

Σύστημα Υποστήριξης Κλινικών Αποφάσεων
για τη Νόσο των Ανευρυσμάτων Κοιλιακής Αορτής
Βασισμένο σε Μοντέλα Τεχνητής Νοημοσύνης



Παραδοτέο Π4.3.

Εμβιομηχανική Ανάλυση Κελύφους

Όνομα Αρχείου:	Safe-Aorta-D4.3-v1.0- Εργαλείο εμβιομηχανικής ανάλυσης ΑΚΑ .pdf	Επίπεδο Διάδοσης:	Δημόσιο
Ημερομηνία Υποβολής:	Αύγουστος 2025 (M24)	Κωδικός Έργου:	TAEDR-0535983
Κοινοπραξία:	ΕΜΠ, ΠΔΜ, ΠΚ, ΕΛΜΕΠΑ, ΠΑΔΑ, ΠΒΕΑΑ, ΠΑΠΕΛ	Υπεύθυνος Παραδοτέου:	ΠΚ
Διάρκεια:	28 μήνες	Κατάσταση:	Τελική έκδοση

ΛΙΣΤΑ ΣΥΓΓΡΑΦΕΩΝ

Συγγραφείς				
#	Επίθετο	Όνομα	Φορέας	Email Επικοινωνίας
1	Σταυρουλάκης	Γεώργιος	ΠΚ	gestavroulakis@tuc.gr
2	Μουρατίδου	Αλίκη	ΠΚ	amouratidou@tuc.gr
3	Κλαδοβασιλάκης	Νικόλαος	ΠΚ	nkladovasilakis@ihu.gr
4				
Συν-συγγραφείς				
#	Επίθετο	Όνομα	Φορέας	Email Επικοινωνίας
1	Δροσόπουλος	Γεώργιος	ΠΚ	gdrosoopoulos@ihu.gr
2	Δαράκη	Μαρία-Στυλιανή	ΠΚ	Mdaraki1@tuc.gr
3	Κυπαρίσσης	Κωνσταντίνος	ΠΚ	
4	Μαυραγάνης	Μιχαήλ	ΠΚ	
5	Ξυδιάς	Χαράλαμπος-Φαίδων	ΠΚ	

ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΗΣ

Έκδοση	Συγγραφέας	Ημερομηνία	Κατάσταση
0.1			Προσχέδιο
0.2			
0.3			
1.0		8/2025	Τελικό

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα	iii
Περίληψη	iii
1. Ενότητα 1	1
1.1 Σκοπός του παραδοτέου	1
1.2 Υπόβαθρο	1

1.3 Δομή του Εγγράφου	1
2. Ενότητα 2	3
2.1 Μη γραμμική και γραμμική ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (FEM).....	3
2.1.2 Προσέγγιση πεπερασμένων στοιχείων	3
2.1.3 Αριθμητική εφαρμογή με χρήση του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων	3
2.1.4 Αριθμητικά αποτελέσματα	5
Πίνακας 3. Ισοδύναμη παραμορφωτική παραμόρφωση για T1–P5.....	7
Πίνακας 4. Αξονική παραμόρφωση για T1–P5.	7
2.2 Μη γραμμική προσομοίωση FEM με HGO μοντέλα	8
2.1.2 Μέθοδος μερικών ελαχίστων τετραγώνων (Partial Least Square, PLS)	9
Η μέθοδος χρησιμοποιείται μαζί με την παρεμβολή χρησιμοποιείται για να χτίζουμε νευρωνικό δίκτυο για την πρόβλεψη κυρία χαρακτηριστικά της ελαστικότητας.	9
Βιβλιογραφία.....	14

Περίληψη

Περιγράφεται συνοπτικά η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την εκτίμηση των μηχανικών παραμέτρων στα τοιχώματα κοιλιακών αορτών με ανευρύσματα, η συσχέτιση με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και η δημιουργία και χρήση βάσης αποτελεσμάτων πάνω στα οποία στηρίζεται το ψηφιακό δίδυμο.

Διεξάγεται έρευνα για το ανεύρυσμα κοιλιακής αορτής (AAA) με βάση ιατρικές εικόνες αξονικής τομογραφίας (Computed Tomography, CT). Οι εικόνες μετατρέπονται σε τρισδιάστατα μοντέλα (3D) επιφάνειας για την προσομοίωση της συμπεριφοράς παραμόρφωσης των τοιχωμάτων κοιλιακών αορτών με ανευρύσματα και την εκτίμηση του κινδύνου ρήξης.

Χρησιμοποιούνται λογικές υποθέσεις για της κέλυφος-αορτής, με κοινή πίεση και πάχος. Το υπερελαστικό μη-γραμμικό μοντέλο υλικού Yeoh και το γραμμικό μοντέλο για σύγκριση προσομοιώνονται χρησιμοποιώντας μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων (FEM) για τις αορτές. Για την πρόβλεψη της εξέλιξης του ανευρύσματος, λαμβάνεται υπόψη μια σταδιακή αύξηση της πίεσης (blood pressure) και των παραμέτρων του μοντέλου.

Αριθμητικά αποτελέσματα λαμβάνονται για τη μέγιστη τιμή των τάσεων von Mises και παραμορφώσεων. Μια ανάλυση και πρόβλεψη των βασικών χαρακτηριστικών της μηχανικής του τοιχώματος της αορτής γίνεται σε ιατρικές τομογραφικές εικόνες ασθενών χρησιμοποιώντας το υπερελαστικό μη γραμμικό μοντέλο Yeoh και το γραμμικό μοντέλο. Οι τεχνικές που εισάγονται μπορούν να παρέχουν επαρκείς εκτιμήσεις για τις μετατοπίσεις σε απρόσιτα σημεία, όπως εικονικοί αισθητήρες, οι οποίοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πρόβλεψη ρήξης μέσα σε ένα ολοκληρωμένο εργαλείο τεχνητής νοημοσύνης. Τα πεπερασμένα στοιχεία στη μηχανική στερεών μπορούν να προσομοιώσουν τη μηχανική απόκριση, μετά από κατάλληλες υποθέσεις σχετικά με τις μηχανικές ιδιότητες, το πάχος και τις συνοριακές συνθήκες (πίεση και στήριξη).

Για την δημιουργία του ψηφιακού δίδυμου χρησιμοποιείται η μέθοδος των μερικών ελαχίστων τετραγώνων (Partial Least Squares, PLS) μαζί με παρεμβολή για την πρόβλεψη των βασικών χαρακτηριστικών (εντάσεις, παραμορφώσεις, συνολική ενέργεια πυκνότητας παραμόρφωσης κ.λπ.) της αορτής χρησιμοποιώντας ανοιχτό λογισμικό (κώδικας Python). Τα υπολογισμένα βασικά χαρακτηριστικά για ένα σύνολο αορτών μετά τη χρήση γραμμικών ή μη γραμμικών υπερελαστικών μοντέλων μαζί με ένα πρότυπο πλέγμα χρησιμοποιούνται για την εκπαίδευση ενός νευρωνικού δικτύου με σκοπό τη δημιουργία ενός νευρωνικού μοντέλου (ψηφιακό δίδυμο) για την πρόβλεψη, π.χ., ενός πεδίου τάσης και άλλων χαρακτηριστικών για οποιαδήποτε νέα αορτή. Τα αποτελέσματα της πρόβλεψης παρουσιάζονται με παραδείγματα τεχνητών αορτών, οι οποίες έχουν παραχθεί με βάση την ιατρικής στατιστικής ανάλυσης από αξονικές τομογραφίες (CT).

Παρά τις αβεβαιότητες στον προσδιορισμό των απαιτούμενων δεδομένων, η FEM μπορεί να παρέχει προβλέψεις σε κρυφά μέρη της AAA, με την έννοια των εικονικών αισθητήρων, υποστηρίζοντας έτσι τη δημιουργία ψηφιακών δίδυμων και παρέχοντας υποστήριξη για την πρόβλεψη ρήξης.

1. Ενότητα 1

Το παραδοτέο Π4.3 αφορά **Μοντελοποίηση των τοίχων της κοιλιακής αορτής με ανεύρυσμα, βασισμένη σε ιατρικές τομογραφίες (ct) με τη χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων και τεχνητής νοημοσύνης**

1.1 Σκοπός του παραδοτέου

Ο σκοπός του παραδοτέου είναι η δημιουργία του ψηφιακού διδύμου για την ανευρυσματική αορτή και την επίτευξη αποτελεσμάτων για την υποστήριξη κλινικών αποφάσεων για τη νόσο των ανευρυσμάτων κοιλιακής αορτής. Το παραδοτέο περιλαμβάνει τον υπολογισμό των βασικών χαρακτηριστικών της μηχανικής του αρτηριακού τοιχώματος με ανεύρυσμα από τις ιατρικές τομογραφίες και με τη χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων. Η βάση δεδομένων που δημιουργείται μπορεί στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί για την υποστήριξη ψηφιακού διδύμου. Γίνεται επίδειξη με χρήση τεχνητής νοημοσύνης (νευρωνικά δίκτυα). Η βάση με τα αποτελέσματα καλείται για τις ανάγκες του έργου από το πρόγραμμα παραμετροποιημένων αορτών [Εκθέσεις συναδέλφου Ν. Διαγγελάκη και ομάδας του στο Πολυτεχνείο Κρήτης]

1.2 Υπόβαθρο

Το ανεύρυσμα της κοιλιακής αορτής (AAA) είναι μια τοπική διαστολή του τοιχώματος της αορτής, που αποτελεί μία από τις πιο επικίνδυνες καρδιαγγειακές παθήσεις λόγω του κινδύνου ρήξης και της υψηλής θνησιμότητας που συνδέεται με αυτήν. Παραδοσιακά, η κλινική λήψη αποφάσεων για την εκλεκτική επισκευή βασίζεται σχεδόν αποκλειστικά σε γεωμετρικά κριτήρια, ιδίως στη μέγιστη διαγώνια διάμετρο του ανευρύσματος (π.χ. >5,5 cm για τους άνδρες) και στον ρυθμό ανάπτυξής του, σύμφωνα με τις κατευθυντήριες γραμμές. Υπάρχουν πολυάριθμες περιπτώσεις ρήξης μικρότερων ανευρυσμάτων και διατήρησης σταθερότητας των μεγαλύτερων, γεγονός που υποδηλώνει ότι η γεωμετρία από μόνη της δεν είναι επαρκής. Αυτό το κλινικό δίλημμα υπογραμμίζει την επείγουσα ανάγκη για πιο αξιόπιστους, ειδικούς για τον ασθενή βιομηχανικούς δείκτες της τάσης και της αντοχής του τοιχώματος, ώστε να συμπληρωθούν τα παραδοσιακά κριτήρια που βασίζονται στο μέγεθος και να εξατομικευθούν οι στρατηγικές θεραπείας. Η κύρια υπόθεση της εμβιομηχανικής για τη ρήξη του AAA υποδεικνύει ότι η ρήξη συμβαίνει όταν η μηχανική πίεση που ασκείται στο τοίχωμα του ανευρύσματος, η οποία προκαλείται από την αρτηριακή πίεση, υπερβαίνει την τοπική μηχανική αντοχή του.

1.3 Δομή του Εγγράφου

Στο πρώτο μέρος του παραδοτέου παρουσιάζεται μη γραμμική ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων με χρήση ειδικών για κάθε ασθενή τρισδιάστατων εικόνων CAD της AAA, που έχουν ληφθεί από αξονικές τομογραφίες και μαγνητικές τομογραφίες.

Το μέρος αντιμετωπίζει τον υπολογισμό των τάσεων, των παραμορφώσεων, την συνολική ελαστική ενέργεια παραμόρφωσης κ.λπ. αορτών από τους πραγματικούς ασθενείς.

Δεδομένου ότι οι εικόνες είναι αναγνώσιμες μόνο σε μηχανική κελύφους, δεν είναι δυνατή η προσομοίωση των ινών στην περιγραφή του γνωστού υλικού, (Holzapfel-Gasser-Ogden,

HGO). Το μη γραμμικό μοντέλο Yeoh έχει εφαρμοστεί για την καταγραφή της μη γραμμικής απόκρισης. Τα αριθμητικά αποτελέσματα της μη γραμμικής προσομοίωσης με βάση πραγματικές εικόνες της αορτής συγκρίνονται με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη χρήση του γραμμικού μοντέλου υλικού.

Στο δεύτερο μέρος για την δημιουργία πληθώρας αποτελεσμάτων, οι γεωμετρίες των σύνθετων αορτών έχουν κατασκευαστεί με βάση ιατρική στατιστική ανάλυση από αξονική τομογραφία (CT)..

Το τρίτο μέρος του έργου περιγράφει τον αλγόριθμο για πρόβλεψη των χαρακτηριστικών (τάσεις, παραμορφώσεις κλπ.) της μηχανικής του τοιχώματος της αορτής από το νευρωνικό μοντέλο με βάση δεδομένων που ελήφθησαν από τα προηγούμενα μέρη. Το PLS μαζί με την παρεμβολή χρησιμοποιείται για να χτιστεί το νευρωνικό δίκτυο για την πρόβλεψη.

Το τέταρτο μέρος του έργου περιγράφει τεχνικά θέματα που έχουν σχέση με τη δημιουργία της βάσης δεδομένων για τη μηχανικών των τοιχωμάτων. Συγκεκριμένα, την εισαγωγή των διαφορετικών γεωμετριών από το stl αρχεία (γεωμετριών επιφάνειας 3D CAD που έχουν δημιουργηθεί από το data set με σύνθετες αορτές). Έχει δημιουργηθεί vkt αρχεία από τα stl αρχεία μαζί με τις πληροφορίες σχετικά με τη διάμετρο, το μήκος και άλλες παραμέτρους, ώστε να είναι δυνατή η λήψη αποτελεσμάτων για πολλές σύνθετες αορτές, με τον υπολογισμό τάσης και παραμόρφωσης και άλλων χαρακτηριστικών ελαστικότητας.

Η μεθοδολογία είναι γενική και αφορά την καθοδήγηση οποιουδήποτε πακέτου πεπερασμένων στοιχείων είναι διαθέσιμο με ένα κώδικα καθοδήγησης των παραμετρικών επιλύσεων.

Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η προετοιμασία του συνόλου των δεδομένων για είσοδο και έξοδο του νευρωνικού δικτύου για εκπαίδευση, επικύρωση και πρόβλεψη, χωρίς να καλείται σε πραγματικό χρόνο ο επιλύτης.

Περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με την μηχανική προσομοίωση τοιχωμάτων ανευρυσματικών αορτών δίδονται στις δημοσιεύσεις [1-7].

2. Ενότητα 2

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται οι βασικές έννοιες της εργασίας και απεικονίζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα. Περιγράφονται τέσσερα μέρη της εργασίας.

2.1 Μη γραμμική και γραμμική ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (FEM)

Εδώ παρουσιάζεται μη γραμμική και γραμμική ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων με χρήση ειδικών για κάθε ασθενή τρισδιάστατων εικόνων CAD της AAA, που έχουν ληφθεί από αξονικές τομογραφίες και μαγνητικές τομογραφίες.

2.1.1 Περιγραφή του μοντέλου του υλικού

Μη γραμμική ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων με χρήση ειδικών για κάθε ασθενή τρισδιάστατων εικόνων CAD της AAA παρουσιάζεται. Το μη γραμμικό μοντέλο Yeoh έχει εφαρμοστεί για την καταγραφή της μη γραμμικής απόκρισης. Τα αριθμητικά αποτελέσματα της μη γραμμικής προσομοίωσης με βάση πραγματικές εικόνες της αορτής συγκρίνονται με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη χρήση του γραμμικού μοντέλου υλικού.

Ως πρώτη προσέγγιση εφαρμόστηκε η διαφορά μεταξύ της συστολικής και της διαστολικής πίεσης. Για τον υπολογισμό της μέγιστης τάσης, πρέπει να εφαρμοστεί η μεγαλύτερη διαφορά. Στο μη γραμμικό μοντέλο υπερελαστικού υλικού, χρησιμοποιείται η μέθοδος Newton-Raphson του μη γραμμικού επιλύτη για προσέγγιση, προκειμένου να μειωθεί η ανισορροπία μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών δυνάμεων. Η σύγκλιση των επαναλήψεων Newton-Raphson εξαρτάται από το σχήμα και την ποιότητα της εικόνας CAD, την αρτηριακή πίεση και τις παραμέτρους του υλικού. Χρησιμοποιείται μια διαδικασία παρακολούθησης διαδρομής, δηλαδή η πίεση εφαρμόζεται σε σταδιακές αυξήσεις $P = p_i, i = 1, 2, \dots, n$.

Υποτίθεται ότι τα άκρα της αορτής στο πάνω και στο κάτω μέρος είναι σταθερά στηριγμένα και η πίεση εφαρμόζεται στο εσωτερικό μέρος ή στη μέση επιφάνεια της αορτής. Στο μέλλον, στο μοντέλο μπορούν να συμπεριληφθούν υποθέσεις ειδικές για κάθε ασθενή.

2.1.2 Προσέγγιση πεπερασμένων στοιχείων

Παρουσιάζεται η ανάπτυξη μηχανικών μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων για την AAA υπό γραμμικές και μη γραμμικές υποθέσεις υλικού. Τα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό παραμορφώσεων, τάσεων, μετατοπίσεων, εφελκυσμών, συνολικής ελαστικής ενέργειας παραμόρφωσης και άλλων βασικών χαρακτηριστικών της βιομηχανικής των αρτηριακών τοιχωμάτων. Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιείται για την προσομοίωση μιας μηχανικής απόκρισης, μετά από κατάλληλες υποθέσεις σχετικά με τις μηχανικές ιδιότητες, το πάχος και τις οριακές συνθήκες (φόρτιση και στήριξη). Η πίεση υποτίθεται ότι εφαρμόζεται στην εσωτερική επιφάνεια της αορτής. Λαμβάνεται υπόψη ένα ομογενοποιημένο στρώμα του τοιχώματος της αορτής. Αυτό είναι αποδεκτό για την ανευρυσματική αορτή, όπου ο ιστός του στρώματος δεν μπορεί να διακριθεί καλά.

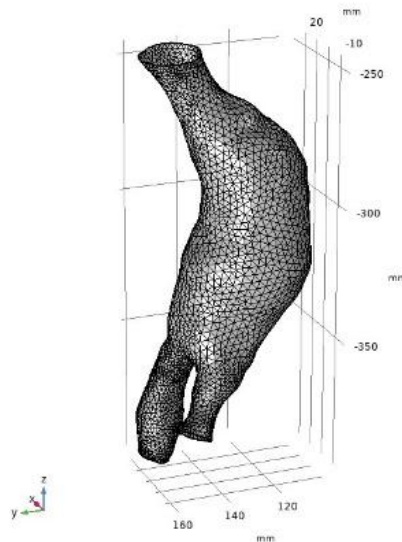
Για τον ακριβή υπολογισμό των βασικών χαρακτηριστικών, εξετάζεται η δυνατότητα χρήσης ενός πολύ πυκνού πλέγματος για τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

2.1.3 Αριθμητική εφαρμογή με χρήση του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων

Στην ενότητα των αποτελεσμάτων, παρουσιάζονται διάφορα παραδείγματα ανευρυσματικών αορτών. Σε αυτά τα παραδείγματα, χρησιμοποιούνται οι ακόλουθες υλικές και φυσικές

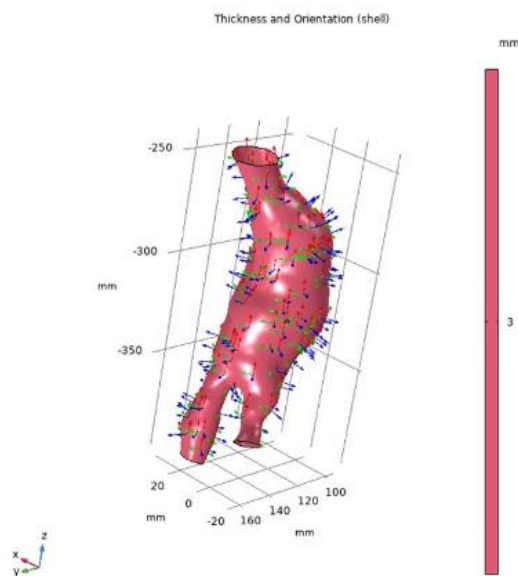
παράμετροι. Η πίεση είναι $P = 5000\text{Pa}$, το πάχος του τοιχώματος της αορτής είναι $h = 0,003\text{m}$ και η πυκνότητα του υλικού του τοιχώματος είναι $\rho = 1050\text{kg/m}^3$. Οι συντελεστές υλικού του μοντέλου Yeoh , ο συντελεστής ελαστικότητας Young και Poisson's ratio έχουν ληφθεί κοντά στις παραμέτρους υλικού της αορτής.

Στα περισσότερα παραδείγματα χρησιμοποιείται ένα πυκνό πλέγμα (Σχήμα 1).



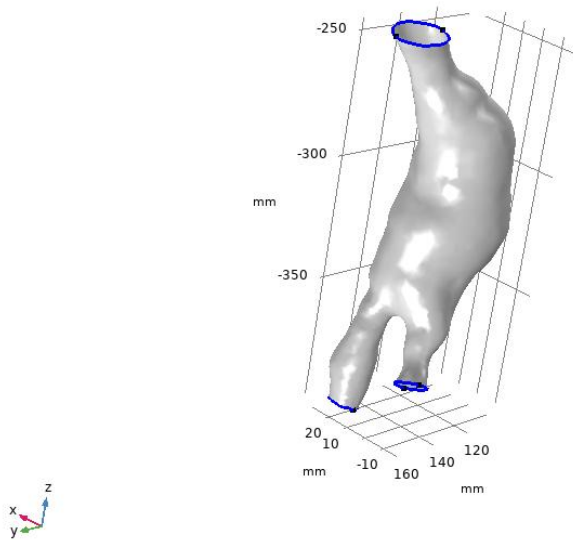
Σχήμα 1. Το πλέγμα στο FEM.

Το φορτίο στην επιφάνεια στο μοντέλο που αναπτύχθηκε είναι η πίεση. Εφαρμόζεται στην εσωτερική επιφάνεια της αορτής. Το φορτίο πίεσης και οι κατευθύνσεις πάχους φαίνονται στο



Σχήμα 2. Κατευθύνσεις πίεσης και πάχους.

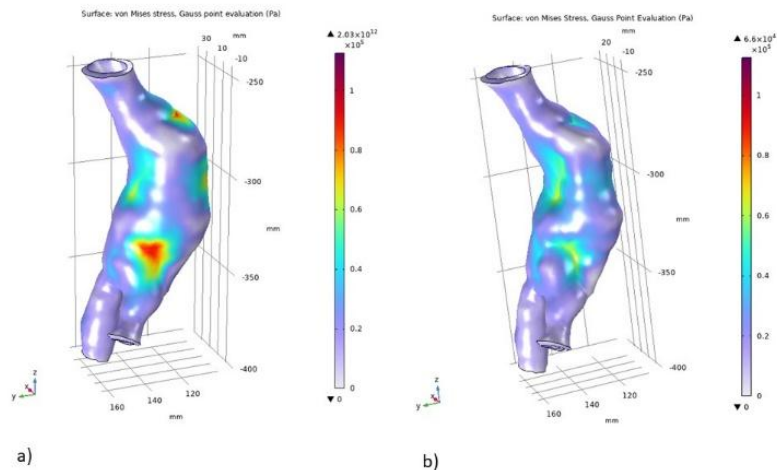
Οι συνοριακές συνθήκες παρέχουν σταθερή (μηδενική) μετακίνηση στο κάτω και στο πάνω μέρος της αορτής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.



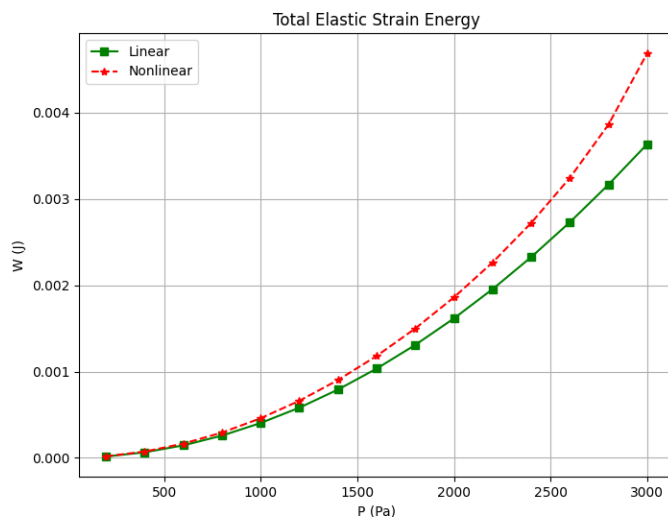
Σχήμα 3. Συνοριακές συνθήκες του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων.

2.1.4 Αριθμητικά αποτελέσματα

Παράδειγμα 1. Εδώ στο Υεoh μοντέλο η πίεση $P = 5000\text{Pa}$, το πάχος $h = 0.003$, πυκνότητα $\rho = 1050\text{kg/m}^3$ και οι παράμετροι υλικού $C_1 = 236830\text{ Pa}$, $C_2 = -13618\text{ Pa}$, $C_3 = 3823,5$ και στο γραμμικό μοντέλο Young' modulus $E = 100000\text{Pa}$, Poisson's ratio $\nu = 0.45$.



Σχήμα 4. Επιφάνεια για τις τάσεις von Mises (αξιολόγηση σημείου Gauss) για T1-P10-AAA, υπολογισμένη χρησιμοποιώντας α) το μοντέλο υλικού Yeoh, β) το γραμμικό μοντέλο.



Σχήμα 5. Συνολική ελαστική ενέργεια παραμόρφωσης για T1-P10-AAA, υπολογισμένη με χρήση του μοντέλου υλικού Yeoh με αυξήσεις πίεσης P από 200 έως 3000 με βήμα 200.

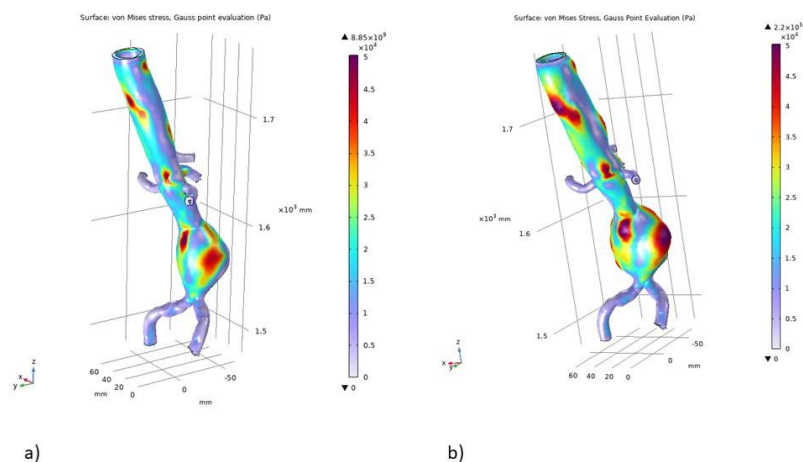
Πίνακας 1. Ισοδύναμη παραμορφωτική παραμόρφωση για T1-P10.

Type	Nonlinear [min, max]	Linear [min, max]
AAA-infrarenal-v2	0.00146, 0.08204	0.00953, 0.63774
ILT-v2	0.00000, 0.11790	0.00000, 1.49880
Lumen-infrarenal	0.00000, 0.10376	0.00600, 3.08337
Lumen-infrarenal-v2	0.00163, 0.36104	0.00600, 3.08337

Πίνακας 2. Αξονική παραμόρφωση για T1-P10.

Type	Nonlinear [min, max]	Linear [min, max]
AAA-infrarenal-v2	-0.04721, 0.02440	-0.59633, 0.22764
ILT-v2	-0.06090, 0.03959	-0.90449, 0.43383
Lumen-infrarenal	-0.03598, 0.07670	-0.70227, 1.27514
Lumen-infrarenal-v2	-0.15035, 0.15768	-2.39965, 2.01452

Παράδειγμα 2.



Σχήμα 5. Επιφάνεια για τις τάσεις von Mises (αξιολόγηση σημείου Gauss) για T1–P5– lumen_supr, υπολογισμένη χρησιμοποιώντας α) το μοντέλο υλικού YeoH, β) το γραμμικό μοντέλο.

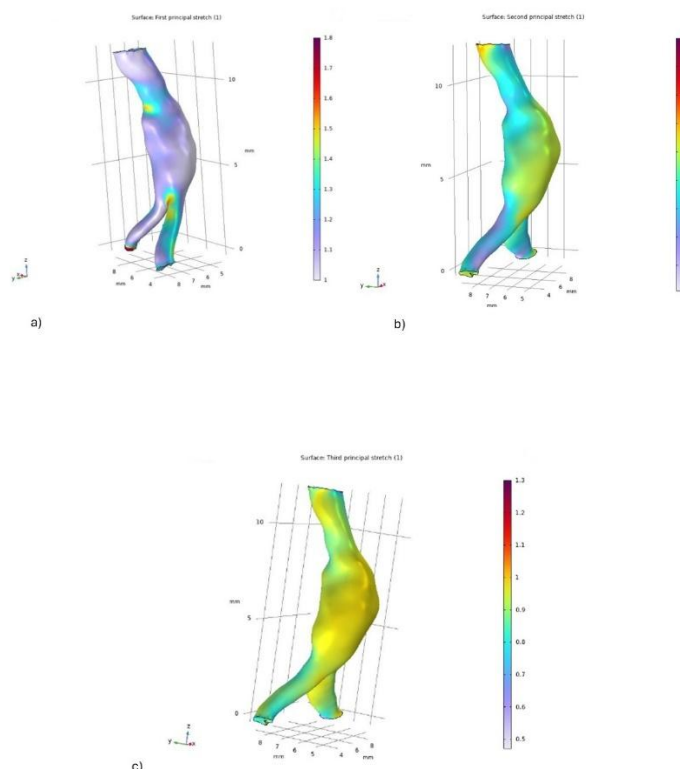
Πίνακας 3. Ισοδύναμη παραμορφωτική παραμόρφωση για T1–P5.

Type	Nonlinear [min, max]	Linear [min, max]
AAA–infrarenal–v2	0.00010, 0.07510	0.00005, 0.62678
ILT–v2	0.00000, 1.24444	0.00000, 2.69981
Lumen–infrarenal	0.00000, 0.04995	0.00000, 0.72847
Lumen–infrarenal–v2	0.00033, 0.04259	0.00000, 0.67057
Lumen–suprarenal	0.00036, 0.18388	0.00294, 2.19317

Πίνακας 4. Αξονική παραμόρφωση για T1–P5.

Type	Nonlinear [min, max]	Linear [min, max]
AAA–infrarenal–v2	–0.01590, 0.02857	–0.17656, 0.47895
ILT–v2	–0.12987, 0.16377	–0.79506, 0.95721
Lumen–infrarenal	–0.01210, 0.03519	–0.20513, 0.55812
Lumen–infrarenal–v2	–0.00891, 0.03689	–0.16791, 0.57494
Lumen–suprarenal	–0.03744, 0.04703	–0.55214, 0.65793

Σχήμα 7. Επιφάνεια για τις τάσεις Mises, αξιολόγηση σημείου Gauss (Pa), υπολογισμένη με χρήση a) HGO μοντέλο και b) Γραμμικό μοντέλο.



Σχήμα 8. Επιφάνεια για α) την πρώτη, β) τη δεύτερη και γ) την Τρίτη κύρια παραμόρφωση, υπολογισμένες με τη μέθοδο HGO ($c = 3\text{kPa}$, $k_2 = 2.8\text{kPa}$, $k_1 = 0.3\text{kPa}$.)

2.2 Υπολογιστική τεχνική για την δημιουργία του ψηφιακού διδύμου

Στην ενότητα αυτή περιγράφεται η μεθοδολογία που ακολουθείται για τη δημιουργία του ψηφιακού διδύμου. Περισσότερες λεπτομέρειες δίδονται στην περιγραφή των Πακέτων καθώς και στην αναφορά [8].

Για να χτίζουμε ένα νευρωνικό δίκτυο για την πρόβλεψη των τάσεων, παραμορφώσεων κ.λπ. στις αρτές πρέπει να εφαρμόσουμε μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων PLS. Η ιδέα είναι να θεωρήσουμε πρώτο το ένα δίκτυο σημείων πάνω στο παραμετροποιημένο μοντέλο της αρτής.

Εισαγωγή στο NN / PLS: Δx , Δy , Δz διανύσματα σε σημεία προτύπου

2.1.2 Μέθοδος μερικών ελαχίστων τετραγώνων (*Partial Least Square, PLS*)

Η μέθοδος χρησιμοποιείται μαζί με την παρεμβολή χρησιμοποιείται για να χτίζουμε νευρωνικό δίκτυο για την πρόβλεψη κυρία χαρακτηριστικά της ελαστικότητας.

PLS για την πρόβλεψη της τάσης von Mises στην αρτή,

Ορίζουμε το πρόβλημα

(x,y,z) γεωμετρία \longrightarrow $\sigma_{vM}(x, y, z)$

ΒΗΜΑ 1 — Δημιουργία κοινού πλέγματος αναφοράς

Όλες οι αορτές πρέπει να έχουν κοινή αντιστοιχία σε κάθε σημείο.

- Καταχωρίστε όλες τις τμηματοποιήσεις σε ένα πρότυπο αορτής (Template aorta):
- Μορφοποιήστε το πρότυπο πλέγματος σε κάθε ασθενή
- Χρησιμοποιήστε παραμετροποίηση επιφάνειας με βάση την κεντρική γραμμή

Aorta $i \Rightarrow \{(x_i^j, y_i^j, z_i^j)\}, j=1, \dots, M, i=1, \dots, N$ (M είναι ο αριθμός σημείων και N είναι ο αριθμός αορτών).

Όλες οι αορτές πρέπει να έχουν σημειακή αντιστοιχία, Ίσος αριθμός επιφανειακών κόμβων M, ίση σειρά κόμβων και ίση ανατομική σημασία.

ΒΗΜΑ 2 — Υπολογισμός της τάσης von Mises για κάθε αορτή για κάθε καταχωρημένη αορτή:

Εκτέλεση προσομοίωσης FE (ίδια BC, πίεση, μοντέλο υλικού — π.χ. HGO)

Εξαγωγή της τάσης von Mises σε κάθε κόμβο επιφάνειας:

$$\sigma_{vM}(x_i^j, y_i^j, z_i^j)$$

ΒΗΜΑ 3 — Δημιουργία του πίνακα εισόδου PLS X (γεωμετρία)

Για N αορτές, η καθεμία με M σημεία:

$$X = \begin{matrix} x_1^1 & y_1^1 & z_1^1 & \dots & x_M^1 & y_M^1 & z_M^1 \\ x_1^2 & y_1^2 & z_1^2 & \dots & x_M^2 & y_M^2 & z_M^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_1^N & y_1^N & z_1^N & \dots & x_M^N & y_M^N & z_M^N \end{matrix}$$

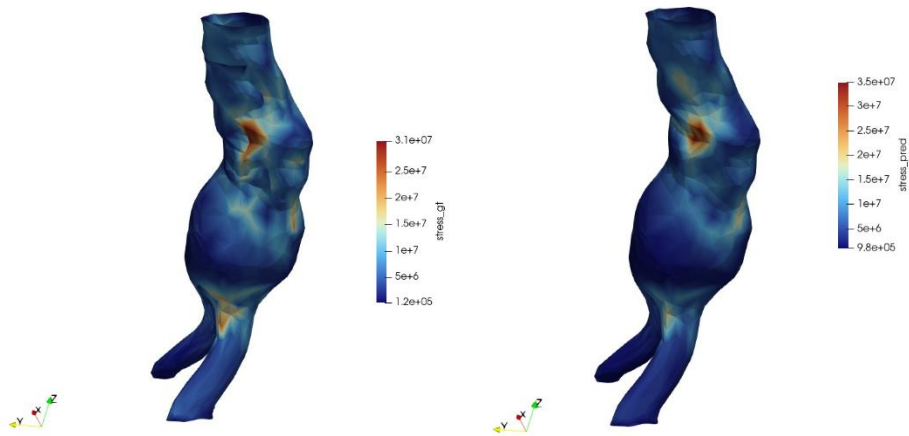
Σχήμα 1 (VP_0002). A) το 3D μοντέλο με τις πραγματικές τιμές stress, B) το μοντέλο που προκύπτει από τις τιμές που έχει προβλέψει το νευρωνικό μοντέλο.

ΒΗΜΑ 4 — Δημιουργία του πίνακα εξόδου Y (τάση von Mises)

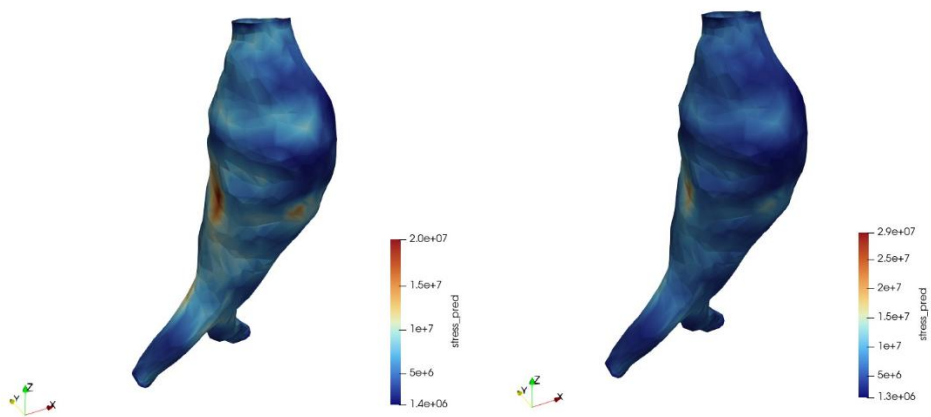
$$Y = \begin{matrix} \sigma_{vM,1}^1 & \sigma_{vM,2}^1 & \dots & \sigma_{vM,M}^1 \\ \sigma_{vM,1}^2 & \sigma_{vM,2}^2 & \dots & \sigma_{vM,M}^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sigma_{vM,1}^N & \sigma_{vM,2}^N & \dots & \sigma_{vM,M}^N \end{matrix}$$

Για πρόβλεψη χρειαζόμαστε Template αορτής από το οποίο παίρνουμε τα σημεία.

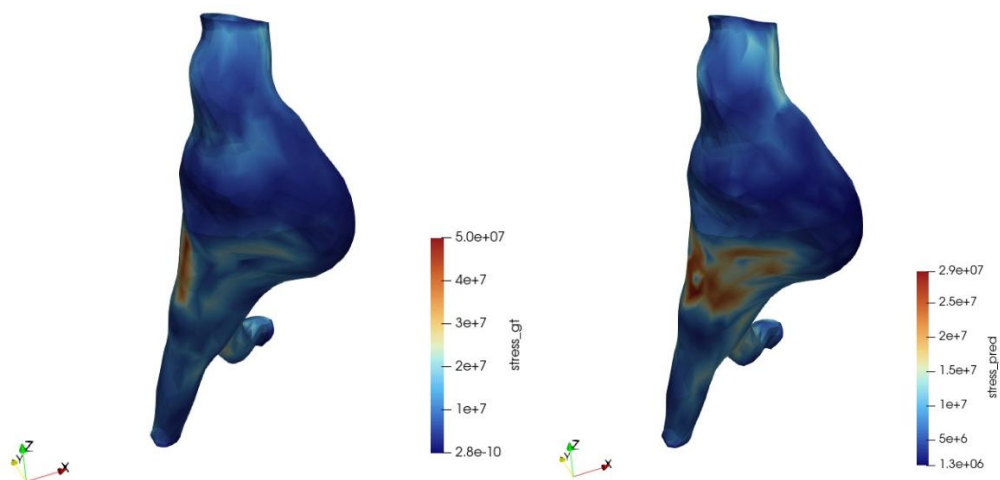
Στα σχήματα που ακολουθούν φαίνονται επιλεγμένες αορτές με ανευρύσματα, από τη βάση παραμετρικοποιημένων μοντέλων που δημιουργήθηκε, και σύγκριση των προβλέψεων ευθείας επίλυσης μέσω πεπερασμένων στοιχείων και πρόβλεψης πεδίου τάσεων μέσω του στοιχειώδους ψηφιακού διδύμου που περιγράφηκε. Σε μεταγενέστερο στάδιο είναι εφικτή η ενσωμάτωση περισσότερο εξελιγμένων αλγορίθμων πρόβλεψης με σκοπό την αύξηση της ακρίβειας.



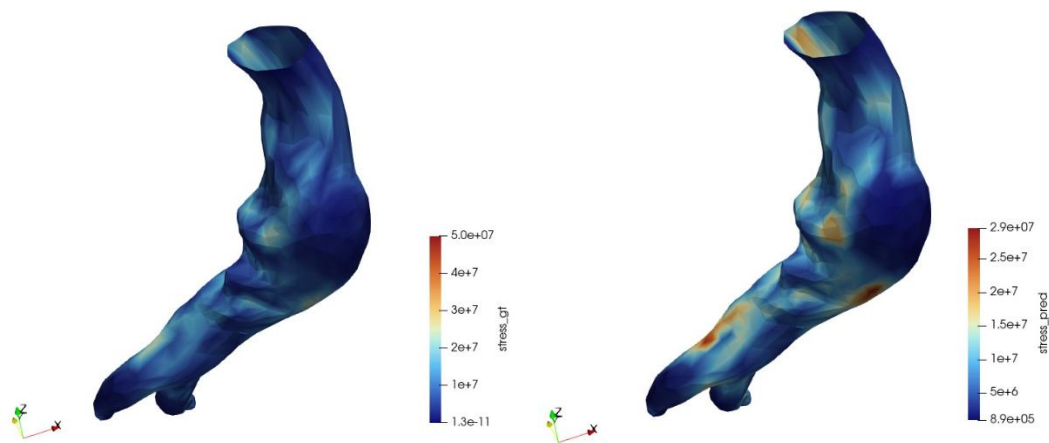
Σχήμα 2 (VP_0022). A) το 3D μοντέλο με τις πραγματικές τιμές stress, B) το μοντέλο που προκύπτει από τις τιμές που έχει προβλέψει το νευρωνικό μοντέλο.



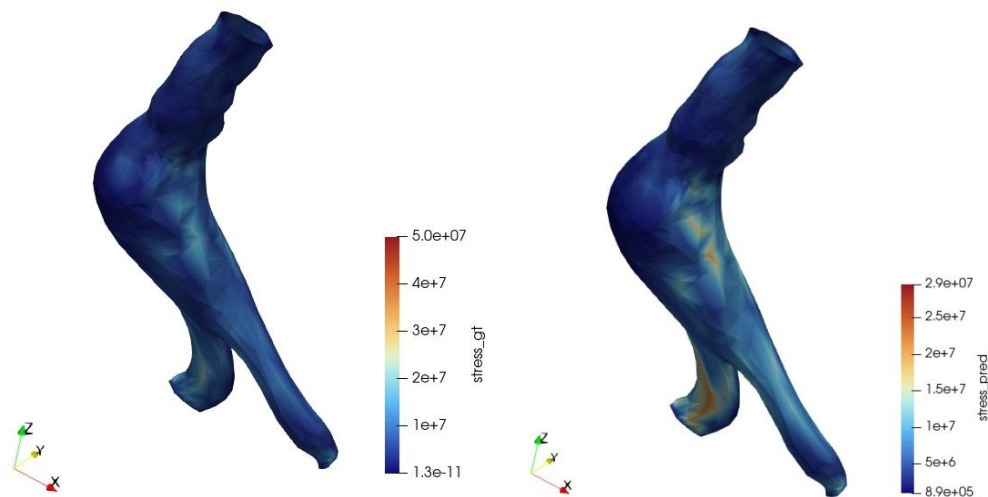
Σχήμα 3 (VP_0035). A) το 3D μοντέλο με τις πραγματικές τιμές stress, B) το μοντέλο που προκύπτει από τις τιμές που έχει προβλέψει το νευρωνικό μοντέλο.



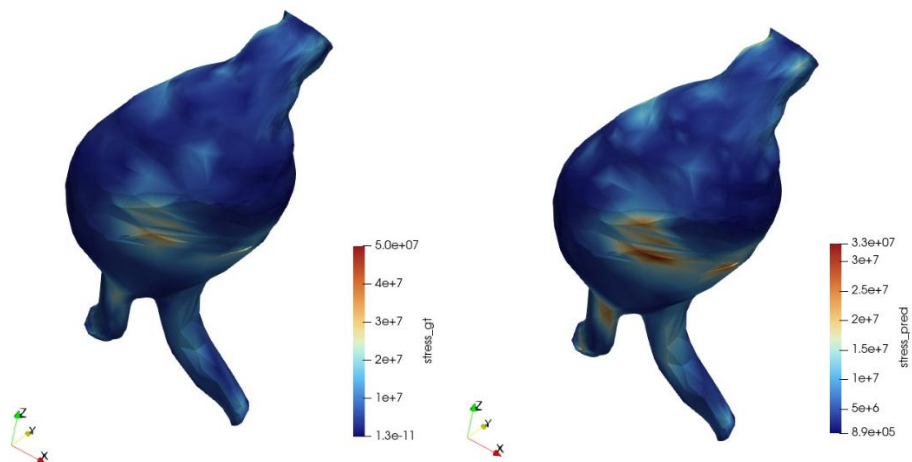
Σχήμα 4 (VP_0065). A) το 3D μοντέλο με τις πραγματικές τιμές stress, B) το μοντέλο που προκύπτει από τις τιμές που έχει προβλέψει το νευρωνικό μοντέλο.



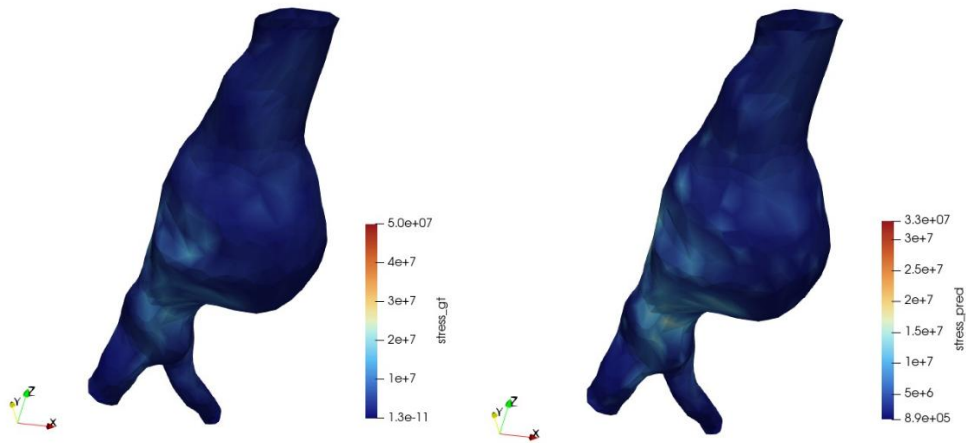
Σχήμα 5 (VP_0096). A) το 3D μοντέλο με τις πραγματικές τιμές stress, B) το μοντέλο που προκύπτει από τις τιμές που έχει προβλέψει το νευρωνικό μοντέλο.



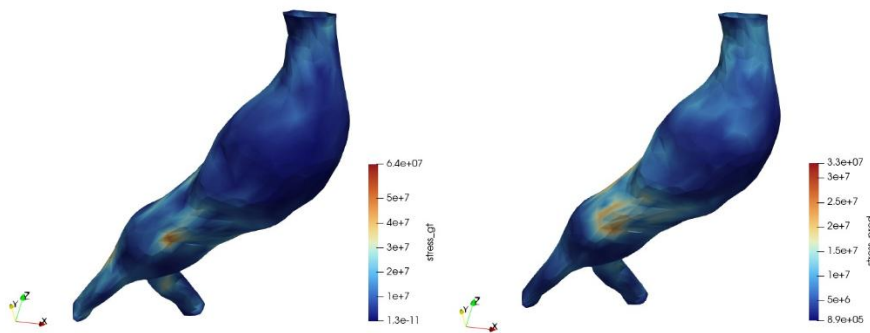
Σχήμα 6 (VP_0099). A) το 3D μοντέλο με τις πραγματικές τιμές stress, B) το μοντέλο που προκύπτει από τις τιμές που έχει προβλέψει το νευρωνικό μοντέλο.



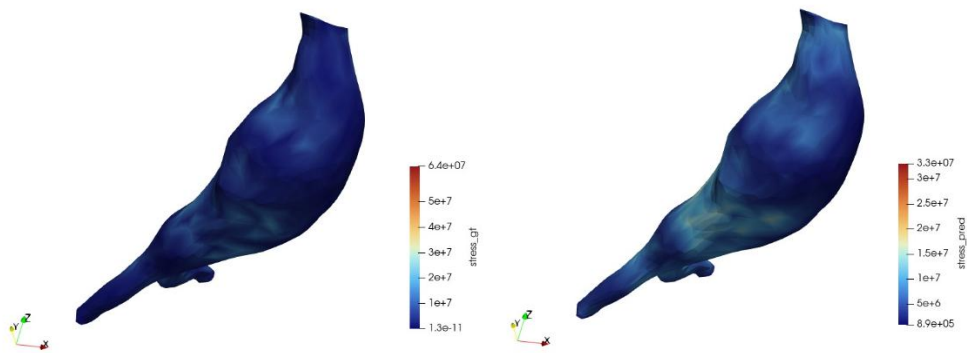
Σχήμα 7 (VP_0104). A) το 3D μοντέλο με τις πραγματικές τιμές stress, B) το μοντέλο που προκύπτει από τις τιμές που έχει προβλέψει το νευρωνικό μοντέλο.



Σχήμα 8 (VP_0123). A) το 3D μοντέλο με τις πραγματικές τιμές stress, B) το μοντέλο που προκύπτει από τις τιμές που έχει προβλέψει το νευρωνικό μοντέλο.



Σχήμα 9 (VP_0131). A) το 3D μοντέλο με τις πραγματικές τιμές stress, B) το μοντέλο που προκύπτει από τις τιμές που έχει προβλέψει το νευρωνικό μοντέλο.



Σχήμα 10 (VP_0162). A) το 3D μοντέλο με τις πραγματικές τιμές stress, B) το μοντέλο που προκύπτει από τις τιμές που έχει προβλέψει το νευρωνικό μοντέλο.

..

Βιβλιογραφία

- [1] Kyparissis, Konstantinos, Nikolaos Kladovasilakis, Maria-Styliani Daraki, Anastasios Raptis, Polyzois Tsantrizos, Konstantinos Moulakakis, John Kakisis, Christos Manopoulos, and Georgios E. Stavroulakis. "Numerical Evaluation of Abdominal Aortic Aneurysms Utilizing Finite Element Method." *Diagnostics* 15, no. 6 (2025): 697.
- [2] Mouratidou, Alik, Charalambos-Faidon Xydias, Nikolaos Kladovasilakis, and Georgios E. Stavroulakis. "FEM Modelling of Aorta Aneurysms in View of Virtual Sensor Development and Rupture Estimate." In *2025 IEEE Medical Measurements & Applications (MeMeA)*, pp. 1-6. IEEE, 2025.
- [3] Mouratidou, A., Kladovasilakis N., Manopoulos Ch., Raptis A. Kakisis j., Moulakakis K., Tsantrizos P., Drosopoulos G.A., Stavroulakis G.E., "Linear and nonlinear FEM modelling of aorta aneurysm", Presented at 1st Hellenictalian Conference on Computational Mechanics, Rhodes, 2025, extended version submitted to *Meccanica*.
- [4] Konstantakopoulos, Athanasios, Nikolaos Kladovasilakis, and Georgios E. Stavroulakis. "Development and Mechanical Evaluation of a Stent Graft for Endovascular Aneurysm Repair Using Finite Element Modeling." *Designs* 9, no. 5 (2025): 103.
- [5] Κωνσταντίνος Κυπαρίσσης, "Προσομοίωση και ανάλυση αορτών με ανεύρυσμα με χρήση μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων", Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, Ελλάδα, 2024 <https://dias.library.tuc.gr/handle/123456789/25730>
- [6] Σταμάτιος Μαυραγάνης, "Υπολογιστική προσομοίωση τάσεων και παραμορφώσεων σε τοιχώματα αορτής με σκοπό την εκτίμηση της επικινδυνότητας ανευρύσματος", Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, Ελλάδα, 2025 <https://dias.library.tuc.gr/handle/123456789/36635>
- [7] Χαράλαμπος-Φαίδων Ξυδιάς, "Μελέτη μη-γραμμικών μοντέλων ανευρυσματικών αορτών με χρήση μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων", Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, Ελλάδα, 2025 <https://dias.library.tuc.gr/handle/123456789/38236>
- [8] Νικόλαος Διαλεκτάκης, «Ψηφιακά δίδυμα αορτών με ανευρύσματα», Διπλωματική Εργασία, Σχολή ΗΜΜΥ, Πολυτεχνείο Κρήτης (κατατίθεται, 2026)