



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Προσομοίωση και ανάλυση αορτών με ανεύρυσμα με χρήση
μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων**



Επιμέλεια

Κωνσταντίνος Κυπαρίσσης

ΑΜ 2013010036

Επιβλέπων καθηγητής: Γεώργιος Ε. Σταυρουλάκης

Χανιά, Μάιος, 2024

Προσομοίωση και ανάλυση αορτών με ανεύρυσμα με χρήση
μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων

Κωνσταντίνος Κυπαρίσσης

Περίληψη

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας έχει ανοίξει νέους ορίζοντες στον τομέα της υγείας μετασχηματίζοντας τον τρόπο που διαχειριζόμαστε τις ιατρικές πληροφορίες και ένα από τα κλειδιά αυτής της εξέλιξης είναι η παγκόσμια τάση στη δημιουργία ψηφιακών διδύμων ασθενών, ενός ολοκληρωμένου δηλαδή ψηφιακού ιατρικού αντιγράφου των ασθενών. Το θέμα της εργασίας στόχο έχει την δημιουργία ενός τέτοιου ψηφιακού αντιγράφου και εστιάζει στην ανάλυση των μεθόδων διάγνωσης των ανευρυσματικών αορτών σε μια συνεργασία της υπολογιστικής μηχανικής και της ιατρικής. Οι απαιτήσεις και οι ανάγκες των ανθρώπων που πάσχουν από αυτή την πολύ σοβαρή παθολογική κατάσταση είναι μεγάλες και μπορεί να έχει καταστροφικές συνέπειες εάν δεν αντιμετωπιστεί εγκαίρως και αποτελεσματικά. Γι' αυτό τον λόγο η χρήση των προσομοιώσεων μπορεί να μας βοηθήσει να κατανοήσουμε καλύτερα πως συμπεριφέρεται μια ανευρυσματική αορτή, να αναπτύξουμε καινούργιες μεθόδους πρόληψης και αντιμετώπισης, να κατανοήσουμε καλύτερα τους παράγοντες που επηρεάζουν την δυναμική τους και να αξιολογήσουμε με μεγαλύτερη σαφήνεια την κατάσταση του κάθε ασθενούς.

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με την ανάλυση δεδομένων, με χρήση της υπολογιστικής μηχανικής, που συλλέχθηκαν από μαγνητικές τομογραφίες ασθενών που έχουν διαγνωστεί με ανεύρυσμα. Οι τρισδιάστατες γεωμετρίες εισάγονται σε περιβάλλον προσομοίωσης για την μοντελοποίηση τους και γίνεται χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων και στοιχείων κελύφους με γραμμική στατική ανάλυση. Η έρευνα αυτή αποσκοπεί στην κατανόηση της δομής και της συμπεριφοράς των αορτών με ανεύρυσμα υπό συνθήκες πίεσης, με στόχο την αναγνώριση των περιοχών που αναπτύσσονται οι μέγιστες τάσεις και παραμορφώσεις στις επιφάνειες τους. Η χρήση μεθόδων προσομοίωσης και ανάλυσης αποτελεί κρίσιμο εργαλείο για την επιτυχή εφαρμογή της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων σε αυτό το πεδίο ερευνητικής προσπάθειας. Στόχος είναι η δημιουργία αξιόπιστων ψηφιακών μοντέλων, τα οποία αργότερα μπορούν να επεκταθούν ως ψηφιακά δίδυμα και η υπολογιστική μηχανική είναι ένα από τα εργαλεία που θα μας βοηθήσει σε αυτήν την προσπάθεια ώστε να εξερευνήσουμε πως μπορεί να συμβάλει στην πρόληψη και αντιμετώπιση αυτού του επικίνδυνου φαινομένου.

Simulation and analysis of aortas with aneurysm using finite element method

Konstantinos Kyparissis

Abstract

The development of technology has opened up new horizons in healthcare by transforming the way we manage medical information and one of the keys to this development is the global trend towards the creation of digital patient twins, a complete digital medical record of patients. The topic of this thesis aims to create such a digital replica and focuses on the analysis of methods for the diagnosis of aneurysmal aortas in a collaboration between computational engineering and medicine. The demands and needs of people suffering from this very serious pathological condition are great and can have devastating consequences if not treated in time and effectively. For this reason, the use of simulations can help us to better understand how an aneurysmal aorta behaves, to develop new methods of prevention and treatment, to better understand the factors that influence its dynamics and to assess more clearly the situation of each patient.

This thesis deals with the analysis of data, using computational mechanics, collected from MRI scans of patients diagnosed with aneurysm. The 3D geometries are imported into a simulation environment for modelling and the finite element and shell element method with linear static analysis is used. This research aims to understand the structure and behavior of aneurysmal aortas under pressure conditions, with the aim of identifying the regions where the maximum stresses and deformations develop on their surfaces. The use of simulation and analysis methods is a critical tool for the successful application of the finite element method in this area of research effort. The goal is to create reliable digital models, which can eventually lead to digital twins, and computational mechanics is one of the tools that will assist us in this effort to explore how it can help prevent and address this dangerous phenomenon.

Ευχαριστίες

Έχοντας κατανοήσει την δύσκολη φύση του θέματος, η περάτωση αυτής της εργασίας θα ήταν αδύνατη χωρίς τα πρόσωπα που βοήθησαν καθ' όλη την διάρκεια,

επομένως θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου, κύριο **Γεώργιο Σταυρουλάκη**, για όλες τις κατευθυντήριες οδηγίες και τον υπολογιστικό εξοπλισμό που είχα στην διάθεσή μου καθώς επίσης και για τις απαντήσεις του σε όλες μου τις ερωτήσεις σχετικά με την διπλωματική εργασία.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συνεργάτες του κύριου Γ. Σταυρουλάκη για τις οδηγίες τους, τα κλινικά δεδομένα που μας παρείχαν και ως συσυγγραφείς στην παρούσα εργασία αλλά και σε μελλοντική επί του θέματος, τους:

Κκ. Ιωάννη Κακίση και **Κωνσταντίνο Μουλακάκη** από το τμήμα της *Αγγειοχειρουργικής Κλινικής, Πανεπιστημιακό Γενικό Νοσοκομείο "Αττικό", Ιατρική Σχολή, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών*

και τους κκ. **Χρήστο Μανόπουλο** και **Αναστάσιο Ράπη** από το *Εργαστήριο Βιορευστομηχανικής & Βιοϊατρικής Τεχνολογίας, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο*

το ερευνητικό πρόγραμμα safe-aorta που έκανε δυνατή την συλλογή και επεξεργασία των στοιχείων μέσω του τοπικού συντονιστή Δρ. Μάριου Αντωνακάκη.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την **κα. Μαρία-Στέλλα Δαράκη**, διδακτορικό φοιτητή στο τμήμα την υπολογιστικής μηχανικής του Πολυτεχνείου Κρήτης για την βοήθεια της στην εξοικείωση μου με τον υπολογιστικό εξοπλισμό του εργαστηρίου και τον κύριο **Νικόλαο Κλαδοβασιλάκη**, Μεταδιδακτορικό ερευνητή στο Πολυτεχνείο Κρήτης, για την καθοδήγηση του στην μοντελοποίηση των προσομοιώσεων.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω το Πολυτεχνείο Κρήτης για την μέριμνα που μου παρείχε όλα αυτά τα χρόνια, που χωρίς αυτήν η περάτωση των σπουδών μου θα ήταν αδύνατη καθώς και όλο το διδακτικό προσωπικό για την εκπαίδευση και την παιδεία που έλαβα, χάρη σε αυτούς εξερεύνησα τις δυνατότητες μου και διεύρυνα τους ορίζοντες μου.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1	8
1.1 Εισαγωγή	8
1.2 Καινοτομία και κίνητρο	8
1.3 Συνοπτική επισκόπηση εργασίας	8
Κεφάλαιο 2 Παθοφυσιολογία Ανθρώπινης Αορτής	10
2.1 Εισαγωγή	10
2.2 Ανθρώπινη Αορτή	10
2.2.1 Ορισμός ανθρώπινης αορτής και αιμοδυναμική	10
2.2.2 Παθολογία αορτών	12
2.2.2.1 Ανεύρυσμα αορτής	12
2.2.2.1.1 Αίτια ανευρυσμάτων	13
2.2.2.1.2 Συμπτώματα ανευρυσμάτων	14
2.2.2.1.3 Διάγνωση	14
2.2.2.1.4 Αντιμετώπιση	17
2.2.2.2 Αορτίτιδα	17
2.2.2.3 Στένωση της αορτικής βαλβίδας	18
2.2.2.4 Ανεπάρκεια της αορτικής βαλβίδας	19
Κεφάλαιο 3 Μοντελοποίηση σε περιβάλλον προσομοίωσης	21
3.1 Εισαγωγή	21
3.2 Προσομοίωση	21
3.3.1 Μοντελοποίηση σε περιβάλλον προσομοίωσης	22
3.3.1.1 Παραμετροποίηση αορτών	22
3.3.1.1.1 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων FEM και στοιχείων κελύφους (Shell Elements)	22
3.3.1.1.2 Τρισδιάστατα μοντέλα	24
3.3.2 Υλικά	24
3.3.3 Συνοριακές συνθήκες και φορτία	26
3.3.3.1 Γεωμετρία κελύφους και οριακές συνθήκες	27

Κεφάλαιο 4 Αποτελέσματα	29
4.1 Αποτελέσματα ανάλυσης	29
4.1.1 Στατική γραμμική ανάλυση	29
4.1.1.1 Στατική Γραμμική ανάλυση μοντέλων ανευρυσματικών αορτών	29
4.1.1.2 Προσομοίωση μοντέλων	29
Μοντέλο T1-P2	30
Μοντέλο T1-P5	31
Μοντέλο T1-P6	32
Μοντέλο T1-P9	33
Μοντέλο T1-P10	34
Μοντέλο T1-P11	35
Μοντέλο T1-P14	36
Μοντέλο T1-P16	37
Μοντέλο T2-P2	38
Μοντέλο T2-P3	39
Μοντέλο T2-P13	40
Μοντέλο T2-P14	41
Μοντέλο T2-P15	42
Μοντέλο T2-P17	43
4.2 Συμπεράσματα	46
4.3 Μελλοντική έρευνα.....	47
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	48

Κεφάλαιο 1

1.1 Εισαγωγή

Η ιατρική είναι από τις αρχαιότερες επιστήμες και ασχολείται με την διάγνωση και την θεραπεία ασθενειών του ανθρώπου με ολοένα και αυξανόμενες ανάγκες σε όλους τους κλάδους της. Συνδυάζει γνώσεις και μελέτες από πολλούς άλλους κλάδους επιστημών, όπως της βιολογίας, της φυσικής, της χημείας κ.λπ. Θα λέγαμε ότι η ιατρική είναι ο ακρογωνιαίος λίθος και ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία στην σύσταση, ανάπτυξη και την ευημερία κάθε κοινωνίας.

Η εξέλιξη της επικοινωνίας και των επιστημών έδωσε την δυνατότητα να βελτιωθεί η ποιότητα ζωής της ανθρωπότητας και να διευκολυνθεί η κάλυψη των αναγκών της καθημερινής ζωής εκατομμυρίων ανθρώπων. Όλες οι συνδυασμένες τεχνολογίες, γνώσεις και εφαρμογές δουλεύουν σε αυτήν την κατεύθυνση και η ιατρική είναι μια από αυτές.

Έτσι και ο συνδυασμός των επιστημών της ιατρικής και της μηχανικής έχει επιτρέψει στην δημιουργία εφαρμογών και τεχνολογίας για την διάγνωση, αντιμετώπιση, πρόληψη, θεραπεία και φροντίδα των ασθενών και παράλληλα διευκολύνει το καθημερινό έργο των ιατρών να προάγουν την υγεία με τον πιο ασφαλή και γρήγορο τρόπο. Η μηχανική είναι ίσως η κινητήριος δύναμη για την ιατρική καθώς παρέχει συνεχή εξέλιξη στον τομέα με καινοτόμες τεχνολογίες και εφαρμογές για την εξυπηρέτηση των αναγκών της.

1.2 Καινοτομία και κίνητρο

Η καινοτομία πίσω από την ιδέα της δημιουργίας ψηφιακών διδύμων ανευρυσματικών αορτών είναι η ενοποίηση των κλινικών δεδομένων και η άμεση προσβασιμότητα και ενημέρωση των ιατρών από οποιοδήποτε μέρος του κόσμου για την κλινική κατάσταση του ασθενή. Η ανάπτυξη αλγοριθμικών μοντέλων, που εκπαιδεύονται μέσω τεχνικών μηχανικής μάθησης (machine learning) σε ένα σύστημα υποστήριξης κλινικών αποφάσεων σχετικά με αυτήν την πολύ σοβαρή παθολογική κατάσταση αποτελεί καθοριστική σημασία στην φροντίδα και την αντιμετώπιση της. [1]

Το αντικείμενο που μελετά η παρούσα διπλωματική εργασία, η προσομοίωση δηλαδή των ανευρυσματικών αορτών, έχει ως κύριο κίνητρο της να βοηθήσει με την σειρά της αυτήν την ιδέα, την δημιουργία και ενοποίηση δηλαδή ψηφιακών διδύμων, να προστεθεί ως προσπάθεια για την δημιουργία κι άλλων, πιο ακριβών και εξελιγμένων μοντέλων τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη βελτίωση της διάγνωσης, της πρόβλεψης και της πρόληψης των ανευρυσματικών αορτών, καθώς και για την υποστήριξη της λήψης κλινικών αποφάσεων που σχετίζονται με τη θεραπεία και τη διαχείριση αυτών των περιπτώσεων.

1.3 Συνοπτική επισκόπηση εργασίας

Στην παρούσα διπλωματική συλλέχθηκαν δεδομένα από μαγνητικές τομογραφίες αορτών που έχουν ήδη διαγνωστεί με ανεύρυσμα, σχεδιάστηκαν οι τρισδιάστατες γεωμετρίες τους με τη βοήθεια H/Y και η ανάλυση της μηχανικής απόκρισης κάτω από συγκεκριμένες υποθέσεις γίνεται με χρήση της υπολογιστικής μηχανικής. Το αντικείμενο αυτής της εργασίας είναι η μελέτη των ανευρυσματικών αορτών σε περιβάλλον προσομοίωσης με χρήση πεπερασμένων στοιχείων σε στατική γραμμική ανάλυση του τοιχώματος της αορτής.

Στη συνέχεια της παρούσας εργασίας, στο 2^ο κεφάλαιο θα παρουσιάζεται η βιβλιογραφική έρευνα που έγινε για τις ανευρυσματικές αορτές και πιο γενικά για την παθοφυσιολογία των αορτών, τους ορισμούς που την διέπουν, τις πιο κοινές παθήσεις της, τα αίτια, τα συμπτώματα, την διάγνωση, την αντιμετώπιση και φροντίδα.

Έπειτα, στο 3^ο κεφάλαιο θα μοντελοποιηθεί το πρόβλημα σε περιβάλλον προσομοίωσης, θα παρουσιαστούν τα τρισδιάστατα μοντέλα των αορτών καθώς και η παραμετροποίηση τους, όπως οι συνοριακές συνθήκες, τα φορτία, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων και στοιχείων κελύφους και τους μαθηματικούς τύπους που διέπουν την μοντελοποίηση.

Στο 4^ο κεφάλαιο, θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της στατικής γραμμικής ανάλυσης με χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων και των στοιχείων κελύφους και με βάση την παραμετροποίηση που έγινε στα τρισδιάστατα μοντέλα και θα παρουσιαστούν οι τάσεις και οι παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στις επιφάνειες.

Σκοπός αυτής της εργασίας είναι να μελετήσει πως συμπεριφέρεται η ανευρυσματική αορτή υπό σταθερή πίεση, να βρει και να αναδείξει τις περιοχές που παρουσιάζονται οι μέγιστες τάσεις και παραμορφώσεις πάνω στις επιφάνειες και να παρουσιαστούν τα αποτελέσματα. Τέλος, θα να γίνουν αναφορές και προτάσεις για μελλοντικές εφαρμογές.

Η παρούσα εργασία μέσω της υπολογιστικής μηχανικής, με χρήση προσομοίωσης, θα προσπαθήσει να βοηθήσει στην ανάλυση των ανευρυσματικών αορτών σε ακαδημαϊκό επίπεδο. Τα υπάρχοντα γεωμετρικά στοιχεία από τις μαγνητικές τομογραφίες συμπληρώθηκαν με υποθέσεις για τις τιμές των αγνώστων στοιχείων (ιδιότητες υλικού, πάχος αρτηρίας, αρτηριακή πίεση) ώστε να δειχθούν οι δυνατότητες των μηχανικών υπολογιστικών μοντέλων που δημιουργήθηκαν. Τα αποτελέσματα μπορούν να επεκταθούν σε διάφορες κατευθύνσεις. Έτσι, θα ανοίξει ο δρόμος για περισσότερη μελέτη τόσο σε θεωρητικό περιβάλλον όσο και σε κλινική εφαρμογή.

Κεφάλαιο 2 Παθοφυσιολογία Ανθρώπινης Αορτής

2.1 Εισαγωγή

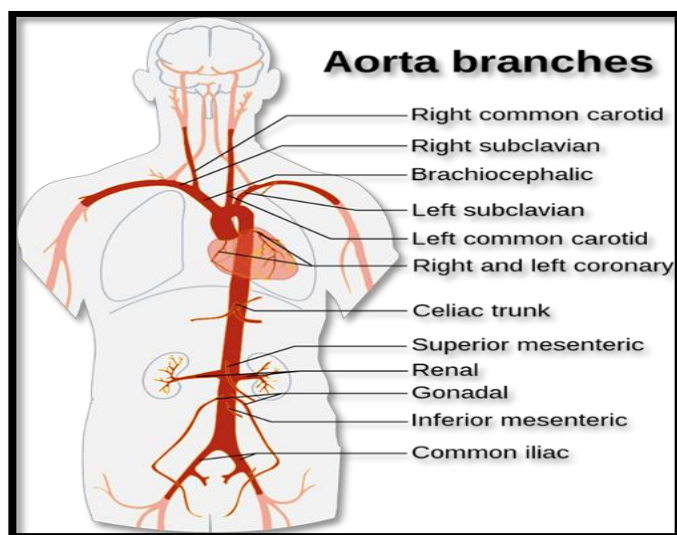
Το ανθρώπινο κυκλοφοριακό σύστημα απαρτίζεται από την καρδιά, το αίμα και τα αιμοφόρα αγγεία. Η καρδιά αντλεί το αίμα, μέσω των αρτηριών, που μεταφέρει το οξυγόνο και τα θρεπτικά συστατικά σε όλο το σώμα, τους ιστούς και τα όργανα του ανθρώπου. Τα τριχοειδή αγγεία με τη σειρά τους είναι υπεύθυνα για την μεταφορά του οξυγόνου και των θρεπτικών συστατικών από τις αρτηρίες προς τα κύτταρα των ιστών και των οργάνων ενώ οι φλέβες είναι υπεύθυνες για την επιστροφή του αίματος στην καρδιά. Επομένως η φυσιολογία και η ανατομία της αορτής που είναι η μεγαλύτερη αρτηρία στο κυκλοφοριακό σύστημα αποτελεί κρίσιμο αντικείμενο μελέτης για την καλύτερη κατανόηση του τρόπου λειτουργίας της.

Σε αυτό το κεφάλαιο θα προβούμε σε μια ανασκόπηση της σχετικής βιβλιογραφίας της ανθρώπινης αορτής, τους μηχανισμούς που τη διέπουν, την παθολογία και τις επιπλοκές της, την κλινική διάγνωση και την αντιμετώπιση τους.

2.2 Ανθρώπινη Αορτή

2.2.1 Ορισμός ανθρώπινης αορτής και αιμοδυναμική

Ως ανθρώπινη αορτή ορίζεται το κύριο αιμοφόρο αγγείο που εισέρχεται από το άνω τμήμα της καρδιάς και είναι υπεύθυνο για την μεταφορά του αίματος που αντλείται από την αριστερή κοιλία στο κυκλοφοριακό σύστημα [2]. Παράλληλα, η αιμοδυναμική αποτελεί σημαντικό παράγοντα στη μελέτη της παθοφυσιολογίας της ανθρώπινης αορτής καθώς ασχολείται με την μελέτη της ροής του αίματος στο καρδιαγγειακό σύστημα του ανθρώπου. Κατανοώντας τις βασικές αρχές λειτουργίας της φυσικής ροής του αίματος μπορούμε να ανιχνεύσουμε, να εξηγήσουμε και να αντιμετωπίσουμε πολλές καρδιαγγειακές παθήσεις και διαταραχές στο κυκλοφοριακό σύστημα.



Εικόνα 2.1 Ανθρώπινη αορτή [3].

Αιμοδυναμική

Μπορούμε να αναλύσουμε ενδεικτικά 4 βασικούς παράγοντες της αιμοδυναμικής για την καλύτερη κατανόηση του τρόπου λειτουργίας της στο ανθρώπινο σώμα, όπως το είδος της ροής του αίματος, την ταχύτητα, την αρτηριακή πίεση και την συχνότητα παλμών.

- **Είδος ροής του Αίματος**

Το αίμα θεωρείται υπό φυσιολογικές συνθήκες ασυμπίεστο ρευστό με πυκνότητα 1.05 gr/m^3 και η ροή του μπορεί να χαρακτηριστεί ομαλή, στρωτή ή τυρβώδης. Σε μεγάλα αιμοφόρα αγγεία, όπως η αορτή, η ροή είναι ομαλή συνήθως, ενώ σε μικρότερα αγγεία, όπως τα τριχοειδή, μπορεί να είναι τυρβώδης και εξαρτάται επίσης από πολλούς παράγοντες όπως τις ιδιότητες του αίματος (ιξώδες, πυκνότητα), το διαμέτρημα του αγγείου, την καρδιακή παροχή, την ταχύτητα ροής καθώς και οι διαταραχές των αιμοφόρων αγγείων μπορούν να επηρεάσουν το είδος της ροής όπως η αθηρωμάτωση.

- **Ταχύτητα ροής του αίματος**

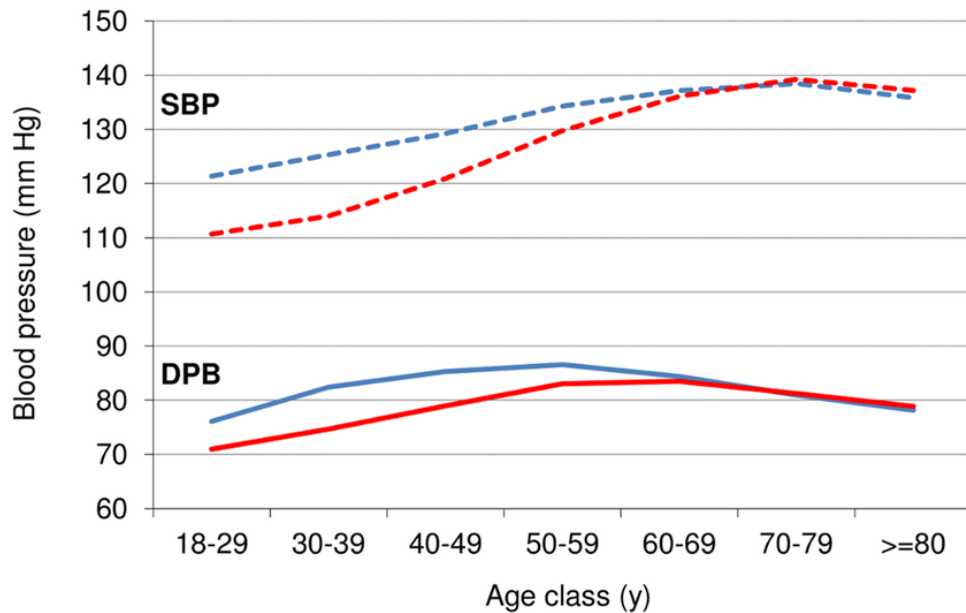
Η ταχύτητα της ροής του αίματος εξαρτάται και αυτή από διάφορους παράγοντες όπως την αγγειακή αντίσταση, την πίεση, το είδος και την διάμετρο του αιμοφόρου αγγείου, τα επίπεδα υγείας του κυκλοφοριακού συστήματος και οι τιμές της διαφέρουν ανάλογα τις συνθήκες. Υπό φυσιολογικές καταστάσεις ενδεικτικές τιμές της ταχύτητας μπορεί να είναι από 0.3 m/s για μεγάλα αιμοφόρα αγγεία, όπως η αορτή, έως 0.05 m/s στα τριχοειδή αγγεία και έως 20 m/s στις φλέβες.

- **Αρτηριακή πίεση**

Η αρτηριακή πίεση είναι η δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας που ασκεί το αίμα στα τοιχώματα των αρτηριών κατά την καρδιακή συστολή και διαστολή και εξαρτάται από την καρδιακή παροχή αίματος και από την αντίσταση των αρτηριών. Η αρτηριακή πίεση είναι αποτέλεσμα 2 συνιστωσών, της συστολικής και της διαστολικής πίεσης που είναι η πίεση που ασκείται από το αίμα κατά την συστολή και διαστολή της καρδιάς στα αγγειακά τοιχώματα.

Οι τιμές της αρτηριακής πίεσης εξαρτώνται από διάφορους παράγοντες συμπεριλαμβανομένων της ηλικίας, του τρόπου ζωής και διατροφής, του φύλου και της κατάστασης της υγείας του ατόμου. Ενδεικτικές τιμές για την συστολική πίεση είναι 90mmHg - 120mmHg ενώ για την διαστολική πίεση 60mmHg - 80mmHg ενώ υπό φυσιολογικές συνθήκες για έναν υγιή ενήλικα η αρτηριακή πίεση κυμαίνεται 120mmHg - 80mmHg για συστολική και διαστολική πίεση αντίστοιχα.

Παρακάτω παρουσιάζεται ένα γράφημα για ενδεικτικές φυσιολογικές τιμές ηλικίας-αρτηριακής πίεσης και φύλου. Η μπλε διακεκομμένη γραμμή αντιστοιχεί σε φυσιολογικές ενδεικτικές τιμές συστολικής πίεσης αντρών ανάλογα την ηλικία ενώ η κόκκινη διακεκομμένη για τις γυναίκες. Η συνεχής μπλε γραμμή αντιστοιχεί σε φυσιολογικές ενδεικτικές τιμές διαστολικής πίεσης για τους άντρες ανάλογα την ηλικία ενώ η συνεχής κόκκινη γραμμή για τις γυναίκες.



Εικόνα 2.2 Γράφημα ηλικίας-αρτηριακής πίεσης για άντρες και γυναίκες [4]

- **Συχνότητα παλμών**

Η συχνότητα παλμών είναι ο αριθμός των καρδιακών παλμών ανά λεπτό και αντιπροσωπεύει το ρυθμό της καρδιακής δραστηριότητας. Η φυσιολογική συχνότητα παλμών για έναν ενήλικα κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 60 έως 100 παλμούς ανά λεπτό, αν και αυτό μπορεί να διαφέρει ανάλογα με την ηλικία, το φύλο, τη φυσιολογική κατάσταση και άλλους παράγοντες.

Η κατανόηση της αιμοδυναμικής είναι κρίσιμη για την αξιολόγηση της καρδιαγγειακής υγείας και την αντιμετώπιση πολλών καρδιαγγειακών νοσημάτων και διαταραχών. Από τις ταχύτητες ροής και τις πιέσεις μέχρι τη συχνότητα των παλμών, η αιμοδυναμική προσφέρει σημαντικές πληροφορίες για τη λειτουργία του καρδιαγγειακού συστήματος.[5] [6]

2.2.2 Παθολογία αορτών

Οι πιο συνηθισμένες παθήσεις της αορτής είναι:

- Το ανεύρυσμα αορτής
- Η αορτίτιδα
- Η στένωση της αορτικής βαλβίδας
- Η ανεπάρκεια της αορτικής βαλβίδας

Παρακάτω θα παρουσιάσουμε μία αναφορά στις παθήσεις της αορτής με περισσότερο ενδιαφέρον στο ανεύρυσμα της ανθρώπινης αορτής καθώς αποτελεί το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας. [7]

2.2.2.1 Ανεύρυσμα αορτής

Ανεύρυσμα αορτής ορίζεται η διόγκωση, διαστολή της επιφάνειας (τοιχώματος) του αιμοφόρου αγγείου, συγκεκριμένα μεγαλύτερου του 50% των φυσιολογικών τιμών της εστιακής διεύρυνσης της

διαμέτρου του. Η διαστολή αυτή εκδηλώνεται προοδευτικά σε τμήματα της αορτής με υψηλό κίνδυνο ρήξης προκαλώντας εσωτερική αιμορραγία και θάνατο. Τα περισσότερα ανευρύσματα παρατηρούνται στα κοιλιακά, θωρακικά και εγκεφαλικά τμήματα της αορτή [8].



Εικόνα 2.3 Αγγειογραφία ανευρύσματος εγκεφαλικής αρτηρίας [8]

2.2.2.1.1 Αίτια ανευρυσμάτων

Τα αίτια που προκαλούν αυτό το φαινόμενο δεν είναι σαφή, ποικίλουν και δεν είναι προκαθορισμένα, διαφέρουν ανάλογα τον ασθενή, την μορφολογία και την τοποθεσία του ανευρύσματος, υπάρχουν όμως παράγοντες που μπορούν να αποτελέσουν κύριο αίτιο ή να συμβάλουν στην ανάπτυξη τους όπως:

- **Κληρονομικότητα:** οι γενετικοί παράγοντες εξετάζονται συνήθως ως αίτιο και μια εικόνα στο ιατρικό ιστορικό συγγενών 1^{ου} βαθμού μπορεί να βοηθήσει στην διάγνωση και την πρόληψη τους
- **Αθηροσκλήρωση:** Η στένωση των αρτηριών λόγω δημιουργίας αθηρωματικής πλάκας από οξειδωμένα λιπίδια, χοληστερόλη και άλλες ουσίες μπορεί να προκαλέσουν την εμφάνιση ανευρυσμάτων
- **Διαβήτης:** το ζάχαρο μπορεί να συμβάλει ως κύριο αίτιο ή να επιταχύνει την δημιουργία αθηροσκλήρωσης, να προκαλέσει φλεγμονή ή περισσότερες διαταραχές στην λειτουργία του αιμοφόρου αγγείου
- **Υπέρταση:** η υπέρταση μπορεί να αποτελέσει κύριο αίτιο στην δημιουργία ανευρυσμάτων καθώς η υψηλή αρτηριακή πίεση προσθέτει επιπλέον φορτίο στα τοιχώματα των αιμοφόρων αγγείων
- **Τραυματισμοί:** τραυματισμοί στα αγγεία από παλαιότερες ή επαναλαμβανόμενες ιατρικές επεμβάσεις μπορεί να συμβάλλουν στην εμφάνιση ανευρύσματος. Τραυματισμοί επίσης από κακώσεις, δυστυχήματα ή και από συμπίεσεις (ζώνες ασφαλείας κ.α.) μπορεί επίσης να προκαλέσουν την εμφάνιση ανευρυσμάτων

- **Μόλυνση:** μολυσματικές ασθένειες μπορεί να συνδεθούν με ανευρύσματα όπως η σύφιλη [9]

2.2.2.1.2 Συμπτώματα ανευρυσμάτων

Τα συμπτώματα των ανευρυσμάτων εξαρτώνται από την περιοχή που εμφανίζονται κατά μήκος όλης της αορτής. Μερικά από αυτά τα συμπτώματα ανάλογα με την περιοχή που εμφανίζονται είναι:

Ανεύρυσμα εγκεφάλου [10]

- Ισχυρός πονοκέφαλος
- Πόνος στα μάτια
- Προβλήματα όρασης (θολή ή διπλή όραση)
- Περιορισμένη κινητικότητα ματιών

Ανεύρυσμα θωρακικής αορτής [11]

- Πόνος στην κάτω γνάθο, στον τράχηλο ή στο πάνω μέρος της πλάτης
- Πόνος στο στήθος ή στην πλάτη
- Βήχας ή δυσκολία στην αναπνοή

Ανεύρυσμα κοιλιακής αορτής [12] [13]

- πόνος είναι το πιο σύνηθες σύμπτωμα και γίνεται αισθητός στην κοιλιά, στο στήθος, στη πλάτη ή στην βουβωνική χώρα
- αίσθημα παλμών στην κοιλιά σε συγχρονισμό με τους παλμούς της καρδιάς
- Σε σπάνιες περιπτώσεις, στα πόδια και τα δάκτυλά, μπορεί να εμφανιστούν περιοχές με μπλε χρώμα και πόνο λόγω εμβολής (διασκόρπισης) συντριμμάτων αθηροθρομβωτικού υλικού από το ανεύρυσμα προς τα κάτω (“σύνδρομο κυανών δακτύλων”)

2.2.2.1.3 Διάγνωση

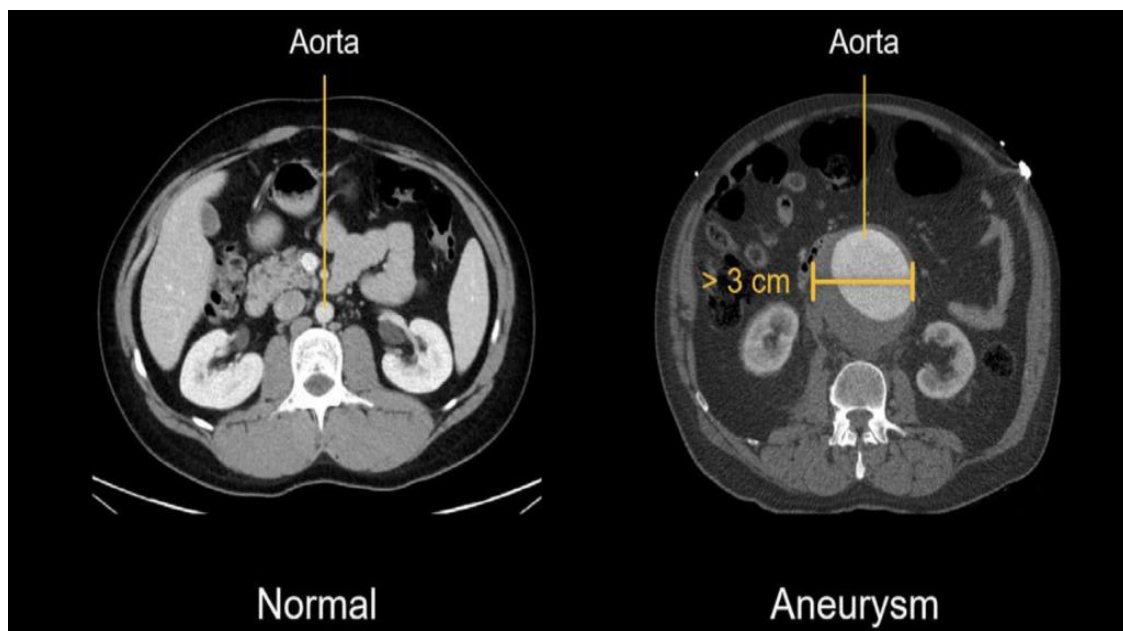
Η διάγνωση των ανευρυσμάτων, καθώς όπως αναφέραμε συνήθως αποτελούν τυχαία ευρήματα γιατί οι ασθενείς είναι ασυμπτωματικοί, γίνεται μετά από μαγνητική τομογραφία (MRI), μαγνητική αγγειογραφία (MRA), αξονική (CT), υπερηχογράφημα triplex, αγγειογραφία, αξονική τομογραφία αγγειογραφίας (CTA) ή εάν κριθεί απαραίτητο σε πολύ σπάνιες περιπτώσεις, όταν οι απεικονιστικές εξετάσεις είναι αρνητικές και υπάρχει έντονη υποψία ανευρύσματος, απευθυνόμαστε σε πιο εξειδικευμένες εξετάσεις. [14] [15]

Κατά την διάγνωση τους μπορεί να χαρακτηριστούν αληθή ή ψευδή ανάλογα με τη περίπτωση. Ψευδοανευρύσματα, κοινώς ψευδή, είναι αγγειακή ανωμαλία που διακόπτει την συνέχεια του αρτηριακού τοιχώματος και δυσκολεύει την ακριβή διάγνωση. Μπορεί να προκαλέσουν πόνο και διαταραχές κινητικότητας στην περιοχή που εμφανίζονται, μυϊκή αδυναμία, απώλεια λειτουργίας οργάνων ή και εσωτερική αιμορραγία λόγω ρήξης αυτού. [16]

Παρακάτω απεικονίζονται ανευρύσματα διαγνωσμένα από διάφορες εξετάσεις:



Εικόνα 2.4 Υπέρηχος ανευρύσματος κοιλιακής αορτής [17]



Εικόνα 2.5 Αξονική τομογραφία (CT) ανευρύσματος κοιλιακής αορτή [18]



Εικονα 2.6 Μαγνητική αγγειογραφία (MRA) ανευρύσματος κοιλιακής αορτής [19]



Εικονα 2.7 Μαγνητική τομογραφία (MRI) ανευρύσματος κοιλιακής αορτής [20]

2.2.2.1.4 Αντιμετώπιση

Η αντιμετώπιση των ανευρυσμάτων είναι περίπλοκη διαδικασία λόγω της φύσης που διέπει αυτήν την πάθηση και εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως π.χ. η τοποθεσία τους, το μέγεθός τους, ο ρυθμός διάτασης τους, η μορφολογία τους, η κλινική κατάσταση του ασθενούς και τα συμπτώματά τους και είναι μια δύσκολη υπόθεση για τον σχεδιασμό του πλάνου αντιμετώπισης του θεράποντα ιατρού για την κατάλληλη θεραπεία ή φροντίδα.

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται είναι:

- **Στενή παρακολούθηση και παρατήρηση:** Εάν το ανεύρυσμα είναι μικρό (π.χ. ένα εγκεφαλικό ανεύρυσμα χαρακτηρίζεται μικρό εάν η διάμετρος του είναι <4mm-7mm), ασυμπτωματικό και η διάγνωση του ήταν τυχαία ίσως αποφασιστεί η παρακολούθηση της εξέλιξης του με τακτικές εξετάσεις.
- **Φαρμακευτική αγωγή:** Χορηγείται κατάλληλη φαρμακευτική αγωγή κορτικοστεροειδών, αντιφλεγμονωδών ή άλλων αντικών φαρμάκων ανάλογα την κλινική κατάσταση του ασθενή για μείωση των φλεγμονών, του πόνου, των οιδημάτων ή επικείμενης μόλυνσης του ανευρύσματος.
- **Χειρουργική επέμβαση:** Εάν το ανεύρυσμα χαρακτηριστεί επικίνδυνο και βρίσκεται σε μέρος που μπορεί να χειρουργηθεί υπάρχουν διάφορες χειρουργικές επεμβάσεις ανάλογα με την φύση και την τοποθεσία του ανευρύσματος. Κάποιες από αυτές είναι π.χ. με ενδοαγγειακή αποκατάσταση όπως τοποθέτηση ενδαυλιακού μοσχεύματος ή με εμβολισμό, φραγή δηλαδή του ανευρύσματος. [11] [21] [22]

Σε κάθε περίπτωση η κατάσταση των ασθενών αξιολογείται διαφορετικά και η αντιμετώπιση των ανευρυσμάτων είναι μια πολυπαραγοντική διαδικασία της οποίας η αποτελεσματικότητά της συνδέεται άμεσα με την πρόληψη και την έγκαιρη διάγνωση.

2.2.2.2 Αορτίτιδα

Σε συνέχεια των πιο συνηθισμένων παθήσεων της ανθρώπινης αορτής συναντάται η αορτίτιδα, μια πιο σπάνια νόσος, που ορίζεται ως η φλεγμονή του τοιχώματος της αορτής η οποία μπορεί να προκαλέσει σοβαρές επιπλοκές όπως αορτική ανεπάρκεια και αορτικό ανεύρυσμα.

Τα ακριβή αίτια αυτής της πάθησης είναι άγνωστα αλλά κάποιες φορές είναι αποτέλεσμα διάφορων αιτιών ή συνδυαστικών παραγόντων, όπως: [23]

- **Βακτηριάσεις ή ιογενείς λοιμώξεις** όπως π.χ. η σύφιλη, η φυματίωση και ο HIV μπορεί να ευθύνονται για την εμφάνιση της αορτίτιδας
- **Αγγειακά αυτοάνοσα νοσήματα** όπως π.χ. η νόσος Τακαγιάσου (Takayasu), ο Συστηματικός Ερυθηματώδης Λύκος (ΣΕΛ) και η Νόσος Behcet ίσως σε κάποιο στάδιο τους προσβάλλουν τα τοιχώματα της αορτής προκαλώντας φλεγμονή. [24]
- **Έλλειψη σύνδεσης των επιθηλιακών κυττάρων** σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να προκαλέσουν φλεγμονή στο εσωτερικό τοίχωμα της αορτής.
- **Ιατρικές επεμβάσεις:** κάποιες ιατρικές επεμβάσεις ή διαδικασίες μπορεί να προκαλέσουν αορτίτιδα όπως η αντιμετώπιση του αορτικού ανευρύσματος.

Συμπτώματα

Τα συμπτώματα της αορτίτιδας εξαρτιούνται από την σοβαρότητα της κατάστασης και ανάλογα με τον τύπο της φλεγμονής. Κάποια από αυτά αυτά είναι:

- Πόνος στο στήθος ή την κοιλιά
- Πόνος στην πλάτη ή στον ώμο
- Αναπνευστικά προβλήματα
- Αδυναμία και αίσθημα εξάντλησης

Διάγνωση

Η διάγνωση της αορτίτιδας γίνεται με μαγνητική τομογραφία (MRI), αξονική τομογραφία (CT), με αιματολογικές εξετάσεις ή με αορτογραφία που εμπεριέχει την έκχυση ραδιοπερατού υλικού για την σκιαγράφιση της αορτής και τον εντοπισμό ανωμαλιών.

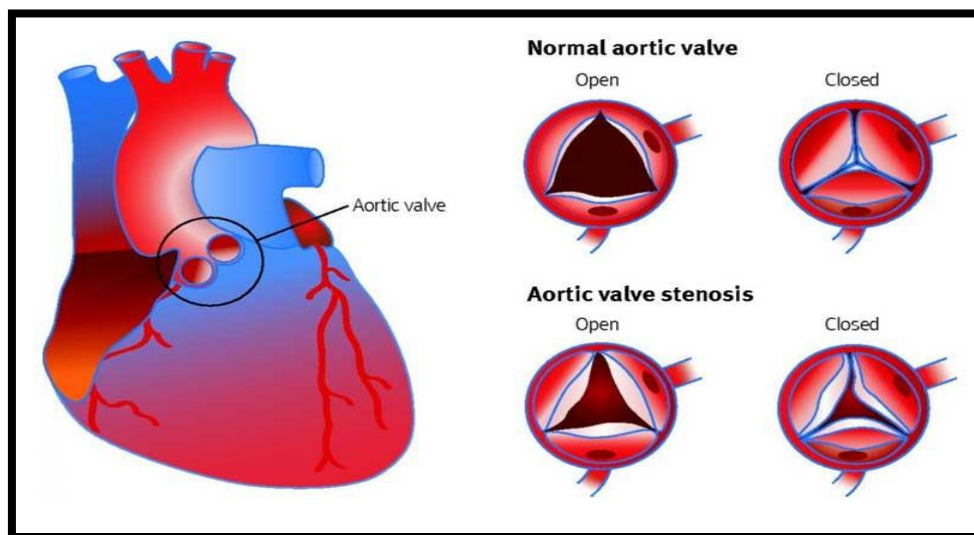
Αντιμετώπιση

Η αντιμετώπιση της αορτίτιδας εξαρτάται από την τύπο της αορτίτιδας, τα συμπτώματα και την σοβαρότητα της κατάστασης. Ορισμένες από τις μεθόδους αντιμετώπισης είναι:

- Χρήση φαρμακευτικής αγωγής
- Τακτική παρακολούθηση
- Αορτοπλαστική για επιδιόρθωση ή αντικατάσταση της αορτής

2.2.2.3 Στένωση της αορτικής βαλβίδας

Η Στένωση της αορτικής βαλβίδας είναι μία πάθηση όπου η αορτική βαλβίδα στενεύει και δεν μπορεί να ανοίξει και να κλείσει σωστά περιορίζοντας έτσι τη ροή του αίματος από τον αριστερό κόλπο της καρδιάς στην αορτή με συνέπεια να περιορίζεται η ροή του αίματος στο υπόλοιπο σώμα.



Εικόνα 2.9 Απεικόνιση της στένωσης της αορτικής βαλβίδας[25]

Αίτια

Τα αίτια που μπορεί να προκαλέσουν στένωση της αορτικής βαλβίδας είναι διάφορα και ορισμένα από αυτά είναι: [26] [27]

- Στένωση της αορτικής βαλβίδας λόγω γήρανσης
- Στεφανιαία νόσος
- Αθηροσκλήρωση
- Ρευματικός πυρετός
- Ακτινοθεραπεία στον θώρακα
- Συγγενής καρδιοπάθεια: Ορισμένα άτομα γεννιούνται με ανωμαλίες στην αορτική βαλβίδα, όπως μια βαλβίδα με λιγότερα ή περισσότερα φύλλα από το συνηθισμένο (π.χ. βαλβίδα με δύο φύλλα αντί τριών)

Συμπτώματα

Η στένωση της αορτικής βαλβίδας είναι μια προοδευτική νόσος και απειλητική για την ζωή με μεγάλο ποσοστό θνησιμότητας που αν δεν αντιμετωπιστεί έγκαιρα με την εμφάνιση των συμπτωμάτων το ποσοστό επιβίωσης μειώνεται δραματικά. Μερικά από τα συμπτώματα είναι:

- Δύσπνοια
- Αίσθημα εξάντλησης, κόπωση
- Πόνος στο στήθος
- Αρρυθμία
- Συγκοπή

Αντιμετώπιση

Η αντιμετώπιση της στένωσης της αορτικής βαλβίδας γίνεται χειρουργικά με επιδιόρθωση ή αντικατάσταση της αορτικής βαλβίδας. Η φαρμακευτική αγωγή βοηθάει στην μείωση της έντασης των συμπτωμάτων αλλά δεν λύνει το πρόβλημα.

2.2.2.4 Ανεπάρκεια της αορτικής βαλβίδας

Η ανεπάρκεια της αορτικής βαλβίδας είναι μια πάθηση της αορτής όπου η βαλβίδα δεν κλείνει καλά με αποτέλεσμα μια ποσότητα του αίματος να επιστρέφει στην αριστερή κοιλία.

Αίτια [27] [28]

Η συγκεκριμένη πάθηση μπορεί να οφείλεται σε διάφορες αιτίες, συμπεριλαμβανομένων:

- Συγγενής καρδιοπάθεια
- Ενδοκαρδίτιδα: λοίμωξη της ενδοκαρδίου
- Ύπαρξη νοσημάτων: όπως το σύνδρομο Marfan
- Ρευματικός πυρετός
- Τραυματισμός: όπως τροχαίο ατύχημα
- Διαβήτης

- Γήρανση

Συμπτώματα [27] [28]

Τα άτομα με ανεπάρκεια αορτικής βαλβίδας συχνά δεν παρουσιάζουν συμπτώματα για πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα καθώς η καρδιά ανταπεξέρχεται και δεν γνωρίζουν ότι έχουν την πάθηση αλλά καθώς ο βαθμός ανεπάρκειας επιδεινώνεται μπορεί να εμφανίσουν συμπτώματα, όπως:

- Φύσημα
- Αρρυθμία
- Στηθάγχη ή σφίξιμο στο στήθος
- Δύσπνοια
- Οίδημα κάτω άκρων
- Ζαλάδα ή λιποθυμία
- Κούραση ή αδυναμία

Διάγνωση

Η διάγνωση της ανεπάρκειας αορτικής βαλβίδας γίνεται με έναν συνδυασμό κλινικών εξετάσεων ο οποίος περιλαμβάνει φυσική εξέταση, με τον ιατρό να ανιχνεύσει με το στηθοσκόπιο τυχόν αλλαγές στον καρδιακό παλμό ή οποιουδήποτε φυσιολογικού, είτε με ηλεκτροκαρδιογράφημα (ΗΚΓ), είτε με δοκιμή φόρτωσης όπως το τρέξιμο σε ειδική πλατφόρμα ώστε να αξιολογηθεί η αντοχή του καρδιακού συστήματος, είτε με μαγνητική τομογραφία (MRI).

Αντιμετώπιση [29] [27]

Η σοβαρού βαθμού ανεπάρκεια της αορτικής βαλβίδας μπορεί να οδηγήσει σε καρδιακή ανεπάρκεια επομένως πρέπει να αντιμετωπιστεί έγκαιρα. Κάποιοι τρόποι αντιμετώπισης είναι οι εξής:

- Παρακολούθηση: Σε περίπτωση που διαγνωστεί αλλά δεν παρουσιάζει σημαντικά συμπτώματα προτείνεται η τακτική παρακολούθηση.
- Φαρμακευτική θεραπεία
- Χειρουργική επέμβαση για διόρθωση ή αντικατάσταση της αορτικής βαλβίδας με τεχνητή

Όπως παρατηρήσαμε η παθοφυσιολογία της ανθρώπινης αορτής αποτελεί μεγάλο αντικείμενο μελέτης για την κατανόηση της λειτουργίας, των παθήσεων και των διαταραχών της και μπορεί σε πολλές περιπτώσεις να έχει καταστροφικές συνέπειες στην υγεία των ασθενών. Στην παρούσα διπλωματική εργασία η γνώση της παθοφυσιολογίας της αορτής είναι απαραίτητη για την κατανόηση των μηχανισμών που την διέπουν ώστε να μπορέσουμε μοντελοποιήσουμε επαρκώς την κατάσταση των ανευρυσματικών αορτών.

Κεφάλαιο 3 Μοντελοποίηση σε περιβάλλον προσομοίωσης

3.1 Εισαγωγή

Ο σχεδιασμός και η μοντελοποίηση αποτελεί κρίσιμο παράγοντα σε όλους τους τομείς της επιστήμης. Είναι αποτέλεσμα μιας σειράς ενεργειών που περιλαμβάνει την θεωρητική κατανόηση της νομοτέλειας που διέπει το αντικείμενο που μελετάται, τους περιορισμούς, την λογική σχεδίαση και τέλος την επιλογή στρατηγικής που θα προτιμηθεί για την επίτευξη των στόχων της μελέτης. Ένα λανθασμένο και μη καλά δομημένο μοντέλο μπορεί να μην είναι ρεαλιστικό και να οδηγήσει σε σφάλματα, ψευδή και επικίνδυνα συμπεράσματα και επηρεάζει αρνητικά την λήψη αποφάσεων. Επομένως η επαρκής μοντελοποίηση και ο καλός σχεδιασμός είναι τα συστατικά κάθε επιτυχημένης επιστημονικής προσπάθειας.

Το παρακάτω κεφάλαιο εστιάζει στην μοντελοποίηση της ανευρυσματικής αορτής με την βοήθεια της υπολογιστικής μηχανικής σε περιβάλλον προσομοίωσης, εξετάζει τον τρόπο με τον οποίο προχωρήσαμε στην παραμετροποίηση του προβλήματος λαμβάνοντας υπόψιν την νομοτέλεια που διέπει το αντικείμενο της μελέτης. Αναλύονται οι συννοριακές συνθήκες και θα παρουσιαστεί η μοντελοποίηση για ένα από τα τρισδιάστατα μοντέλα για την απεικόνιση του αντικείμενου της έρευνας, θα γίνει αναφορά στην μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, των στοιχείων κελύφους και των μηχανικών φορτίσεων.

3.2 Προσομοίωση

Με τον όρο προσομοίωση νοείται η αναπαράσταση μιας πραγματικής διαδικασίας ή ενός συστήματος. Η προσομοίωση αποτελεί κλάδο της υπολογιστικής μηχανικής και χρησιμοποιεί υπολογιστικά μοντέλα που αποτυπώνουν την νομοτέλεια που διέπει το αντικείμενο που μελετάται και μέσω κατάλληλης αλγοριθμικής διαδικασίας προσπαθεί να προσεγγίσει όσο το δυνατόν καλύτερα την πραγματικότητα. Έτσι, με την χρήση της, μπορούμε να μελετήσουμε, να αναλύσουμε και να προβλέψουμε την εξέλιξη και την πορεία ενός συστήματος ή ενός φαινομένου χωρίς να απαιτείται η διεξαγωγή φυσικών πειραμάτων.

Η προσομοίωση αποτελεί ένα από τα ισχυρότερα εργαλεία που έχει στην διάθεση της η επιστήμη με αμέτρητες εφαρμογές, από την αεροναυπηγική και την αυτοκινητοβιομηχανία μέχρι την ιατρική και την οικονομία. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας και την ανάπτυξη όλο και περισσότερης υπολογιστικής ισχύος μπορούμε πλέον να αναπαριστούμε πολύπλοκα μοντέλα με μεγάλη ακρίβεια και πιο ακριβή αποτελέσματα. Η δυνατότητα πλέον να δημιουργούμε εικονικά περιβάλλοντα και να προσομοιώνουμε πραγματικές διαδικασίες δίνουν την δυνατότητα στους ερευνητές και τους μηχανικούς να μπορούν να προβλέπουν αποτελέσματα, να προλαβαίνουν καταστάσεις, να δοκιμάζουν νέες ιδέες και λύσεις και να βελτιώνουν την γενική απόδοση της επιστήμης και της τεχνολογίας.

Η προσομοίωση αντιπροσωπεύει έναν κλάδο που έχει επανασχεδιάσει τον τρόπο που αντιλαμβανόμαστε και αναπτύσσουμε τον κόσμο γύρω μας. Από την εξομοίωση φυσικών φαινομένων μέχρι τη μοντελοποίηση σύνθετων συστημάτων, η προσομοίωση μας επιτρέπει την καλύτερη κατανόηση και πρόβλεψη της συμπεριφοράς τους. Παρά τις προκλήσεις που αντιμετωπίζει, όπως η ακρίβεια των

μοντέλων και το κόστος της υπολογιστικής ισχύος, η προσομοίωση παραμένει ένα ισχυρό εργαλείο για την επίλυση προβλημάτων και την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών σε πολλούς τομείς.

3.3.1 Μοντελοποίηση σε περιβάλλον προσομοίωσης

3.3.1.1 Παραμετροποίηση αορτών

3.3.1.1.1 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων FEM και στοιχείων κελύφους (Shell Elements)

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (Finite Elements-FEM) είναι μια αριθμητική μέθοδος που χρησιμοποιείται για την αριθμητική επίλυση προβλημάτων με χρήση διαφορικών εξισώσεων στην μηχανική, την φυσική, σε προβλήματα ροής στην υδραυλική, την μετάδοση θερμότητας και άλλες επιστήμες. Έχει εφαρμογές σε ένα ευρύ φάσμα της μηχανικής, όπως την τοπολογία, την βελτιστοποίηση, την ανάλυση τάσεων και παραμορφώσεων δοκών μέχρι σύνθετα μοντέλα κατασκευών όπως αυτοκίνητα, αεροπλάνα, γέφυρες και άλλες κατασκευές.

Ιστορικά ξεκίνησε την δεκαετία του 1940 και πιθανόν να είναι η εργασία του Richard Courant το 1943, ο οποίος χρησιμοποίησε παρόμοιες αρχές για την ανάλυση των εξισώσεων της μεταφοράς θερμότητας. Η ανάγκη για περαιτέρω μελέτη περίπλοκων γεωμετριών και μοντελοποίησης προβλημάτων κατέστησε την εφαρμογή της μεθόδου πολύ δημοφιλή και η πρακτική της εφαρμογή ξεκίνησε την δεκαετία του 1950 με την εμφάνιση των πρώτων ηλεκτρονικών υπολογιστών και την ανάπτυξη της υπολογιστικής μηχανικής [30].

Η υλοποίηση της μεθόδου ακολουθεί τα εξής στάδια:

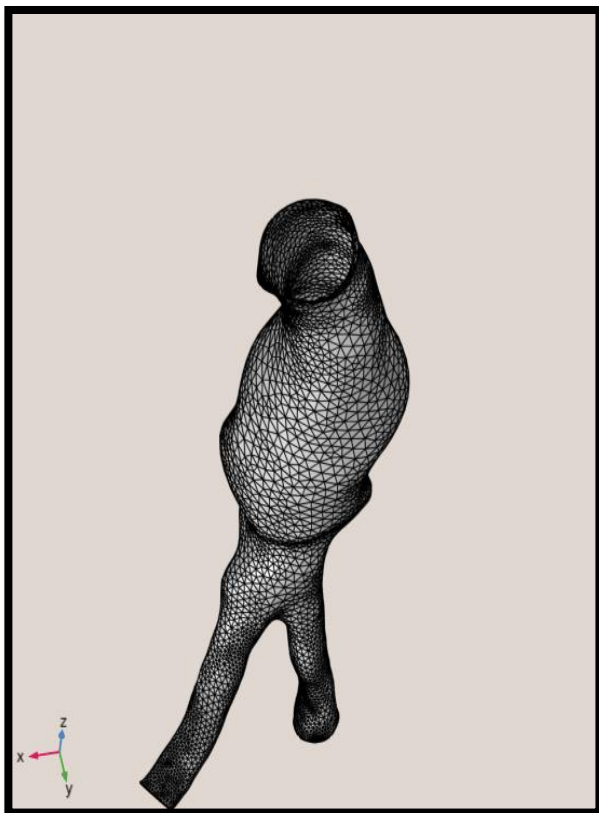
- **Εισαγωγή της γεωμετρίας του συστήματος:** Σε περιβάλλον μοντελοποίησης ορίζονται όλα τα χαρακτηριστικά της γεωμετρίας του προς μελέτη συστήματος.
- **Διακριτοποίηση (discretization):** Σε αυτό το στάδιο η γεωμετρία του συστήματος διαιρείται σε μικρότερες γεωμετρίες, τρίγωνα, τετράγωνα ή άλλα γεωμετρικά σχήματα αν είναι δισδιάστατο σύστημα ή τετράεδρα, εξαέδρα κ.ο.κ. για τρισδιάστατα γεωμετρικά συστήματα δημιουργώντας ένα πλέγμα (mesh) από στοιχεία και κόμβους [31].
- **Ορισμός συνοριακών/αρχικών συνθηκών:** καθορίζονται όλες οι συνοριακές και αρχικές συνθήκες οι οποίες επηρεάζουν την συμπεριφορά του συστήματος.
- **Καταστατικός νόμος υλικού:** για παράδειγμα γραμμικά ελαστική συμπεριφορά (νόμος Hooke).
- **Διαμόρφωση των εξισώσεων ισορροπίας/διαφορικών εξισώσεων:** Στο στάδιο αυτό, συμπεριλαμβάνονται βασικές αρχές, όπως εξισώσεις ισορροπίας κ.λπ. και στη συνέχεια περιγράφεται το σύστημα με χρήση διαφορικών εξισώσεων με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορεί να επιλυθεί αριθμητικά.
- **Επίλυση των διαφορικών εξισώσεων:** Στη συνέχεια επιλύονται οι εξισώσεις χρησιμοποιώντας κατάλληλη αλγοριθμική διαδικασία.
- **Αποτελέσματα:** Τέλος, αξιολογούνται τα αποτελέσματα με βάση τις αρχικές συνθήκες και τους στόχους της μελέτης [30].

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (Finite Elements-FEM) οδηγεί σε διαφορετικά μοντέλα ανάλογα με τον τύπο ανάλυσης, όπως στατικές μηχανικές αναλύσεις που αφορούν μελέτες υπό σταθερές

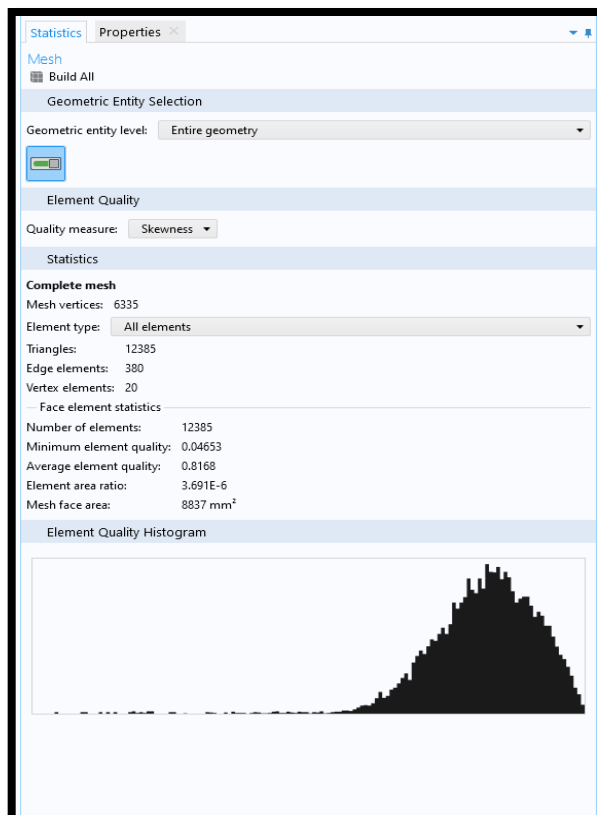
συνθήκες (φορτία, παραμορφώσεις). Επίσης, δυναμικές μηχανικές αναλύσεις όπου χρησιμοποιούνται για μελέτες δυναμικής συμπεριφοράς δομών ή υλικών με δυναμικά φορτία. Επιπροσθέτως, αναλύσεις ρευστοδυναμικής (CFD – Computational Fluid Dynamics) που χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση και ανάλυση της ροής και άλλων φαινομένων σε ρευστά μέσα, όπως αέρας ή νερό, υπό διάφορες συνθήκες και φορτία. Είναι δυνατή επίσης η μελέτη συνδυασμένων πεδίων (θερμοελαστικότητα, αλληλεπίδραση ρευστού-στερεού κ.α.).

Αναφορικά με την μηχανική απόκριση λεπτών κατασκευών σε μηχανική διέγερση, όπως τα τοιχώματα της αορτής, τα στοιχεία κελύφους (Shell Elements) είναι δομικά γεωμετρικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται συνήθως για την μοντελοποίηση λεπτών γεωμετρικών συστημάτων σε περιβάλλον προσομοίωσης με χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων (FEM). Η εφαρμογή των στοιχείων αυτών μας επιτρέπει να μελετήσουμε γεωμετρικά μοντέλα πολύ λεπτών επιφανειών (συγκριτικά με τις υπόλοιπες διαστάσεις τους) με μεγαλύτερη ακρίβεια.

Στην περίπτωση μας, στα μοντέλα που μελετήθηκαν, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων με στοιχεία κελύφους καθώς η γεωμετρία των ανευρυσματικών αορτών αποτελείται από πολύ λεπτή επιφάνεια. Παρακάτω, για την οπτικοποίηση της διαδικασίας της εισαγωγής των γεωμετριών των ανευρυσματικών αορτών, απεικονίζεται η εφαρμογή κατάλληλου πλέγματος (Εικόνα 3.1 α)) σε μία από τις αορτές που μελετήθηκαν για την εφαρμογή της μεθόδου με 12385 τετράεδρα στοιχεία (Εικόνα 3.2 β))



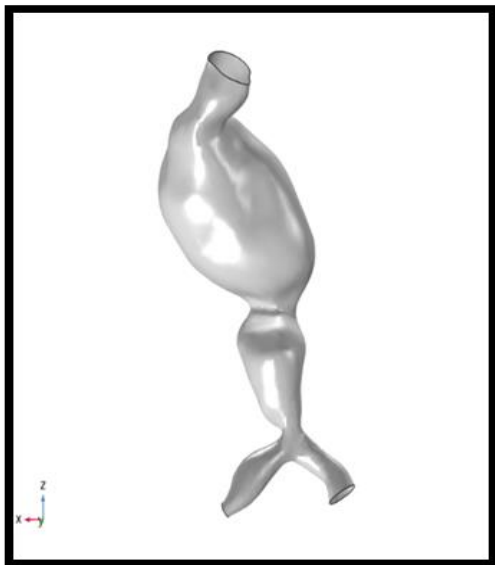
Εικόνα 3.1 α) Εφαρμογή πλέγματος στο κέλυφος της γεωμετρίας της αορτής



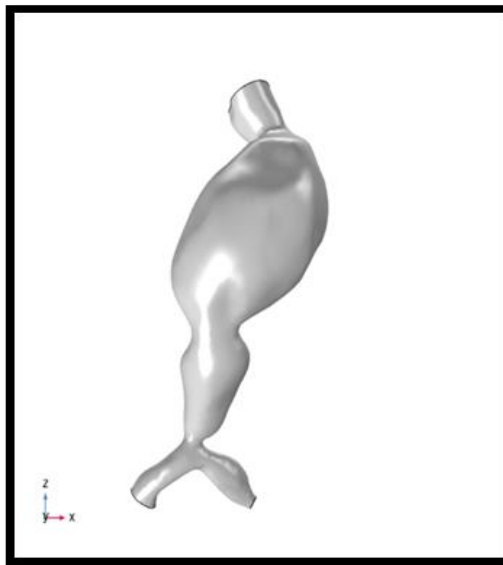
Εικόνα 3.2 β) Στατιστικά στοιχεία πλέγματος από το πρόγραμμα προσομοίωσης

3.3.1.1.2 Τρισδιάστατα μοντέλα

Τα τρισδιάστατα μοντέλα συλλέχθηκαν μετά από κλινικές εξετάσεις μαγνητικής τομογραφίας (MRI) ασθενών διαγνωσμένων με ανεύρυσμα κοιλιακής αορτής. Με την βοήθεια προγραμμάτων σχεδίασης σε H/Y (CAD) μετατράπηκαν σε αρχεία κατάλληλα για την εισαγωγή τους σε περιβάλλον προσομοίωσης. Στις εικόνες 3.1 a) και 3.2 b) παρατηρούμε την ασυνέχεια που υπάρχει στην διατομή του κελύφους λίγο μετά τα άκρα για ένα από τα μοντέλα της ανευρυσματικής αορτής. Εκτός από αυτό, παρατηρείται επίσης η ακανόνιστη αύξηση της διατομής, διογκώνεται το κέλυφος και σχηματίζεται το ανεύρυσμα στο αιμοφόρο αγγείο.



Εικόνα 3.2 **a)** εμπρόσθια όψη της γεωμετρίας ανευρυσματικής κοιλιακής αορτής σε περιβάλλον προσομοίωσης



Εικόνα 3.2 **b)** πίσω όψη της γεωμετρίας ανευρυσματικής κοιλιακής αορτής σε περιβάλλον προσομοίωσης

3.3.2 Υλικά

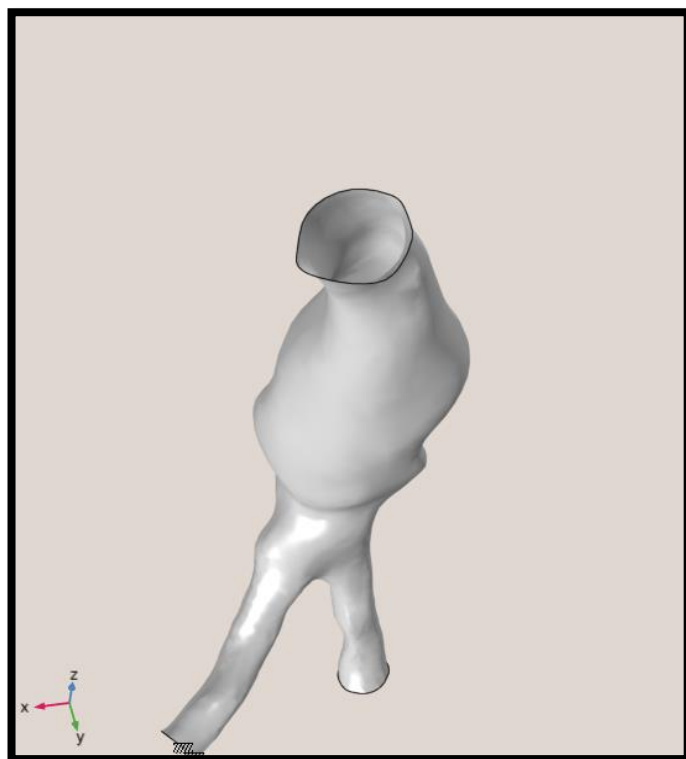
Τα τοιχώματα της ανθρώπινη αορτής δομούνται από ένα πολυσύνθετο και πολύπλοκο ιστό με πολλές ιδιότητες ο οποίος αποτελείται από κυτταρικά και μη-κυτταρικά συστατικά, όπως:[5]

- **νερό(~50%)**
- **ελαστίνη:** η οποία επιτρέπει την αποθήκευση ενέργειας πίεσης επιτρέποντας της να έχει ελαστικότητα και να επανέρχεται στην αρχική της κατάσταση μετά από επέκταση
- **κολλαγόνο:** το οποίο παρέχει αντοχή και δομική υποστήριξη
- **συνδετικό ιστό:** παρέχει δομική σταθερότητα
- **λείες μυϊκές ίνες:** οι οποίες προκαλούν αγγειοσυστολή και αγγειοδιαστολή

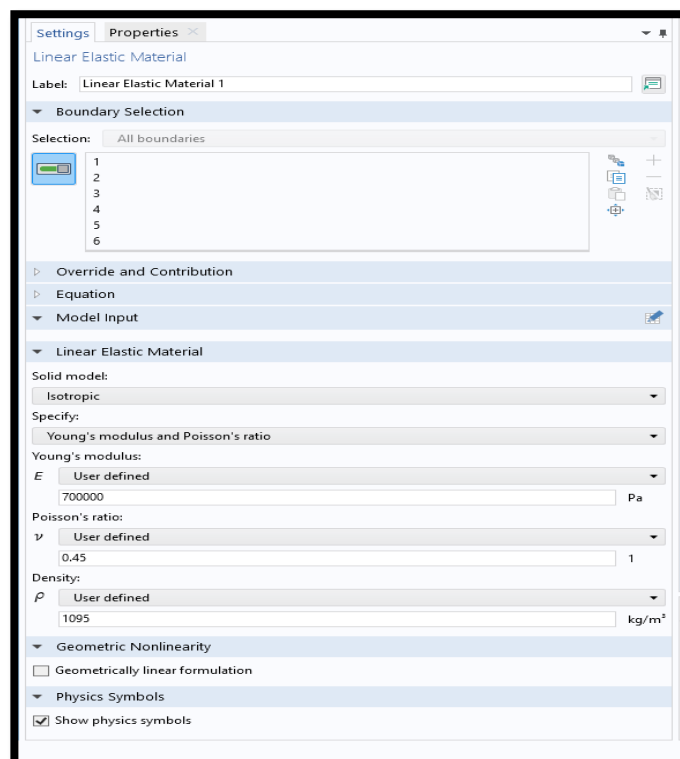
Επομένως η μοντελοποίηση αυτού του υλικού είναι μια αρκετά πολυσύνθετη διαδικασία. Στην περίπτωση μας όμως μπορούμε να υποστηρίξουμε σύμφωνα με την βιβλιογραφία την υπόθεση ότι στα δεδομένα που συγκεντρώθηκαν στην έρευνα μετά από τις κλινικές εξετάσεις των ασθενών μπορεί να μοντελοποιηθεί ως ένα ισотροπικό ελαστικό υλικό με καλή ακρίβεια, τουλάχιστον για τις πρώτες διερευνήσεις.

Επιλέξαμε επομένως τις παραμέτρους (Πυκνότητα, μέτρο Ελαστικότητας και poisson ratio) που εξυπηρετούν καλύτερα την συγκεκριμένη μελέτη για την ελαστική συμπεριφορά του υλικού, οι οποίες παρουσιάζονται παρακάτω:

Στις εικόνες 3.2 a) και 3.2 b) απεικονίζονται η γεωμετρία της ανευρυσματικής αορτής για ένα από τα μοντέλα καθώς και η εισαγωγή των παραμέτρων στο πρόγραμμα προσομοίωσης αντίστοιχα:



Εικόνα 3.2 a) 3D Γεωμετρία Αορτής



3.2 b) Εισαγωγή παραμέτρων γραμμικά ελαστικού ισοτροπικού υλικού στο πρόγραμμα προσομοίωσης

Στον παρακάτω πίνακα 3.1 δίνονται οι τιμές που εισήχθησαν για την περιγραφή του ισοτροπικού ελαστικού υλικού:

Πίνακας 3.1

Ιδιότητες	Μεταβλητές	Τιμές	Μονάδες
Πυκνότητα/Density	D	1095	Kg/m^3
Μέτρο ελαστικότητας/ Young's modulus	E	$7 * 10^5$	Pa
Poisson ratio	nu	0.45	1

3.3.3 Συνοριακές συνθήκες και φορτία

Οι συνοριακές συνθήκες που λήφθηκαν υπόψιν είναι οι στηρίξεις πάκτωσης στις ακραίες διατομές και η συστολική αρτηριακή πίεση ομοιόμορφα κατανεμημένη κάθετα στην επιφάνεια του τοιχώματος και στο εσωτερικό του. Οι στηρίξεις πάκτωσης εφαρμόστηκαν στα άνω και κάτω άκρα της τρισδιάστατης γεωμετρίας, καθώς είναι απαραίτητες για την επίλυση της στατική γραμμικής ανάλυσης.

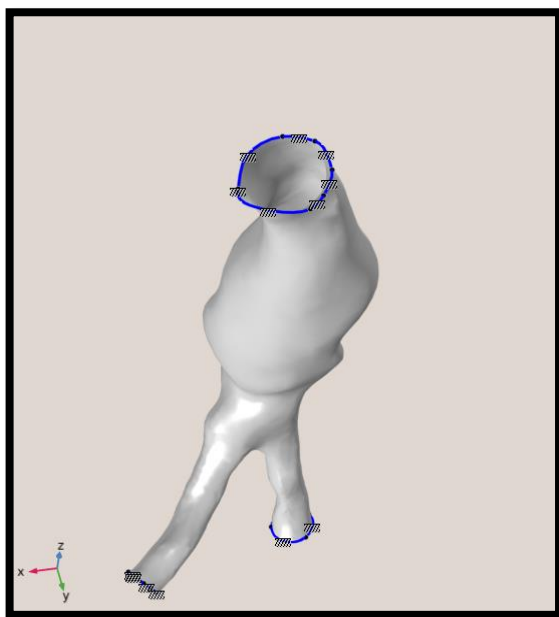
Μαθηματική διατύπωση αρτηριακής πίεσης

Η συστολική πίεση είναι η πίεση που ασκεί το αίμα στα αιμοφόρα αγγεία καθώς φεύγει από την καρδιά. Οι μονάδες μέτρησης που χρησιμοποιούνται στην περίπτωση είναι τα χιλιοστά της στήλης υδραργύρου (mmHg). Εμείς χρησιμοποιήσαμε για το περιβάλλον προσομοίωσης μια μέση τιμή της συστολικής πίεσης των ασθενών με ανεύρυσμα αορτής. Η μέση τιμή της αρτηριακής πίεσης δίνεται από τον τύπο

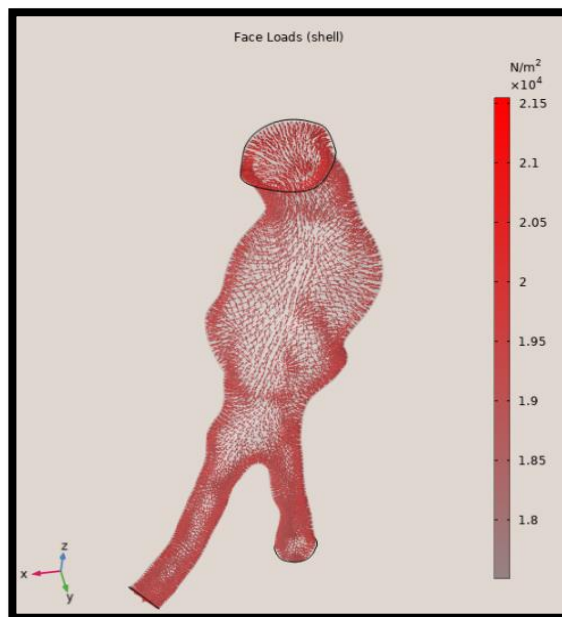
$$MAP = \frac{((DAP \times 2) + SAP)}{3}$$

- MAP: Μέση αρτηριακή πίεση
- DAP: Διαστολική αρτηριακή πίεση
- SAP: Συστολική αρτηριακή πίεση

Η μέση συστολική πίεση που εφαρμόστηκε είναι $SAP=20\text{kPa}=150\text{mmHg}$ αφού τα ανευρύσματα που μελετάμε αφορούν άντρες ηλικιωμένους ασθενείς. Στην Εικόνα 3.3 a) απεικονίζονται τα σημεία πάκτωσης με την μπλε γραμμή και στην Εικόνα 3.3 b) τα διανύσματα εφαρμογής πίεσης P στο εσωτερικό του κελύφους ενός από τα μοντέλα ανευρυσματικής αορτής



Εικόνα 3.3 a) Απεικόνιση Εφαρμογή πάκτωσης (μπλε γραμμή) στο κέλυφος

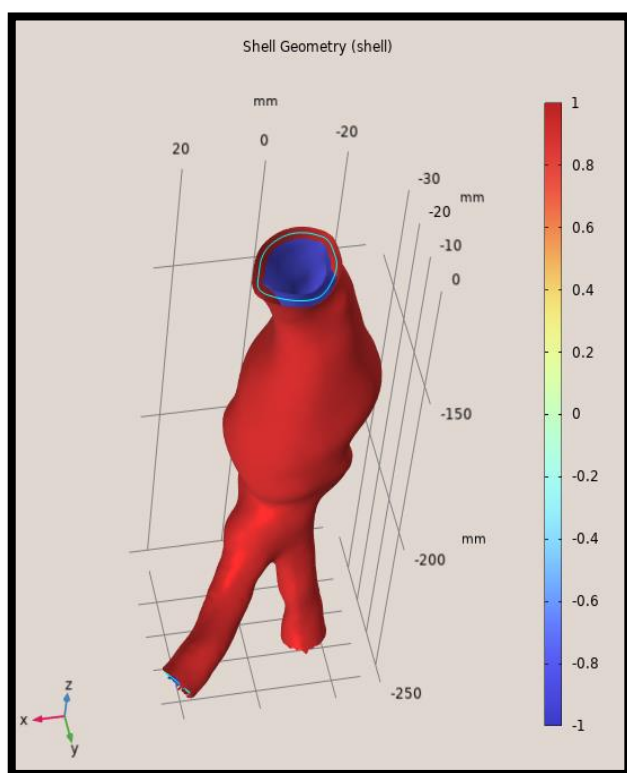


Εικόνα 3.3 b) Απεικόνιση διανυσμάτων πίεσης P στο εσωτερικό του κελύφους

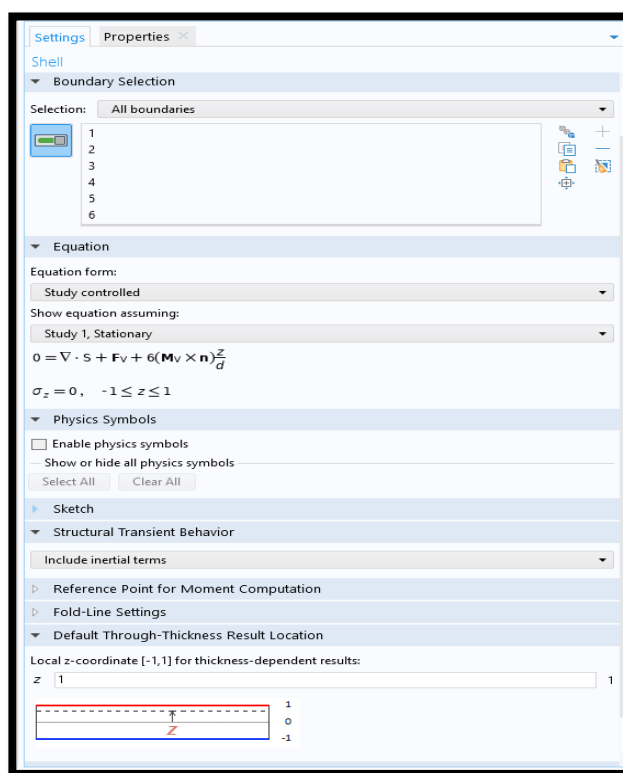
3.3.3.1 Γεωμετρία κελύφους και οριακές συνθήκες

Σε αυτό το βήμα ορίστηκαν οι γεωμετρίες των κελυφών, τα πάχη και οι βαθμοί ελευθερίας του. Παρακάτω παρουσιάζονται οι παράμετροι του προγράμματος στην στατική γραμμική ανάλυση του κελύφους ενός από τα μοντέλα ανευρυσματικής κοιλιακής αορτής καθώς, το πάχος και οι βαθμοί ελευθερίας του:

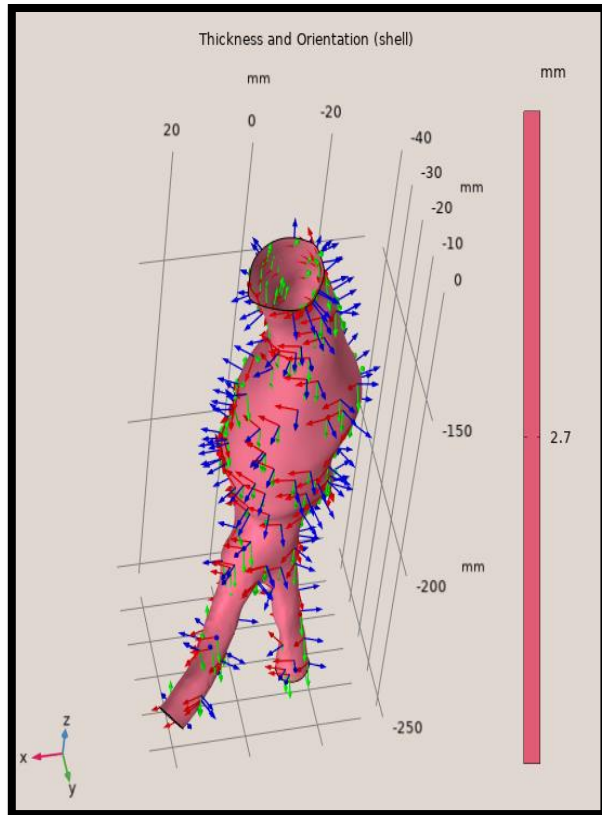
Στην εικόνα 3.4 a) απεικονίζεται η γεωμετρία του κελύφους και στην εικόνα 3.4 c) το πάχος της επιφάνειας του κελύφους με το ροζ χρώμα. Στην εικόνα 3.4 b) ορίζονται τα στοιχεία κελύφους στο πρόγραμμα προσομοίωσης και στην εικόνα 3.4 d) ορίζονται το πάχος της επιφάνειας του κελύφους ($d=2.7\text{mm}$) και η πίεση ($P=20\text{kPa}$). Τα στοιχεία του κελύφους είναι ελεύθερα στον χώρο, επομένως έχουν έξι βαθμούς ελευθερίας, τρεις μεταφορικούς βαθμούς ελευθερίας (έναν για κάθε άξονα x,y,z) και τρεις περιστροφικούς βαθμούς ελευθερίας (ένα για κάθε άξονα x,y,z).



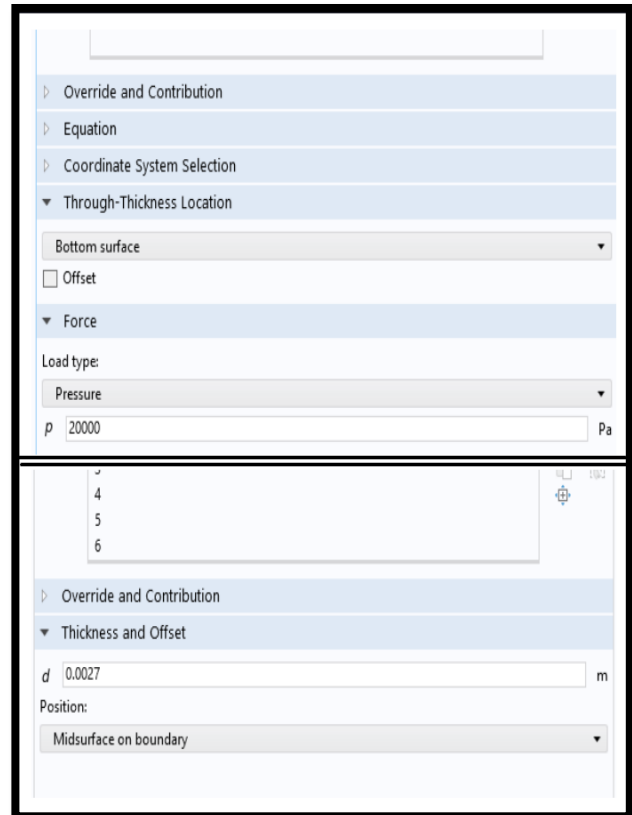
Εικόνα 3.4 a) Γεωμετρία κελύφους



Εικόνα 3.4 b) Ορισμός shell στο πρόγραμμα προσομοίωσης



Εικόνα 3.4 c) Πάχος και βαθμοί ελευθερίας επιφάνειας κελύφους



3.4 d) Ορισμός πάχους κελύφους $d=2.7\text{mm}$ και εφαρμογής πίεσης $P=20\text{kPa}$

Μετά την εισαγωγή των 3D γεωμετριών στο περιβάλλον προσομοίωσης, προχωρήσαμε στην εφαρμογή πλέγματος διακριτοποίησης, των φορτίων πίεσης στο εσωτερικό της αορτής, ορίσαμε τις παραμέτρους για ελαστικά ιστροπικό υλικό, ορίσαμε τις πακτώσεις στα άκρα του και τους βαθμούς ελευθερίας, ορίσαμε ότι πρόκειται για στοιχεία κελύφους σε στατική γραμμική ανάλυση και εκτελέσαμε το πρόγραμμα για την μελέτη της στατικής γραμμικής ανάλυσης στα στοιχεία του κελύφους

Η ίδια προγραμματιστική διαδικασία προσομοίωσης επαναλήφθηκε και για τα 14 τρισδιάστατα μοντέλα ανευρυσματικών αορών σε στατική γραμμική ανάλυση και τα αποτελέσματα τους παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο.

Κεφάλαιο 4 Αποτελέσματα

4.1 Αποτελέσματα ανάλυσης

4.1.1 Στατική γραμμική ανάλυση

Στην παρούσα μελέτη θεωρήθηκε ότι το σύστημα της ανευρυσματικής αορτής παρουσιάζει γραμμική συμπεριφορά, δηλαδή οι τάσεις και οι παραμορφώσεις μεταβάλλονται γραμμικά από τις φορτίσεις που δέχονται το εσωτερικό των τοιχωμάτων της αορτής λόγω της αρτηριακής πίεσης. Η γραμμική αυτή συμπεριφορά της αορτής μελετάται στατικά, δηλαδή οι φορτίσεις δεν μεταβάλλονται με τον χρόνο και είναι ανεξάρτητες.

4.1.1.1 Στατική Γραμμική ανάλυση μοντέλων ανευρυσματικών αορών

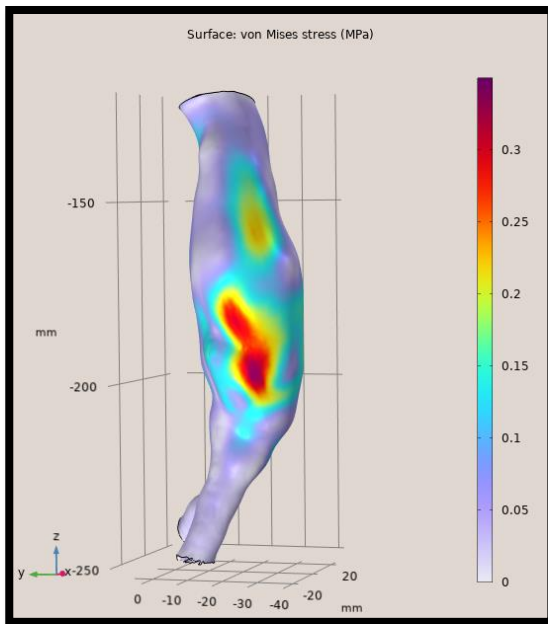
Τα μοντέλα είχαν στηρίξεις πάκτωσης στα άνω και κάτω άκρα και εφαρμόστηκε πίεση $P = 2 \times 10^5$ Pa, που αντιστοιχεί σε μέση συστολική αρτηριακή πίεση SAP=150mmHg, στο εσωτερικό του κελύφους χρησιμοποιώντας τις εξής παραμέτρους:

Ιδιότητες	Μεταβλητές	Τιμές	Μονάδες
Density	D	1095	Kg/m ³
Young's modulus	E	$7 * 10^5$	Pa
Poisson ratio	nu	0.45	1
Pressure	P	20000	Pa

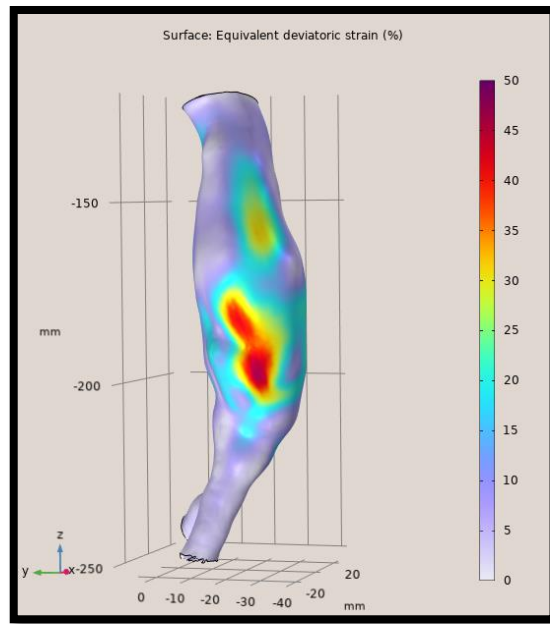
4.1.1.2 Προσομοίωση μοντέλων

Σε κάθε προσομοίωση η οπτικοποίηση της συμπεριφοράς του μοντέλου αποτελεί τον σημαντικότερο παράγοντα για την κατανόηση της συμπεριφοράς του αντικειμένου που μελετάται και για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Σε αυτήν την ενότητα επομένως θα απεικονιστούν τα αποτελέσματα από την προσομοίωση που διεξήχθη σε όλα τα μοντέλα που κατασκευάστηκαν ώστε να κατανοηθεί η συμπεριφορά τους, δεδομένης της παραμετροποίησης που ορίστηκε. Παρακάτω παρουσιάζονται τα μοντέλα με τις τάσεις von Mises (VM), την αποκλίνουσα παραμόρφωση (EDS) και την μέγιστη μετατόπιση (DM).

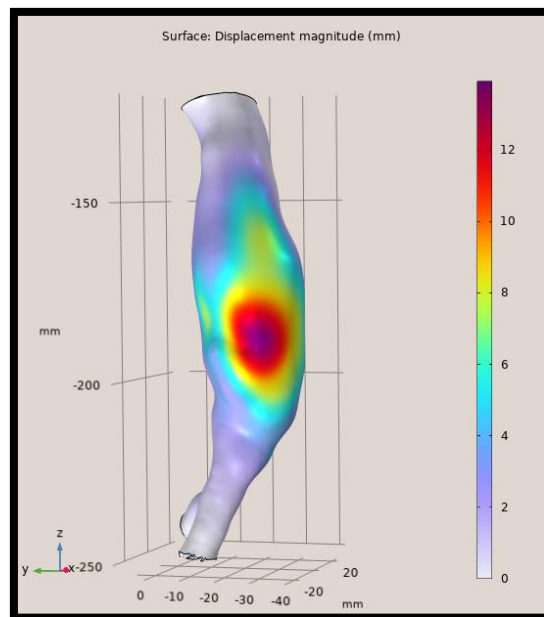
Μοντέλο T1-P2



Εικόνα 4.1 α) Διάγραμμα τάσεων Von Mises

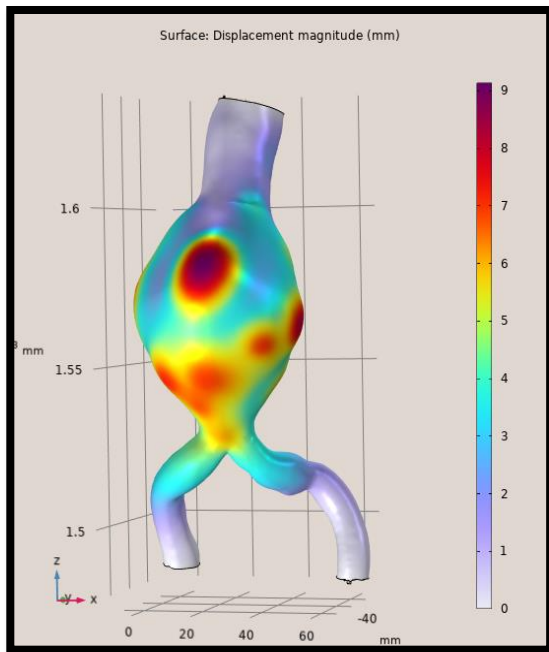


Εικόνα 4.1 β) Διάγραμμα αποκλίνουσας παραμόρφωσης

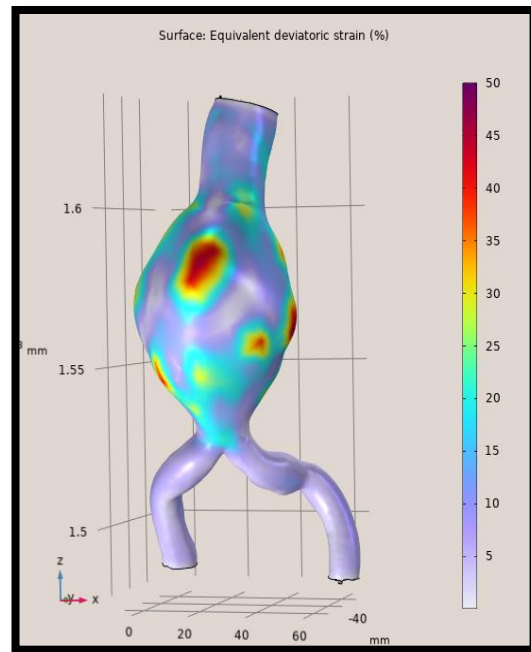


Εικόνα 4.1 γ) Διάγραμμα μετατόπισεων

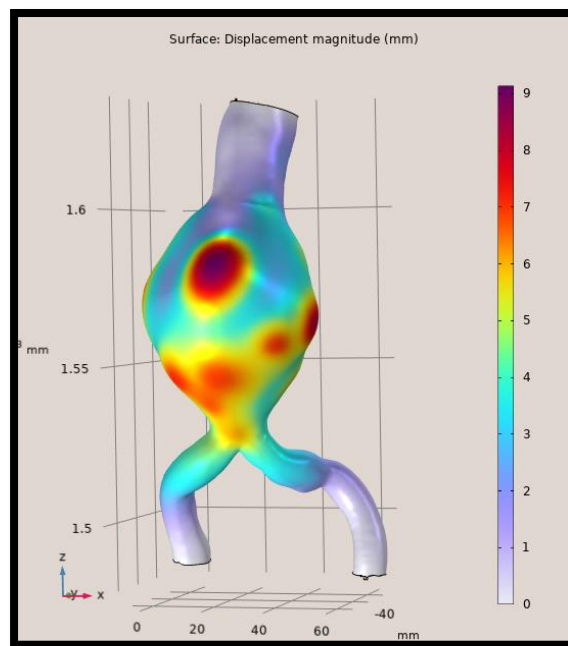
Μοντελο T1-P5



Εικόνα 4.2 α) Διάγραμμα τάσεων Von Mises

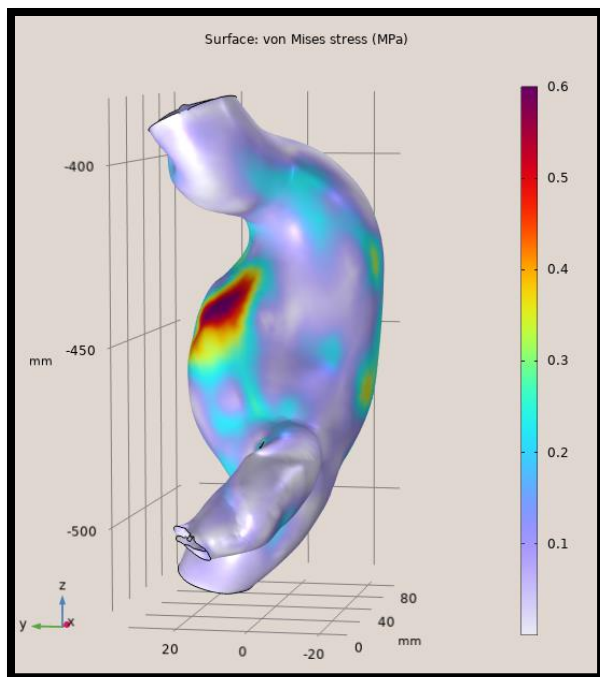


Εικόνα 4.2 β) Διάγραμμα αποκλίνουσας παραμόρφωσης

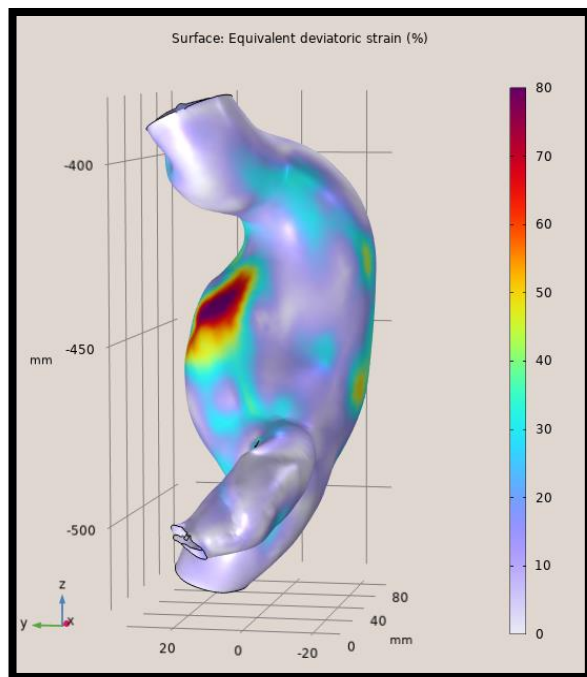


Εικόνα 4.2 β) Διάγραμμα μετατόπισεων

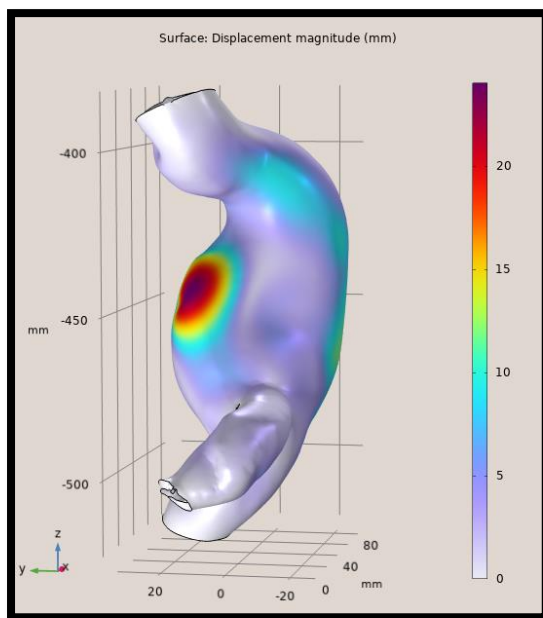
Μοντέλο T1-P6



Εικόνα 4.3 α) Διάγραμμα τάσεων Von Mises

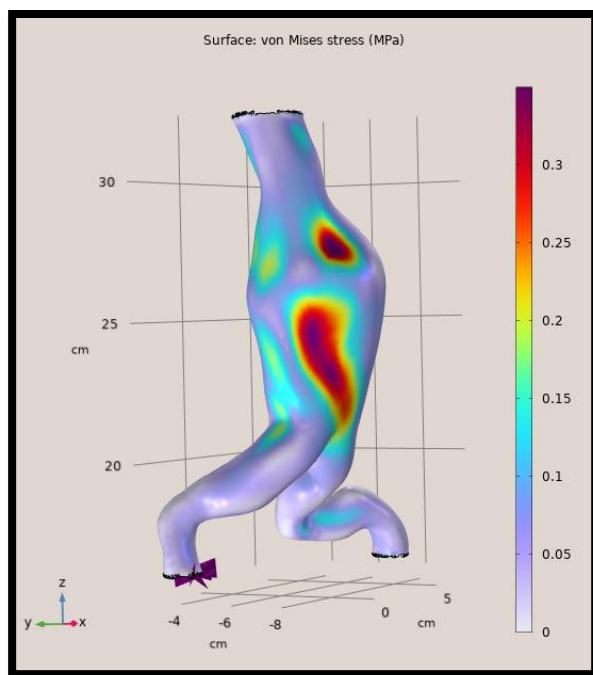


Εικόνα 4.3 β) Διάγραμμα αποκλίνουσας παραμόρφωσης

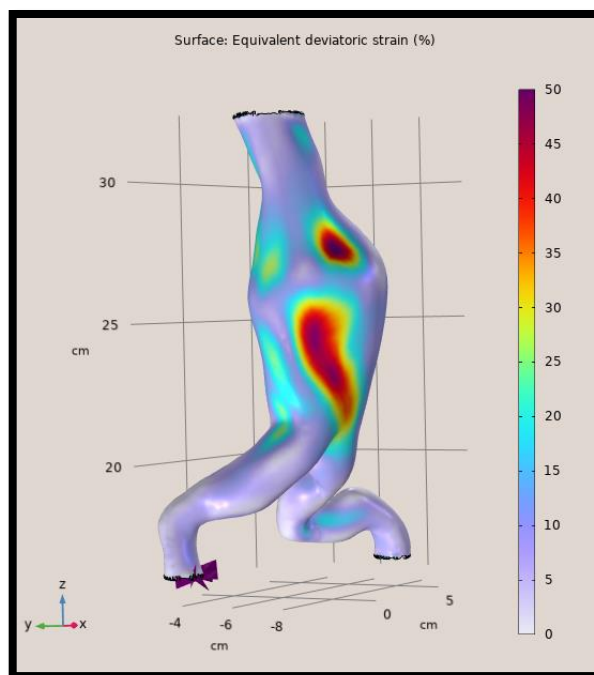


Εικόνα 4.3 γ) Διάγραμμα μετατόπισεων

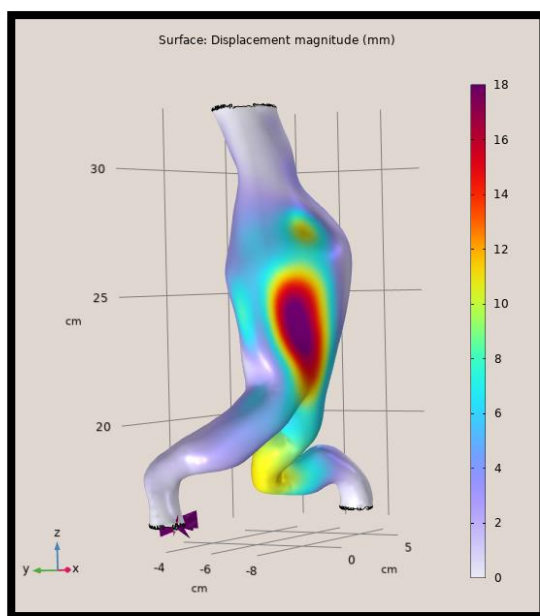
Μοντέλο T1-P9



Εικόνα 4.4 α) Διάγραμμα τάσεων Von Mises

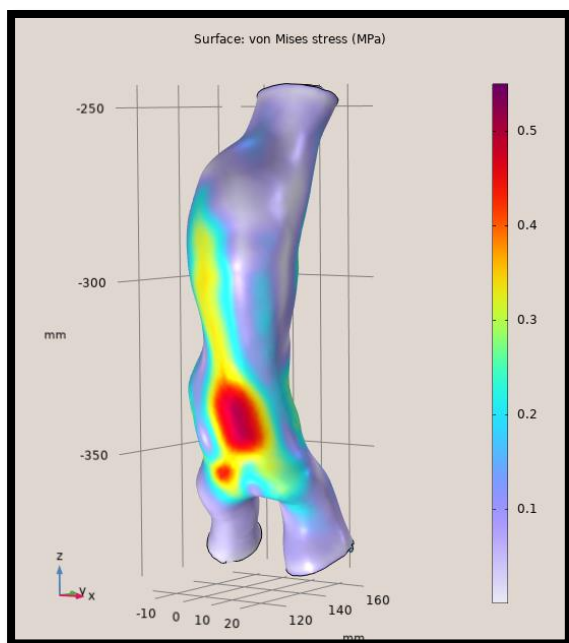


Εικόνα 4.4 β) Διάγραμμα αποκλίνουσας παραμόρφωσης

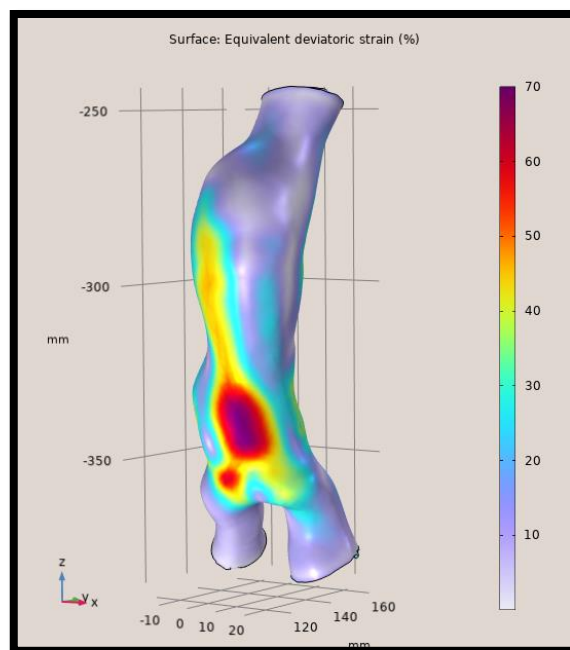


Εικόνα 4.4 γ) Διάγραμμα μετατοπίσεων

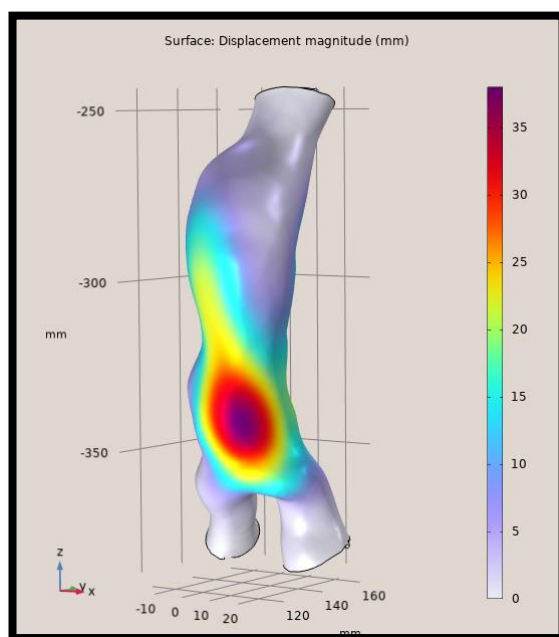
Μοντέλο T1-P10



Εικόνα 4.5 α) Διάγραμμα τάσεων Von Mises

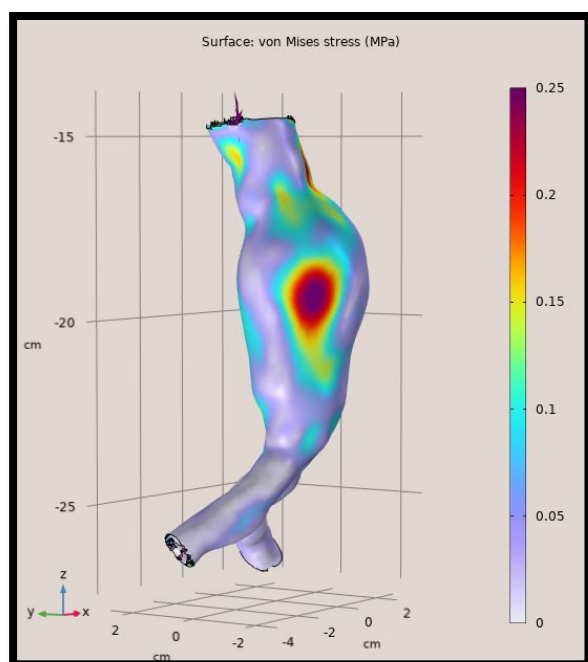


Εικόνα 4.5 β) Διάγραμμα αποκλίνουσας παραμόρφωσης

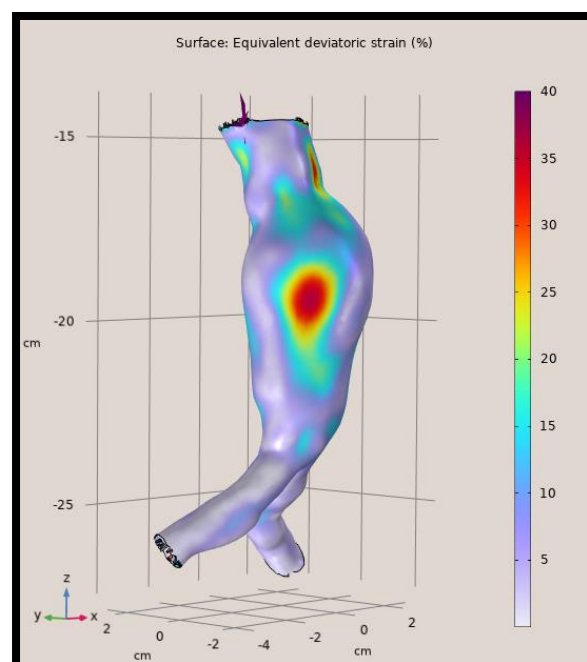


Εικόνα 4.5 γ) Διάγραμμα μετατοπίσεων

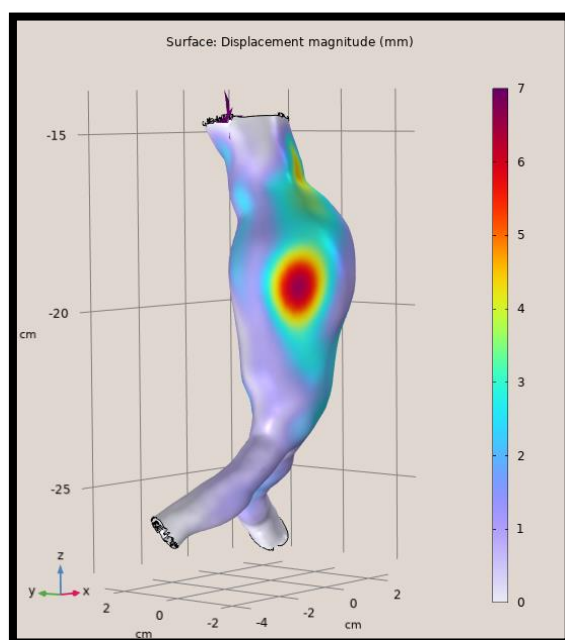
Μοντέλο T1-P11



Εικόνα 4.6 α) Διάγραμμα τάσεων Von Mises

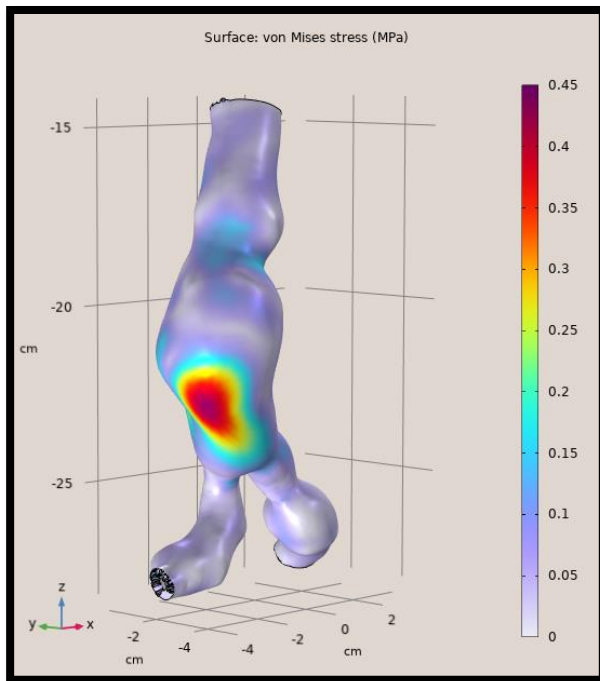


Εικόνα 4.6 β) Διάγραμμα αποκλίνουσας παραμόρφωσης

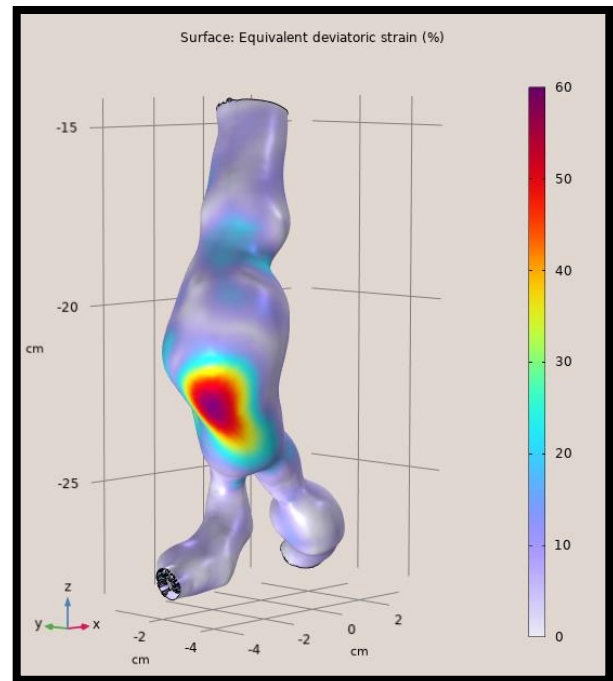


Εικόνα 4.6 γ) Διάγραμμα μετατόπισεων

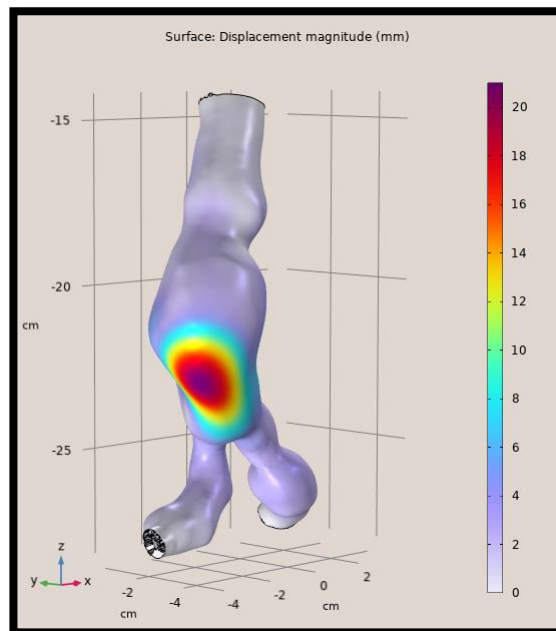
Μοντέλο T1-P14



Εικόνα 4.7 α) Διάγραμμα τάσεων Von Mises

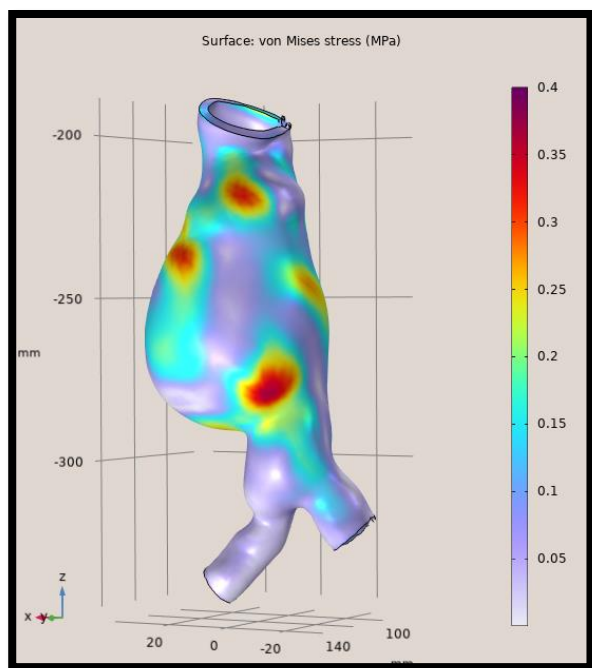


Εικόνα 4.7 β) Διάγραμμα αποκλίνουσας παραμόρφωσης

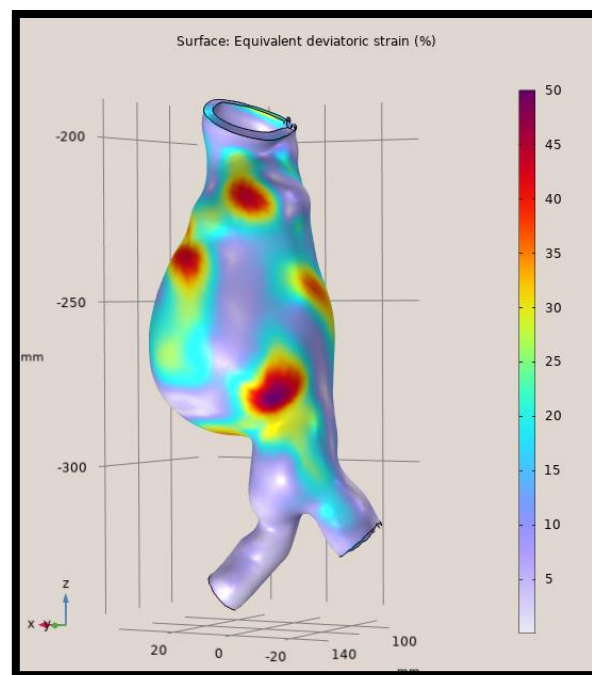


Εικόνα 4.7 γ) Διάγραμμα μετατοπίσεων

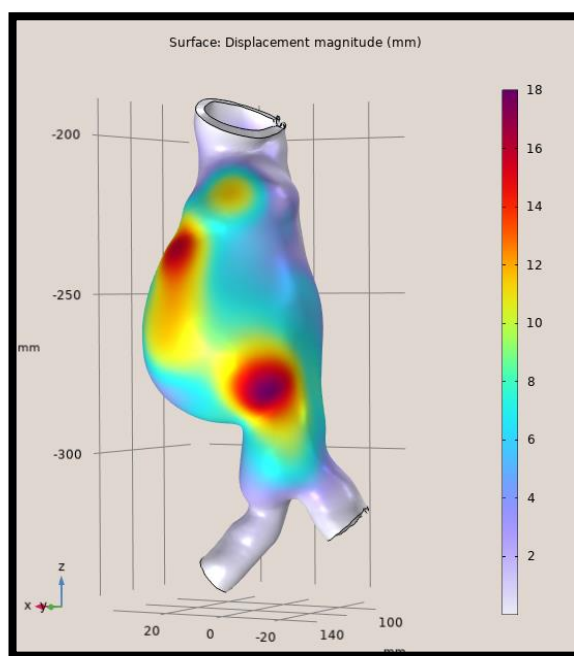
Μοντέλο T1-P16



Εικόνα 4.8 α) Διάγραμμα τάσεων Von Mises

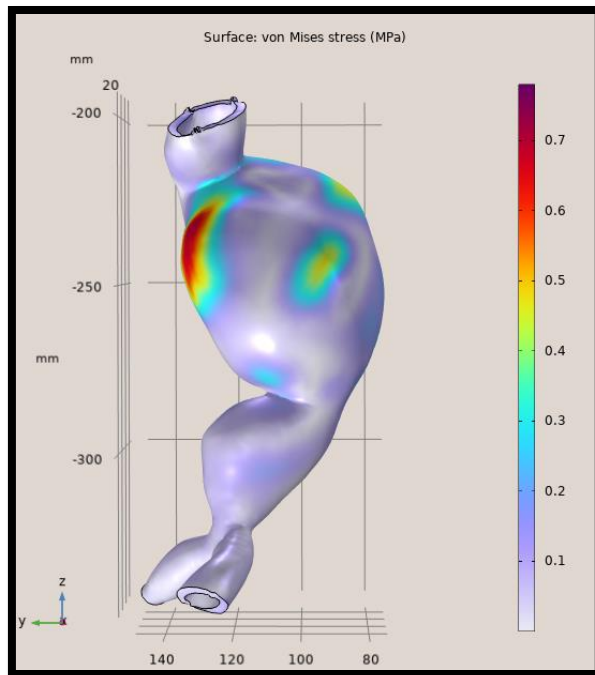


Εικόνα 4.8 β) Διάγραμμα αποκλίνουσας παραμόρφωσης

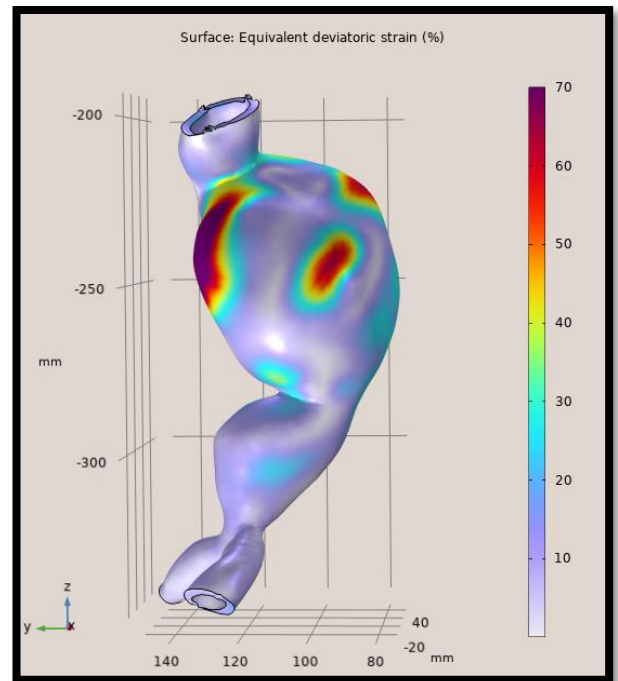


Εικόνα 4.8 γ) Διάγραμμα μετατοπίσεων

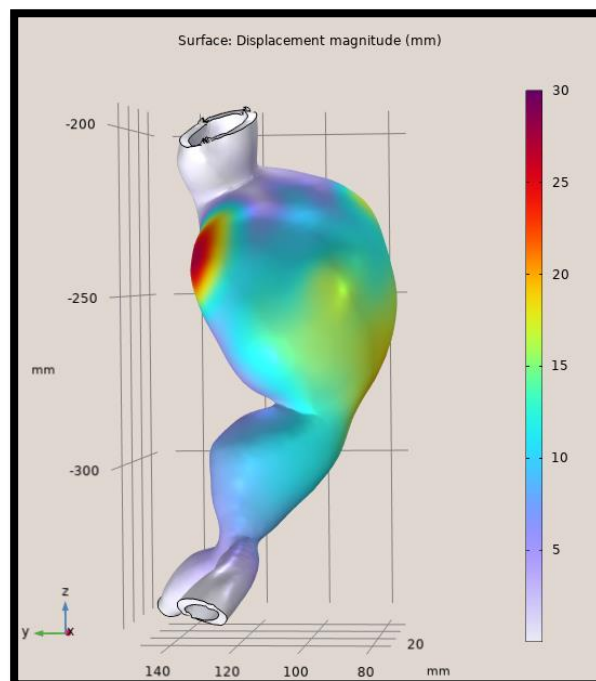
Μοντέλο T2-P2



Εικόνα 4.9 α) Διάγραμμα τάσεων Von Mises

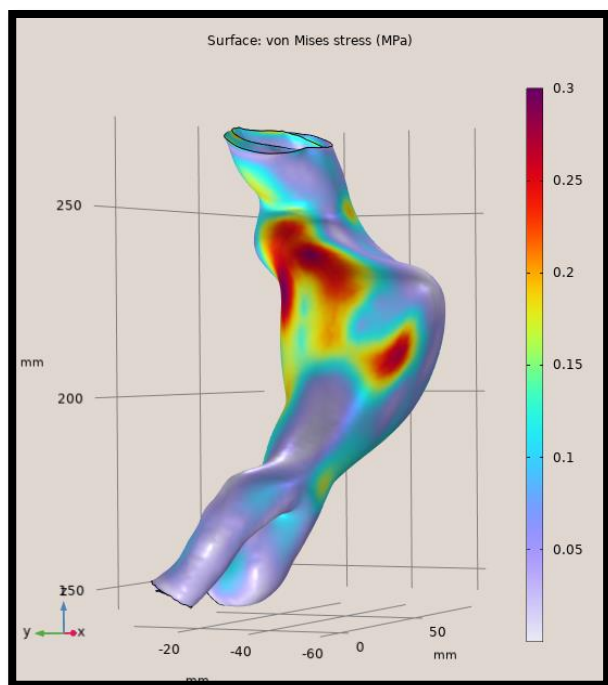


Εικόνα 4.9 β) Διάγραμμα αποκλίνουσας παραμόρφωσης

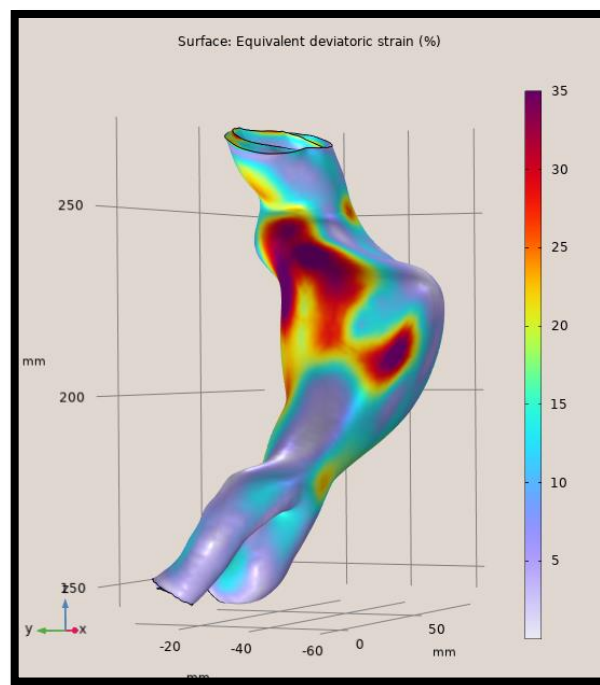


Εικόνα 4.9 γ) Διάγραμμα μετατοπίσεων

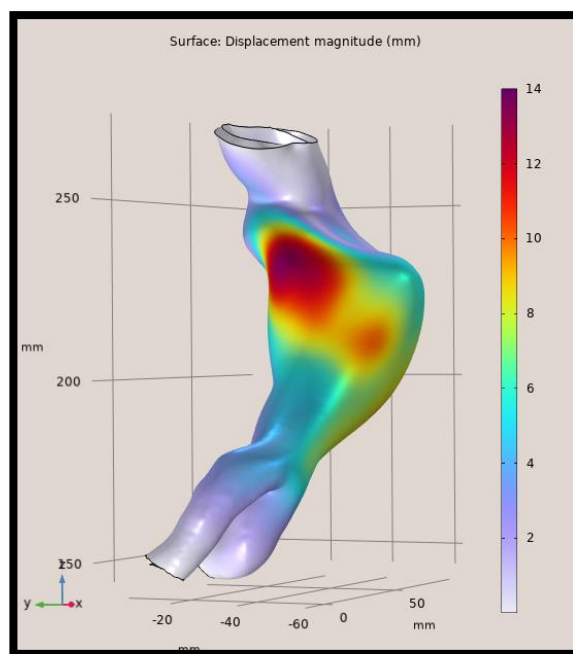
Μοντέλο T2-P3



Εικόνα 4.10 α) Διάγραμμα τάσεων Von Mises

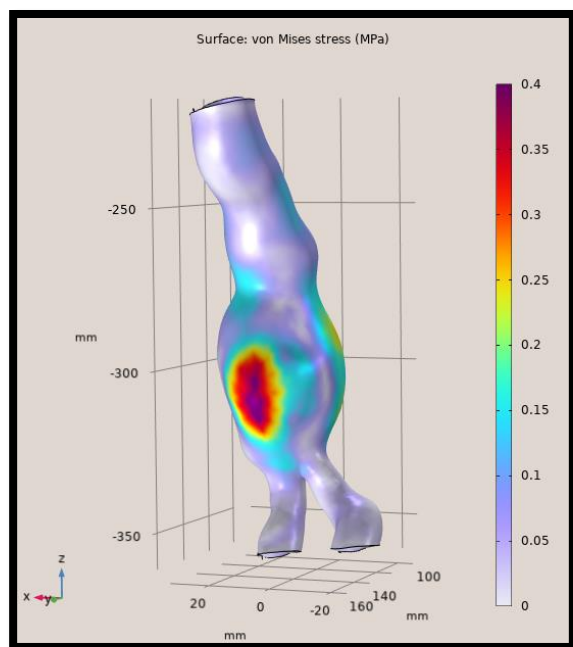


Εικόνα 4.10 β) Διάγραμμα αποκλίνουσας παραμόρφωσης

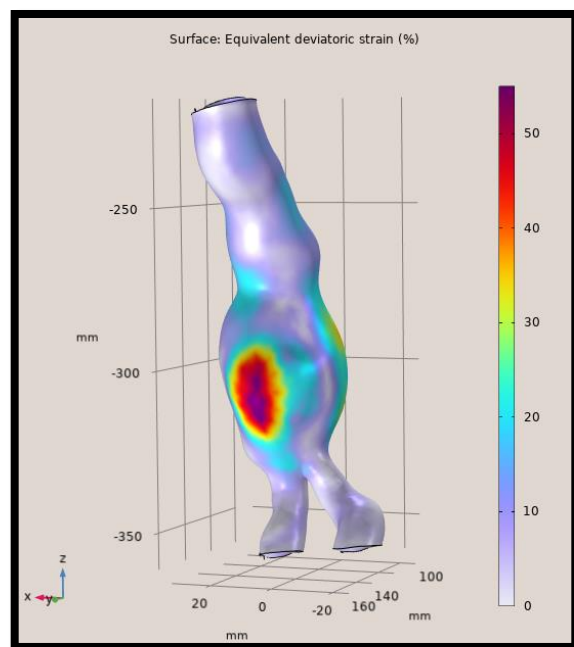


Εικόνα 4.10 γ) Διάγραμμα μετατοπίσεων

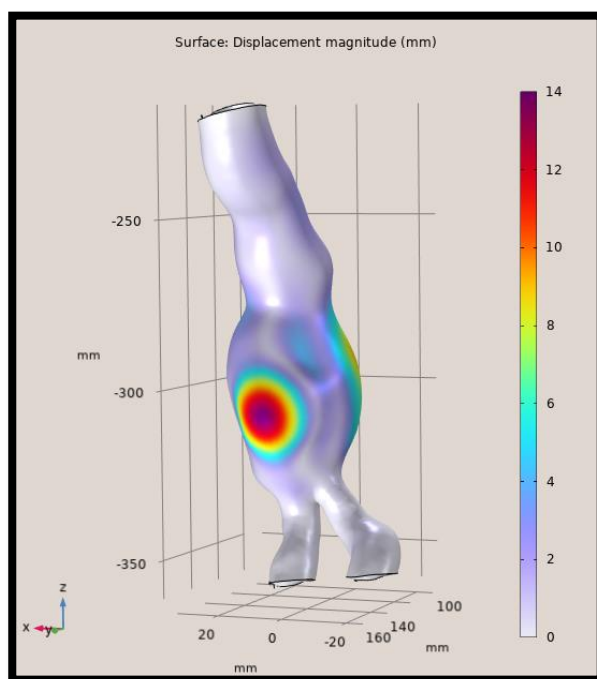
Μοντέλο T2-P13



Εικόνα 4.11 α) Διάγραμμα τάσεων Von Mises

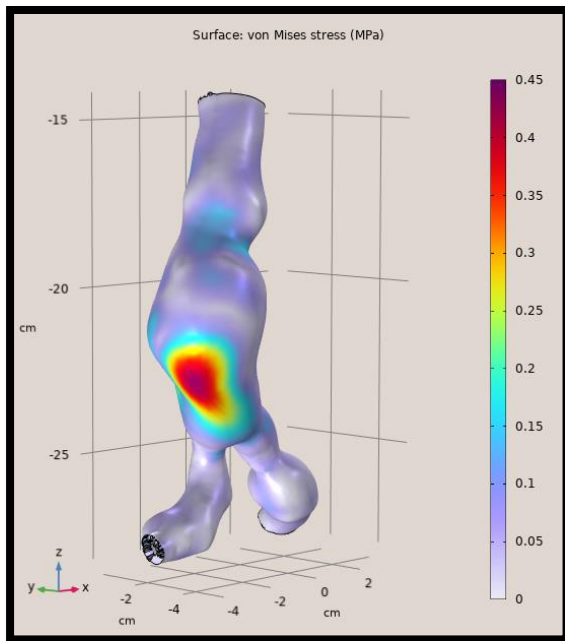


Εικόνα 4.11 β) Διάγραμμα αποκλίνουσας παραμόρφωσης

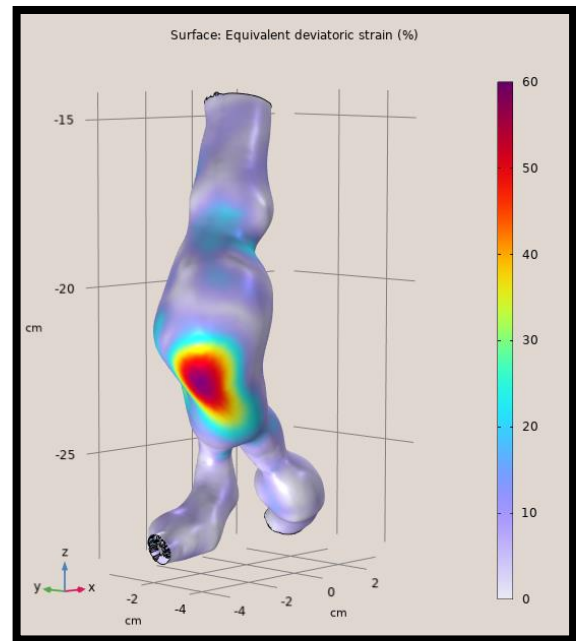


Εικόνα 4.11 γ) Διάγραμμα μετατοπίσεων

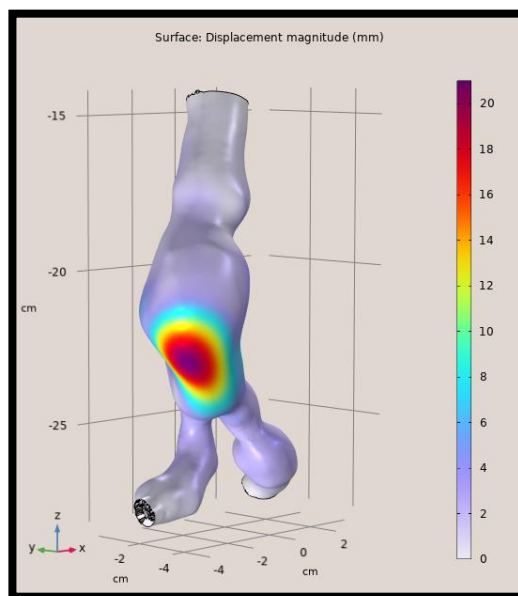
Μοντέλο T2-P14



Εικόνα 4.12 a) Διάγραμμα τάσεων Von Mises

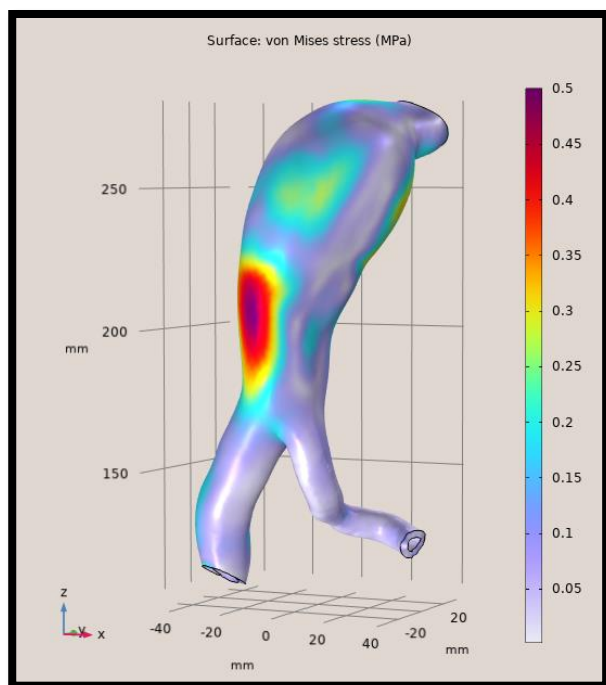


Εικόνα 4.12 b) Διάγραμμα αποκλίνουσας παραμόρφωσης

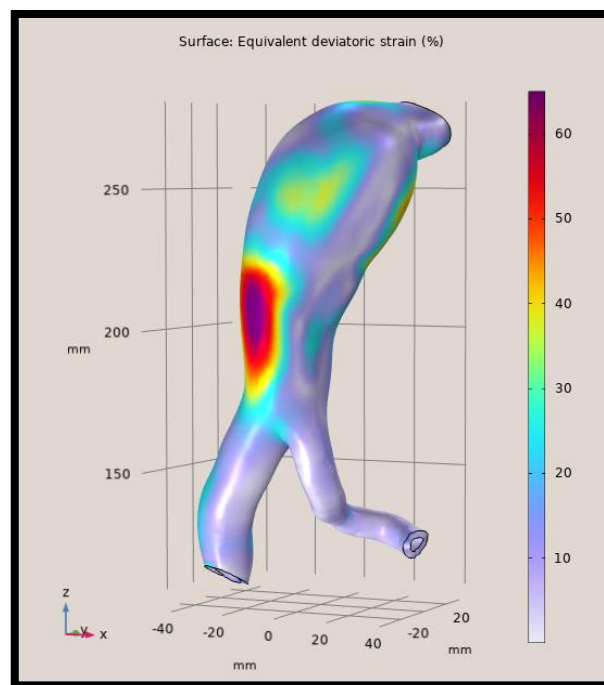


Εικόνα 4.12 c) Διάγραμμα μετατοπίσεων

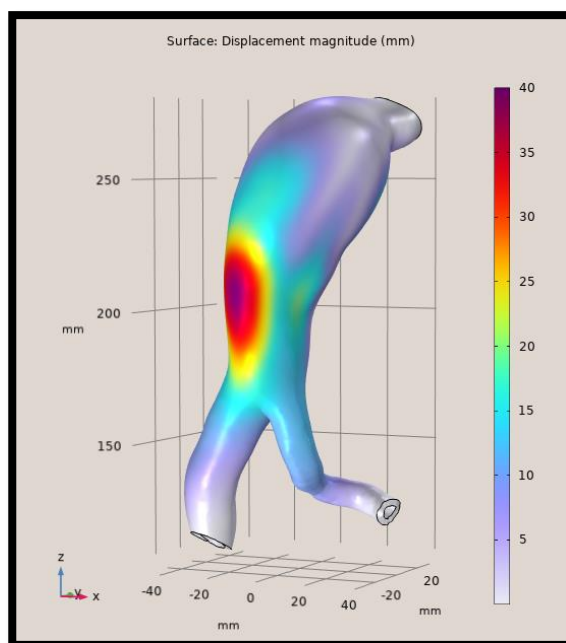
Μοντέλο T2-P15



Εικόνα 4.13 α) Διάγραμμα τάσεων Von Mises

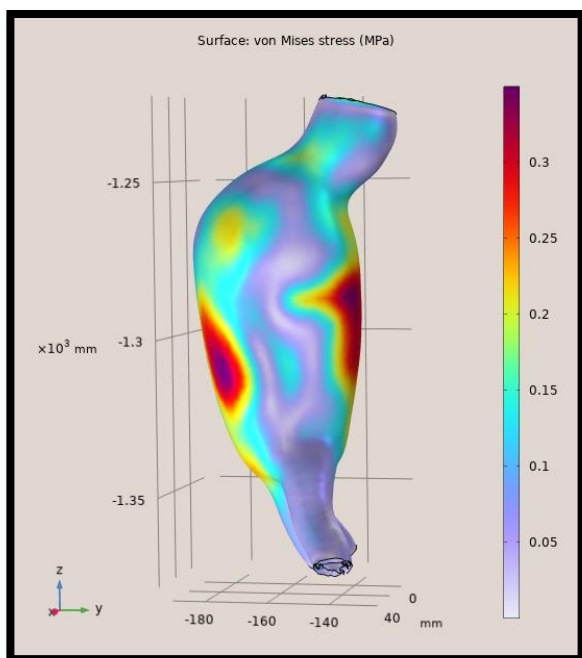


Εικόνα 4.13 β) Διάγραμμα αποκλίνουσας παραμόρφωσης

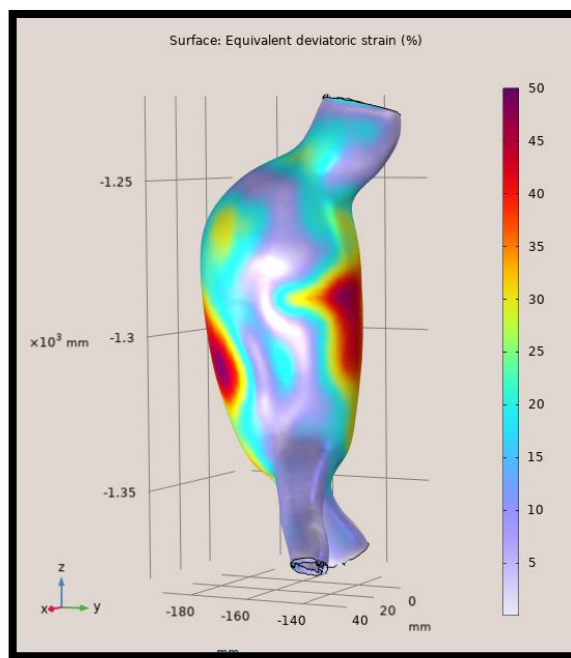


Εικόνα 4.13 γ) Διάγραμμα μετατοπίσεων

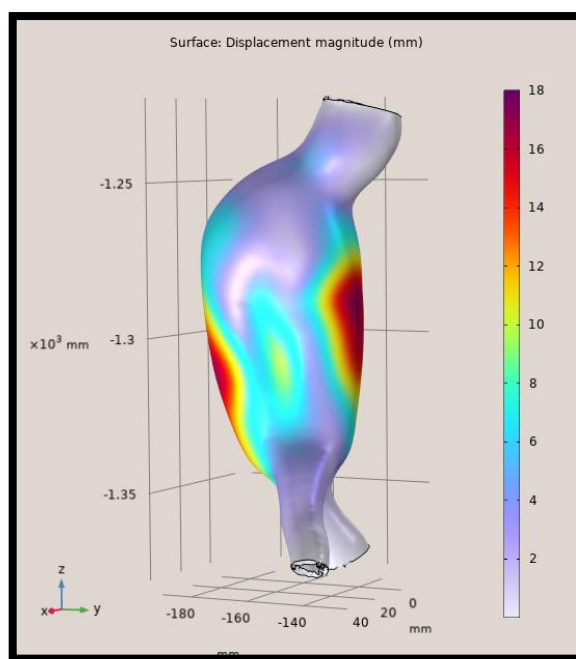
Μοντέλο T2-P17



Εικόνα 4.14 α) Διάγραμμα τάσεων Von Mises



Εικόνα 4.14 β) Διάγραμμα αποκλίνουσας παραμόρφωσης



Εικόνα 4.14 γ) Διάγραμμα μετατοπίσεων

Με την ολοκλήρωση των οπτικοποιημένων αποτελεσμάτων της προσομοίωσης παρουσιάζονται, στον πίνακα 4.1, οι μέγιστες τάσεις, παραμορφώσεις και μετατοπίσεις που εμφανίζονται πάνω στην επιφάνεια του κάθε μοντέλου. Στον πίνακα 4.2 τα φυσικά χαρακτηριστικά των ασθενών, η διαγνωστική διάμετρος του ανευρύσματος καθώς και οι μέγιστες τάσεις και μετατοπίσεις:

Πίνακας 4.1 Μέγιστες τιμές τάσεων-παραμορφώσεων-μετατοπίσεων

Μοντέλο	Πίεση στην επιφάνεια του κελύφους KPa	Μέγιστη τιμή τάσης Von mises MPa	Μέγιστη αποκλίνουσα παραμόρφωση %	Μέγιστη μετατόπιση επιφάνειας mm
T1-P2	20	0.35	50	13
T1-P5	20	0.37	50	9
T1-P6	20	0.6	80	24
T1-P9	20	0.35	50	18
T1-P10	20	0.55	70	35
T1-P11	20	0.25	40	7
T1-P14	20	0.45	60	21
T1-P16	20	0.4	50	18
T2-P2	20	0.7	70	30
T2-P3	20	0.3	35	14
T2-P13	20	0.3	35	14
T2-P14	20	0.4	50	14
T2-P15	20	0.5	60	40
T2-P17	20	0.35	50	18

Πίνακας 4.2 Φυσικά χαρακτηριστικά των ασθενών, διαγνωστική διάμετρος ανευρύσματος, τάσεις και μετατοπίσεις

Ασθενής	Φύλο	Ηλικία	Διαγνωστική διάμετρος ΑΚΑ (cm)	Μέγιστη τιμή τάσης (VM-MPa)	Μέγιστη Μετατόπιση (mm)
T1-P2	M	81	4.8	0.35	13
T1-P5	M	72	5.1	0.37	9
T1-P6	M	66	5.8	0.6	24
T1-P9	M	57	6.8	0.35	18
T1-P10	M	57	4.8	0.55	35
T1-P11	M	70	5	0.25	7
T1-P14	M	81	5	0.45	21
T1-P16	M	76	5.5	0.4	18
T2-P3	M	78	5	0.7	30
T2-P4	M	66	6.1	0.3	14
T2-P13	M	62	5.1	0.3	14
T2-P17	M	67	5	0.4	14

Στους πίνακες 4.1 και 4.2 με τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρατηρείται ότι οι μεγαλύτερες τιμές των τάσεων Von Mises, οι οποίες υπολογίζονται από τις συνιστώσες των τάσεων που δρουν πάνω στην επιφάνεια των κελυφών, που εμφανίζονται στις επιφάνειες των μοντέλων, είναι τάσεις που προκύπτουν στα σημεία που συναντώνται οι μεγαλύτερες μετατοπίσεις και παραμορφώσεις πάνω στην επιφάνεια του κελύφους. Οι ασθενείς είναι μεσήλικες έως ηλικιωμένοι από 57 μέχρι 81 ετών με διαγνωστική διάμετρο μεταξύ 4.8cm έως 6.8cm. Στις περιοχές που εμφανίζονται οι μεγαλύτερες τάσεις και μετατοπίσεις θεωρούμε ότι είναι περιοχές επικινδυνότητας. Επίσης, οι μέγιστες τάσεις και παραμορφώσεις διαφέρουν από ασθενή σε ασθενή και συμπεραίνουμε ότι ο κάθε ασθενής είναι διαφορετικός, η μοντελοποίηση του είναι μοναδική και οι μέγιστες τιμές αλλάζουν για κάθε περίπτωση ασθενούς.

Επιπλέον, με βάση τους παραπάνω πίνακες, οι μέγιστες αποκλίνοσες παραμορφώσεις κυμαίνονται από 35% έως και 80% σε κάποια μοντέλα. Αυτό σημαίνει ότι έχουμε σημαντικά μεγάλες τιμές στα σημεία όπου εμφανίζονται οι μέγιστες τιμές στις επιφάνειες των κελυφών αυξάνοντας την επικινδυνότητα ρήξης της αορτής σε αυτές τις περιοχές. Όσο αφορά τις μετατοπίσεις, οι μέγιστες μετατοπίσεις από τις επιφάνειες φαίνεται να κυμαίνονται από 7mm έως 40mm και οι υψηλότερες μετατοπίσεις να συμβαίνουν στο εύρος 18mm έως 40mm. Τέλος, η γραμμική στατική ανάλυση αποτελεί μια πιο απλή μελέτη και τα αποτελέσματα μπορούν να γίνουν πιο ακριβή με διαφορετικές μεθόδους. Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο καθώς αποτελεί μια πρώτη προσπάθεια εισαγωγής και ανάλυσης γεωμετριών ανευρυσματικών αορτών και μοντελοποίησης σε περιβάλλον προσομοίωσης. Έτσι υποδεικνύεται η ανάγκη για περαιτέρω ανάλυση και βελτιστοποίηση με πιο αναλυτικές μεθόδους μοντελοποίησης.

4.2 Συμπεράσματα

Σε αυτήν την διπλωματική εργασία είχαμε την ευκαιρία να αποκτήσουμε εξοικείωση στις προσομοιώσεις με χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων σε τρισδιάστατα μοντέλα στοιχείων κελύφους, να κατανοήσουμε την συμπεριφορά τους, την διαδικασία επίλυσης τους καθώς και την κατανόηση των εξαγόμενων αποτελεσμάτων από την διαδικασία.

Δοκιμάστηκαν αρκετές παραλλαγές στην παραμετροποίηση των αορτών σε όλες τις γεωμετρίες και παρατηρήθηκε ότι οι περιοχές με τις μεγαλύτερες τάσεις και παραμορφώσεις δεν αλλάζουν, ίσως υπάρξουν αυξομειώσεις στις τιμές σε εκείνα τα σημεία και σε κάποιες περιπτώσεις ίσως επηρεαστούν δυνητικά γειτονικές περιοχές πάνω στις επιφάνειες.

Κατά την διεξαγωγή της έρευνας παρατηρήθηκε ότι η επαρκής μοντελοποίηση είναι ένας από τους πλέον καθοριστικούς παράγοντες στην εκτέλεση προσομοιώσεων καθώς η εισαγωγή των τρισδιάστατων γεωμετριών και της παραμετροποίησης που ορίζεται επηρεάζει άμεσα τα αποτελέσματα. Χρειάστηκαν αρκετές δοκιμές για να μπορέσουμε να προσομοιώσουμε όσο καλύτερα γινόταν την πραγματικότητα καθώς η γεωμετρία των αορτών είναι εκ φύσεως πολύπλοκη. Τα μοντέλα λήφθηκαν μέσω των συνεργαζόμενων επιστημόνων, όπως αναφέρεται στην εισαγωγή, αλλά χρειάστηκαν μικρές επεμβάσεις ώστε να γίνει δυνατή η εκτέλεση της προσομοίωσης μηχανικής απόκρισης.

Τέλος, είναι αναγκαίο να επισημανθεί ότι η ποικιλομορφία των φυσικών χαρακτηριστικών των ασθενών είναι σημαντικός παράγοντας στην μοντελοποίηση και στην εξαγωγή συμπερασμάτων καθώς και οι παραπάνω παρατηρήσεις συμβάλλουν σημαντικά στην καλύτερη κατανόηση της δυναμικής που διέπει τις ανευρυσματικές αορτές. Από τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν δεν προκύπτει άμεση συσχέτιση μεταξύ διαμέτρου αρτηριών και μέγιστων τάσεων και πιθανολογείται η ανάγκη να γνωρίζουμε περισσότερα στοιχεία που χαρακτηρίζουν κάθε περίπτωση (λόγου χάρη το μήκος του ανευρύσματος ή άλλα μορφολογικά χαρακτηριστικά του). Η έρευνα αυτή θα συμβάλει με την σειρά της στην βελτίωση της διάγνωσης, πρόληψης και αντιμετώπισης των ασθενών με ανεύρυσμα και σε συνολικό βαθμό δίνει ιδέες για περισσότερη μελέτη και εξέλιξη των μοντέλων στο συγκεκριμένο αντικείμενο.

4.3 Μελλοντική έρευνα

Οι προσομοιώσεις που παρουσιάστηκαν παραπάνω είναι αποτέλεσμα στατικής γραμμικής ανάλυσης με χρήση πεπερασμένων στοιχείων σε στοιχεία κελύφους. Μια περαιτέρω ανάλυση και ενδιαφέρουσα προοπτική για μελλοντική έρευνα θα ήταν η μετάβαση από στατική γραμμική ανάλυση σε στατική μη γραμμική ανάλυση. Η μέθοδος της μη γραμμικής ανάλυσης είναι πιο σύνθετο και απαιτητικό αντικείμενο μελέτης και παρουσιάζει προκλήσεις όσο αφορά την μοντελοποίηση καθώς συμπεριλαμβάνει μη γραμμικές δομές και υλικά τα οποία έχουν αρκετά πολύπλοκη διαδικασία παραμετροποίησης και απαιτεί αρκετά μεγάλο υπολογιστικό κόστος. Παρόλα αυτά, η χρήση της μπορεί να οδηγήσει σε πιο ακριβή αποτελέσματα και στην ανακάλυψη νέων πτυχών της συμπεριφοράς των ανευρυσματικών αορτών. Το αντικείμενο αυτό ενδείκνυται για τη συνέχιση της έρευνας.

Επίσης μια άλλη μελλοντική επέκταση της παραπάνω μελέτης θα ήταν οι πιέσεις στο εσωτερικό της αρτηρίας να προέρχονται από κατάλληλο μοντέλο της ρευστοδυναμικής (CFD - Computational Fluid Dynamics) ώστε οι πεπερασμένες αναλύσεις των αορτών να συνδέονται με την αιμοδυναμική εικόνα προκειμένου να ορίζονται πιο ρεαλιστικά οι συνθήκες φόρτισης. Τέλος, στο μέλλον θα μπορούσαν να αναπτυχθούν μοντέλα βασισμένα σε τεχνητή νοημοσύνη ώστε να εξασφαλιστεί η πιο γρήγορή ανάλυση και λήψη αποφάσεων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] “SAFE-AORTA.” Accessed: May 11, 2024. [Online]. Available: <https://safe-aorta.gr/>
- [2] K. B. Chandran, “Flow Dynamics in the Human Aorta,” *J. Biomech. Eng.*, vol. 115, no. 4B, pp. 611–616, Nov. 1993, doi: 10.1115/1.2895548.
- [3] M. H. Villarreal based on work by Edoarado, Mariana Ruiz, *English: Branches of the aorta*. 2017. Accessed: Apr. 18, 2024. [Online]. Available: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=59526387>
- [4] “Figure 2. Mean systolic and diastolic blood pressure by age and sex in...,” ResearchGate. Accessed: May 12, 2024. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Mean-systolic-and-diastolic-blood-pressure-by-age-and-sex-in-the-overall-sample_fig6_236079046
- [5] “Διάλεξη 12 -Αρτηριακή πίεση_oc.pdf.” Accessed: May 08, 2024. [Online]. Available: <https://opencourses.uoc.gr/courses/course/view.php?id=241>
- [6] Ε. Κ. Εταιρεία, “Αρτηριακή πίεση,” Ελληνική Καρδιολογική Εταιρεία. Accessed: May 12, 2024. [Online]. Available: <https://www.hcs.gr/astheneis-koino/artiriaki-piesi/>
- [7] “Αορτή,” *Βικιπαίδεια*. Dec. 30, 2022. Accessed: Apr. 18, 2024. [Online]. Available: <https://el.wikipedia.org/w/index.php?title=%CE%91%CE%BF%CF%81%CF%84%CE%AE&oldid=9842634>
- [8] “Ανεύρυσμα,” *Βικιπαίδεια*. Feb. 02, 2024. Accessed: Apr. 18, 2024. [Online]. Available: <https://el.wikipedia.org/w/index.php?title=%CE%91%CE%BD%CE%B5%CF%8D%CF%81%CF%85%CF%83%CE%BC%CE%B1&oldid=10411827>
- [9] “Ανευρύσματα,” Γεώργιος Ρόκας. Accessed: Apr. 19, 2024. [Online]. Available: <https://www.angio-laser-center.gr/%ce%b1%cf%81%cf%84%ce%b7%cf%81%ce%b9%ce%b1%ce%ba%ce%ad%cf%82-%cf%80%ce%b1%ce%b8%ce%ae%cf%83%ce%b5%ce%b9%cf%82/%ce%b1%ce%bd%ce%b5%cf%85%cf%81%cf%8d%cf%83%ce%bc%ce%b1%cf%84%ce%b1/>
- [10] “Ανεύρυσμα Εγκεφάλου Συμπτώματα & Αποκατάσταση - Δρ. Ανδρουλής.” Accessed: May 08, 2024. [Online]. Available: <https://neuroxeirourgiki.gr/aneurysma/>
- [11] “Ανεύρυσμα Θωρακικής Αορτής | Ωνάσειο.” Accessed: Apr. 23, 2024. [Online]. Available: <http://www.onasseio.gr/yphresies/aneurisma-thorakikis-aortis/>
- [12] “Συμπτώματα Ανευρύσματος Κοιλιακής Αορτής.” Accessed: May 08, 2024. [Online]. Available: <https://www.vascularhealth.gr/gr/%CE%B1%CE%B3%CE%B3%CE%B5%CE%B9%CE%B1%CE%BA%CE%AD%CF%82-%CF%80%CE%B1%CE%B8%CE%AE%CF%83%CE%B5%CE%B9%CF%82/%CE%B1%CE%BD%CE%B5%CF%8D%CF%81%CF%85%CF%83%CE%BC%CE%B1-%CE%B1%CE%BF%CF%81%CF%84%CE%AE%CF%82/%CE%B1%CE%BD%CE%B5%CF%8D%CF%81%CF%85%CF%83%CE%BC%CE%B1-%CE%BA%CE%BF%CE%B9%CE%BB%CE%B9%CE%B1%CE%BA%CE%AE%CF%82-%CE%B1%CE%BF%CF%81%CF%84%CE%AE%CF%82/%CF%83%CF%85%CE%BC%CF%80%CF%84%CF%8E%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%B1-%CE%B1%CE%BD%CE%B5%CF%85%CF%81%CF%8D%CF%83%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%BF%CF%82-%CE%BA%CE%BF%CE%B9%CE%BB%CE%B9%CE%B1%CE%BA%CE%AE%CF%82-%CE%B1%CE%BF%CF%81%CF%84%CE%AE%CF%82>
- [13] “Ανεύρυσμα κοιλιακής αορτής,” Αγγειοχειρουργός Ζαχ. Ανδρουλακάκης. Accessed: May 08, 2024. [Online]. Available: <https://www.angionet.gr/aggeiakas-pathiseis/aneurysma-koiliakis-aortis/>
- [14] N. Ajiboye, N. Chalouhi, R. M. Starke, M. Zanaty, and R. Bell, “Unruptured Cerebral Aneurysms: Evaluation and Management,” *Sci. World J.*, vol. 2015, pp. 1–10, 2015, doi: 10.1155/2015/954954.

- [15] “Ανεύρυσμα Εγκεφάλου: Συμπτώματα & Θεραπεία | Π. Σταυρινού,” Νευροχειρουργός Π. Σταυρινού. Accessed: Apr. 23, 2024. [Online]. Available: <https://nevroxirurgos.gr/cheirurgiki-egkefalou/anevryisma-egkefalou/>
- [16] N. E. A. Saad, W. E. A. Saad, M. G. Davies, D. L. Waldman, P. J. Fultz, and D. J. Rubens, “Pseudoaneurysms and the Role of Minimally Invasive Techniques in Their Management,” *RadioGraphics*, vol. 25, no. suppl_1, pp. S173–S189, Oct. 2005, doi: 10.1148/rg.25si055503.
- [17] “Figure 1: Point-of-care ultrasound (POCUS) in transverse view shows...,” ResearchGate. Accessed: May 13, 2024. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Point-of-care-ultrasound-POCUS-in-transverse-view-shows-abdominal-aortic-aneurysm-AAA_fig1_359737324
- [18] M. P. Hartung, M. Cadogan, and M. P. H. and M. Cadogan, “Abdominal CT: aortic aneurysm,” *Life in the Fast Lane • LITFL*. Accessed: May 13, 2024. [Online]. Available: <https://litfl.com/abdominal-ct-aortic-aneurysm/>
- [19] “Fig. 12. MRA for abdominal aortic aneurysm. Oblique coronal MIP image...,” ResearchGate. Accessed: May 13, 2024. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/MRA-for-abdominal-aortic-aneurysm-Oblique-coronal-MIP-image-from-a-contrast-enhanced_fig12_221929386
- [20] U. F. O. Themes, “Magnetic Resonance Imaging in the Evaluation of Abdominal Aortic Aneurysm,” Thoracic Key. Accessed: May 13, 2024. [Online]. Available: <https://thoracickey.com/magnetic-resonance-imaging-in-the-evaluation-of-abdominal-aortic-aneurysm/>
- [21] “Ανεύρυσμα εγκεφάλου : Neurocenter.gr - Νευροχειρουργική και Νευρολογία.” Accessed: Apr. 23, 2024. [Online]. Available: <https://neurocenter.gr/anevrismata-egkefalou.html>
- [22] “Εγχείρηση ανευρύσματος αορτής,” Αγγειοχειρουργός Ζαχ. Ανδρουλακάκης. Accessed: Apr. 23, 2024. [Online]. Available: <https://www.angionet.gr/therapeia/egxeirisi-anevrysmatos-aortis/>
- [23] “Παθήσεις της αορτής (δ’ μέρος)-Τραυματική ρήξη της αορτής,” in.gr. Accessed: May 08, 2024. [Online]. Available: <https://www.in.gr/2005/06/27/health/health-news/pathiseis-tis-aortis-d-meros-traymatiki-riksi-tis-aortis/>
- [24] Σ. Φοινίτης, “Αορίτις Απεικόνιση.” Accessed: Apr. 18, 2024. [Online]. Available: <https://docplayer.gr/359840-Aortitis-apeikonisi-foinitsis-stefanos.html>
- [25] “Τί πρέπει να ξέρετε για τη στένωση της αορτικής βαλβίδας* - Health Today Magazine.” Accessed: May 08, 2024. [Online]. Available: <https://www.healthtodaymag.gr/1026/ti-prepei-na-xerete-gia-ti-stenosi-tis-aortikis-valvidas/>
- [26] “Στένωση της αορτικής βαλβίδας,” Όμιλος Ιατρικού Κέντρου. Accessed: May 08, 2024. [Online]. Available: <https://www.iatriko.gr/el/disease/stenosi-tis-aortikis-valvidas>
- [27] “Παθήσεις Αορτικής βαλβίδας | Ωνάσειο.” Accessed: May 08, 2024. [Online]. Available: <http://www.onasseio.gr/yphresies/pathiseis-aortikis-valvidas/>
- [28] “Η ΑΝΕΠΑΡΚΕΙΑ ΤΗΣ ΑΟΡΤΙΚΗΣ ΒΑΛΒΙΔΑΣ | Καρδιολογία.” Accessed: May 08, 2024. [Online]. Available: <https://www.xn--mxaafcdskbbdjf5cbbqjk8acaf.gr/2015/06/23/%ce%b7-%cf%87%cf%81%ce%bf%ce%bd%ce%b9%ce%b1-%ce%b1%ce%bd%ce%b5%cf%80%ce%b1%cf%81%ce%ba%ce%b5%ce%b9%ce%b1-%cf%84%ce%b7%cf%83-%ce%b1%ce%bf%cf%81%cf%84%ce%b9%ce%ba%ce%b7%cf%83-%ce%b2%ce%b1%ce%bb%ce%b2/>
- [29] “Επιδιόρθωση Ανεπάρκειας της Αορτικής Βαλβίδας | Ωνάσειο.” Accessed: May 08, 2024. [Online]. Available: <http://www.onasseio.gr/yphresies/epidiorthosi-aneparkeias-tis-aortikis-valvidas/>
- [30] T. R. Chandrupatla and A. D. Belegundu, *Introduction to finite elements in engineering*, 5th edition. Cambridge, United Kingdom ; New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2022.
- [31] H. Hoppe, T. DeRose, T. Duchamp, J. McDonald, and W. Stuetzle, “Mesh optimization,” in *Proceedings of the 20th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, Anaheim CA: ACM, Sep. 1993, pp. 19–26. doi: 10.1145/166117.166119.