion in the presence of middle ear liquid” 2014.
- [12] “<http://www.roynicholson.com.au/ent-pages/BSM.html>”
- [13] “http://nlpcindia.in/products_inner.php?menutitle=Ear%20Ventilation%20Tubes&category=TORP”
- [14] F. Zhao, T. Koike, J. Wang, H. Sienz and R. Meredith, “Finite element analysis of the middle ear transfer functions and related pathologies” 2008.
- [15] I. F. Spiridon, A. I. Sakellarios, G. A. Rigas, A. Tagaris, C. V. Bellos, A. Bibas, F. Böhnke, D. Iliopoulou, D. Koutsouris and D. I. Fotiadis, “Effect of modeling parameters on the frequency response of the middle ear by means of finite element analysis” 2015.

-
- [16] K. Plakas, P. Katrakazas, A. Bibas and D. Koutsouris, “Otosclerosis and tympanosclerosis modeling using the finite element method” 2016.
- [17] J. J. Ballenger and J. B. Snow, *Ωτορινολαρυγγολογία, Τόμος 3*. Π.Χ. Πασχάλιδης, 1999.
- [18] A. C. Guyton and J. E. Hall, *Ιατρική Φυσιολογία*. Παρισιανού Α.Ε., 2013.
- [19] “https://www.palgrave.com/resources/sample-chapters/9780333993644_sample.pdf”
- [20] Κ. Πλάκας, “Μοντελοποίηση ασθενειών μέσου ωτός με την χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων” 2015.
- [21] S. Khanna and J. Tonndorf, *Tympanic membrane vibrations in cats studied by time-averaged holography*. 1970.
- [22] H. Helmholtz, *The mechanism of the ossicles of the ear and membrana tympani*. Pfluger Archiv fur Physiologie, 1868.
- [23] O. Stuhlman, “The nonlinear transmission characteristics of the auditory ossicles” 1937.
- [24] K. Gyo, H. Aritomo and R. Goode, “Measurement of the ossicular vibration ratio in human temporal bones by use of a video measuring system” 1987.
- [25] C. Koppl, G. A. Manley, A. N. Popper and R. N. Fay, *The mechanism of the ossicles of the ear and membrana tympani*. Springer, 2014.
- [26] Π. Κ. Γκότσης, *Πεπερασμένα στοιχεία*. Εκδόσεις Ζήτη, 2004.
- [27] J. Zwislocki, “Analysis of the middle ear function” 1962.
- [28] W. Funnell and C. Laszlo, “Modeling of the cat eardrum as a thin shell using the finite-element method” 1978.
- [29] H. Ladak and W. Funnell, “Finite element modeling of the normal and surgically repaired cat middle ear” 1996.
- [30] K. Williams and T. Lesser, “A finite element analysis of the natural frequencies of vibration of the human tympanic membrane” 1990.
- [31] K. Williams, A. Blayney and H. Rice, “Middle ear mechanics as examined by the finite element method” 1997.
- [32] H. Wada, T. Metoki and T. Kobayashi, “Analysis of dynamic behavior of human middle ear using a finite method” 1992.
- [33] H. Beer, M. Bornitz, J. Drescher, R. Schmidt and H. Hardtke, “Finite element modeling of the human eardrum and applications” 1997.

-
- [34] C. Lee, P. Chen, W. Lee, J. Chen and T. Liu, “Three-dimensional reconstruction and modeling of middle ear biomechanics by high-resolution computed tomography and finite element analysis” 2006.
- [35] X. W. R.Z. Gan, B.P. Reeves, “Modeling of sound transmission from ear canal to cochlea” 2007.
- [36] T.-S. Ahn, M.-J. Baek and D. Lee, “Experimental measurement of tympanic membrane response for finite element model validation of a human middle ear” 2013.
- [37] Q. Sun, K.-H. Chang, K. J. Dormer, R. K. Dyer, and R. Z. Gan, “An advanced computer-aided geometric modeling and fabrication method for human middle ear” 2002.
- [38] M. H. Sadd, *Elasticity: Theory, Applications and Numerics*. Elsevier, 2005.
- [39] “<http://www.britannica.com/science>”
- [40] M. Rudic, I. Keogh, R. Wagner, E. Wilkinson, N. Kiros, E. Ferrary, O. Sterkers, A. B. Grayeli, K. Zarkovic and N. Zarkovic, “The pathophysiology of otosclerosis: Review of current research” 2015.
- [41] “<http://www.oriladental.gr/page.center?pId=189&menuItem=48>”
- [42] “<http://patient.info/doctor/tympanosclerosis>”
- [43] “<http://orl-med.gr/traumatiki-diatrishi-tympanikoy-ymena.html>”
- [44] “<https://www.nlm.nih.gov/medlineplus/ency/article/007010.htm>”
- [45] “<https://www.bcm.edu/healthcare/care-centers/otolaryngology/conditions/ossicular-chain-dislocation>”
- [46] “<http://www.mathworks.com/help/matlab/ref/unwrap.html>”