



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ**

**Μη παρεμβατική αγγειακή ελαστογραφία για το
χαρακτηρισμό της καρωτίδας**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΑΠΟΣΤΟΛΑΚΗ ΙΑΣΟΝΑ ΖΑΧΑΡΙΑ

Επιβλέπουσα : Κωνσταντίνα Νικήτα
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Νοέμβριος 2011



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

**Μη παρεμβατική αγγειακή ελαστογραφία για το
χαρακτηρισμό της καρωτίδας**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΑΠΟΣΤΟΛΑΚΗ ΙΑΣΟΝΑ ΖΑΧΑΡΙΑ

Επιβλέπουσα : Κωνσταντίνα Νικήτα
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 24^η Νοεμβρίου 2011

.....
Κωνσταντίνα Νικήτα
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

.....
Δημήτρης Κουτσούρης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Γιώργος Ματσόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Νοέμβριος 2011

.....
ΙΑΣΩΝ ΖΑΧΑΡΙΑΣ ΑΠΟΣΤΟΛΑΚΗΣ

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © 2011 *Ιάσων Ζαχαρίας Αποστολάκης*, 2011
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved

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

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

Περίληψη

Ο σκοπός της διπλωματικής εργασίας ήταν η ανάπτυξη μεθοδολογίας για την εξαγωγή ελαστογραφημάτων από ακολουθίες εικόνων υπερήχων Β-σάρωσης καθώς και ο έλεγχος και η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της. Η μεθοδολογία αυτή περιλαμβάνει την ανάλυση κίνησης των σημείων μιας επιλεγμένης περιοχής ενδιαφέροντος μεταξύ ζευγών εικόνων υπερήχων, τον υπολογισμό των αντίστοιχων μηχανικών καταπονήσεων και τελικά την απεικόνισή τους με κατάλληλο χρωματισμό του αντίστοιχου σημείου της εικόνας.

Η τεχνική που αναπτύχθηκε εφαρμόστηκε σε συνθετικές ακολουθίες εικόνων της καρωτίδας και ελέγχθηκε η επίδραση αυξανόμενων επιπέδων θορύβου στα αποτελέσματά της. Τελικά διαπιστώθηκε ότι, η αύξηση του θορύβου προκαλεί σημαντικές διακυμάνσεις στο χρωματισμό των περιοχών ενδιαφέροντος.

Εν συνεχεία, η παραπάνω τεχνική εφαρμόστηκε σε πραγματικές ακολουθίες εικόνων της καρωτίδας από υγιή άτομα. Συγκεκριμένα, υπολογίστηκαν ελαστογραφήματα μεταξύ ζευγών εικόνων σε διάρκεια ενός καρδιακού κύκλου. Η διαδικασία αυτή επαναλήφθηκε για 4 υγιή άτομα και με βάση τα ελαστογραφήματα που εξήχθησαν μελετήθηκε η καταπόνηση του κάτω τοιχώματος της καρωτίδας.

Επίσης, ελαστογραφήματα κατασκευάστηκαν και από πραγματικές ακολουθίες εικόνων από δύο ασθενείς με αθηρωμάτωση, εστιάζοντας στην αθηρωματική πλάκα και το περιβάλλον τοίχωμα. Με τη βοήθεια των ελαστογραφημάτων αυτών μελετήθηκε η μηχανική συμπεριφορά των αθηρωματικών πλακών κατά τη διάρκεια του καρδιακού κύκλου. Παράλληλα υπολογίστηκαν οι μέσες καταπονήσεις ανά σημείο της περιοχής ενδιαφέροντος για κάθε εξεταζόμενο κατά τη διάρκεια ενός καρδιακού κύκλου και συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα.

Η μεθοδολογία ανάπτυξης ελαστογραφημάτων μπορεί να αποτελέσει ένα συμπληρωματικό εργαλείο μελέτης των μηχανικών ιδιοτήτων των τοιχωμάτων της καρωτίδας. Επίσης, μπορεί να συμβάλει στον εντοπισμό και στην εξέταση των ελαστικών ιδιοτήτων και της μηχανικής συμπεριφοράς των αθηρωματικών πλακών καθώς και στην αξιολόγηση του κινδύνου που συνιστούν. Περαιτέρω εφαρμογή της μεθόδου σε υγιείς και ασθενείς εξεταζόμενους αναμένεται να παράσχει περισσότερα στοιχεία σχετικά με τη μηχανική συμπεριφορά των ιστών της καρωτίδας.

Λέξεις Κλειδιά: <<ελαστογραφία, ελαστογράφημα, καρωτίδα, μη παρεμβατική, υπέρηχοι, β-σάρωση, καταπόνηση>>

Abstract

The purpose of this thesis was the development of a methodology, in order to construct elastograms using B-mode ultrasound images and also to investigate its performance. This methodology consists of the motion analysis of points from a selected region of interest between pairs of ultrasound images, of the calculation of the corresponding mechanical strains and finally of their imaging, via appropriate coloring of the corresponding points of the image.

The methodology was applied to synthetic sequences of images of the carotid and the influence of increased levels of image noise was checked. Finally, it was found that increasing noise caused serious fluctuation to the coloring of the regions of interest

Then this methodology was applied to real sequences of images of the carotid artery from healthy subjects. Specifically elastograms were computed between pairs of images across a single cardiac cycle. This procedure was repeated for 4 healthy subjects and according to the resulting elastograms the movement of the lower arterial wall of the carotid was studied.

Moreover, elastograms were computed using real sequences of images of the carotid artery from patients with atherosclerosis, focusing on the atheromatic plaque and the surrounding arterial wall. With the aid of the resulting elastograms the mechanical properties of the atheromatic plaques were studied during a single cardiac circle. In addition to this, the average strains per point of the region of interest for every subject during a single cardiac circle were computed and subsequently they were compared to each other.

This methodology of constructing elastograms can become a useful supplementary tool for the study of the mechanical properties of the carotid artery. In addition to this, it can contribute to locating atheromatic plaques, studying their mechanical properties and also assessing their risk of rupture. Additional application of this method to healthy and pathological subjects can lead to a great deal of information about the mechanical properties of the carotid tissues.

Keywords: <<elastography, elastogram, carotid, noninvasive, ultrasound, B-mode, strain>>

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου προς την επιβλέπουσα καθηγήτρια της παρούσας διπλωματικής εργασίας κ. Κωνσταντίνα Νικήτα για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου με την ανάθεση ενός ιδιαίτερα ενδιαφέροντος θέματος ως πνευματικό επιστέγασμα της πενταετούς φοίτησής μου στο Ε.Μ.Π. καθώς και για την ευκαιρία που μου προσέφερε να ασχοληθώ με ένα τόσο ραγδαία αναπτυσσόμενο και ενδιαφέρον επιστημονικό πεδίο.

Επιπλέον, θα ήθελα ιδιαίτερα να ευχαριστήσω την ερευνήτρια Σπυρέττα Γολεμάτη, Λέκτορα Βιοϊατρικής Τεχνολογίας στην Ιατρική Σχολή του Πανεπιστημίου Αθηνών και σύμβουλό μου κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας για την υπομονή, τις παρατηρήσεις και τις συμβουλές της καθώς και για την πολύτιμη καθοδήγησή της. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Υποψήφια Διδάκτορα Αιμιλία Γαστουνιώτη για τη βοήθεια, το υλικό και τα τμήματα της εργασίας της στην ανάλυση της κίνησης του αρτηριακού τοιχώματος που μου προσέφερε.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την επιμονή και την υπομονή τους, την καθοδήγηση και την αμέριστη στήριξη που μου έχουν παράσχει σε όλους τους τομείς καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής μου. Κλείνοντας, ευχαριστώ τους φίλους μου για τη δημιουργικότητα και την αισιοδοξία που μου εμπνέουν με τη συντροφιά τους.

Αφιερώνεται στη μνήμη
της αγαπημένης μου
θείας Νατάσας

Πίνακας περιεχομένων

1	Εισαγωγή.....	22
1.1	Δομικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά της καρωτίδας.....	22
1.2	Αθηρωμάτωση.....	25
1.3	Απεικόνιση καρωτίδας με χρήση υπερήχων Β-σάρωσης.....	28
1.4	Ελαστογραφία και χαρακτηρισμός του αρτηριακού τοιχώματος από εικόνες υπερήχων – σύντομη επισκόπηση	32
1.5	Σκοπός της διπλωματικής εργασίας	37
2	Θεωρητικό Υπόβαθρο	38
2.1	Μονοδιάστατο μοντέλο	38
2.2	Ελαστογραφία βιολογικών ιστών σε μία διάσταση.....	41
2.3	Ελαστογραφία σε δύο διαστάσεις	43
3	Υλικό και Μέθοδοι	45
3.1	Συνθετικά δεδομένα	45
3.1.1	<i>Ακολουθίες συνθετικών εικόνων υπερήχων με τη χρήση πραγματικής εικόνας και διαφορετικών επιπέδων θορύβου.....</i>	<i>46</i>
3.1.2	<i>Ακολουθίες συνθετικών εικόνων με χρήση πραγματικής εικόνας και λογισμικού πακέτου FIELD II.....</i>	<i>50</i>
3.2	Πραγματικές εικόνες υπερήχων β-σάρωσης της καρωτίδας	52
3.3	Υλοποίηση ελαστογραφίας	54
3.3.1	<i>Επιλογή περιοχών ενδιαφέροντος</i>	<i>54</i>
3.3.2	<i>Ανάλυση κίνησης.....</i>	<i>55</i>
3.3.3	<i>Απεικόνιση ελαστικών ιδιοτήτων</i>	<i>58</i>
4	Αποτελέσματα	60
4.1	Στάδια και υπολογιστικό κόστος της κατασκευής ελαστογραφήματος	60
4.2	Ελαστογραφήματα από συνθετικές ακολουθίες εικόνων	62
4.3	Ελαστογραφήματα από πραγματικές ακολουθίες εικόνων υγιών ατόμων	67
4.4	Ελαστογραφήματα από πραγματική ακολουθία εικόνων ασθενή με αθηρωμάτωση στην καρωτίδα	76

4.5	Αριθμητικά αποτελέσματα	82
5	Συζήτηση - Συμπεράσματα.....	84
5.1	Γενικά σχόλια	84
5.2	Μελλοντικές προοπτικές	91
5.3	Συμπεράσματα.....	92
6	Βιβλιογραφία.....	93

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1 : Σχηματική αναπαράσταση της αορτής και των κλάδων της [Γασ09].....	23
Εικόνα 2 : Σχηματική αναπαράσταση μυϊκού τύπου αρτηρίας (αριστερά) και ελαστικού τύπου αρτηρίας (δεξιά) [Jun03].....	24
Εικόνα 3 : Καρωτίδα με αθηρωματική πλάκα.....	26
Εικόνα 4 : Λήψη εικόνων υπερήχων στην κοινή καρωτίδα	29
Εικόνα 5 : Απλός σαρωτής B-Mode.....	29
Εικόνα 6 : A) Ηλεκτρονική εστίαση με κατάλληλες καθυστερήσεις διέγερσης. B) Μετατροπέας γραμμικής συστοιχίας [Στο07].	30
Εικόνα 7 : (A) Παράδειγμα διαμήκους εικόνας B-σάρωσης της καρωτίδας και (B) Τμήματα αρτηριακού τοιχώματος σε εικόνα B-σάρωσης της καρωτίδας	31
Εικόνα 8 : Βασική αρχή λειτουργίας του Ελαστογραφήματος [deK03]	33
Εικόνα 9 : Μη παρεμβατικό ελαστογράφημα κατά τη διάρκεια της διαστολής της καρωτίδας και υπέρθεσή του σε εικόνα υπερήχων. (Η χρωματική του κλίμακα αποδίδει την καταπόνηση (strain) σε ποσοστιαίες μονάδες (%)) [Mau08].....	35
Εικόνα 10 : Μέση μηχανική καταπόνηση κατά τη διάρκεια 8 καρδιακών κύκλων για την περιοχή ενδιαφέροντος που φαίνεται στην Εικόνα 10 [Mau08]	36
Εικόνα 11 : Μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις ακτινικής καταπόνησης που υπολογίστηκαν στη χρονική διάρκεια 7 καρδιακών κύκλων μεταξύ του τέλους της διαστολής και της πλήρους συστολής [Sch07]	36
Εικόνα 12 : Παραμόρφωση ράβδου αρχικού μήκους L σε νέο μήκος L+x	39
Εικόνα 13 : Απλό μοντέλο βιολογικού ιστού όμοιων ελατηρίων α) πριν τη συμπίεση και β) μετά τη συμπίεση [Oph91].....	39
Εικόνα 14 : Γραφική παράσταση καταπόνησης συναρτήσει του βάθους για σύστημα με τρία όμοια ελατήρια συνδεδεμένα στη σειρά [Oph91]	40
Εικόνα 15 : Απλό μοντέλο βιολογικού ιστού με δύο όμοια και ένα ασυμπίεστο ελατήριο α) πριν τη συμπίεση β) μετά τη συμπίεση [Oph91].....	40
Εικόνα 16 : Γραφική παράσταση καταπόνησης συναρτήσει του βάθους για σύστημα με τρία ελατήρια διαφορετικών μηχανικών ιδιοτήτων στη σειρά [Oph91].....	41
Εικόνα 17 : Γραφική παράσταση του πλάτους των αντηχήσεων συναρτήσει του συνολικού χρόνου επιστροφής (ο οριζόντιος άξονας είναι κβαντισμένος σε διαστήματα των 20 nsec). Με συνεχόμενη γραμμή απεικονίζεται ο ιστός πριν τη συμπίεση και με διακεκομμένη ο ιστός κατά τη διάρκεια της συμπίεσης [Oph91].....	42
Εικόνα 18 : Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας υπολογισμού της μηχανικής καταπόνησης βιολογικού ιστού με τη βοήθεια κυματομορφών υπερήχων. [Oph02]	42

Εικόνα 19 : Παραμόρφωση αρχικού αντικειμένου διαστάσεων L1 και K1 σε διαστάσεις L2 και K2.....	43
Εικόνα 20 : Παράδειγμα κυματομορφής του μαθηματικού μοντέλου κίνησης στην ακτινική διεύθυνση για την κατασκευή συνθετικών εικόνων με χρήση πραγματικής εικόνας και διαφορετικών επιπέδων θορύβου	48
Εικόνα 21 : Παράδειγμα κυματομορφής του μαθηματικού μοντέλου κίνησης στη διαμήκη διεύθυνση για την κατασκευή συνθετικών εικόνων με χρήση πραγματικής εικόνας και διαφορετικών επιπέδων θορύβου	48
Εικόνα 22 : (Α)-(Β) Εικόνες συνθετικής ακολουθίας χωρίς θόρυβο με την εικόνα (Α) να αντιστοιχεί σε φάση διαστολής και την εικόνα (Β) σε φάση συστολής.....	49
Εικόνα 23 : (πάνω) Σημεία των οποίων η κίνηση παρουσιάζεται στο κάτω μέρος της εικόνας (κάτω) Η κίνηση τεσσάρων σημείων στην ακτινική και διαμήκη διεύθυνση σύμφωνα με το μαθηματικό μοντέλο που κατασκευάστηκε με χρήση πραγματικής εικόνας και διαφορετικών επιπέδων θορύβου.	50
Εικόνα 24 : Παραδείγματα εικόνων συνθετικής ακολουθίας που κατασκευάστηκε χρησιμοποιώντας το λογισμικό πακέτο Field II. Η εικόνα (Α) αντιστοιχεί στη φάση διαστολής και η εικόνα (Β) στη φάση συστολής	51
Εικόνα 25 : (πάνω) Σημεία των οποίων την κίνηση θα παρουσιάσουμε στο κάτω μέρος της εικόνας (κάτω) Η κίνηση τεσσάρων σημείων στην ακτινική και διαμήκη διεύθυνση σύμφωνα με το μαθηματικό μοντέλο που κατασκευάστηκε με χρήση πραγματικής εικόνας και του λογισμικού πακέτου Field II.....	52
Εικόνα 26 : Παραδείγματα εικόνων ακολουθίας υπερήχων β-σάρωσης της καρωτίδας. Η εικόνα (Α) αντιστοιχεί στη φάση διαστολής και η εικόνα (Β) στη φάση συστολής.....	53
Εικόνα 27 : Παραδείγματα εικόνων ακολουθίας υπερήχων β-σάρωσης της καρωτίδας με αθρομάτωση. Η εικόνα (Α) αντιστοιχεί στη φάση διαστολής και η εικόνα (Β) στη φάση συστολής.	54
Εικόνα 28 : Χειροκίνητη επιλογή της περιοχής ενδιαφέροντος με τη βοήθεια της συνάρτησης "roiopoly"	55
Εικόνα 29 : Διάγραμμα ροής αλγόριθμου πολυκλιμακμακωτής ταύτισης περιοχών βασισμένης στο φίλτρο Kalman [<i>Gas11</i>].....	56
Εικόνα 30: Σύστημα αξόνων στο οποίο δουλεύει ο αλγόριθμος εκτίμησης κίνησης [<i>Gas10</i>] 57	
Εικόνα 31 : Απομόνωση εικόνων που αντιστοιχούν σε έναν καρδιακό κύκλο. (Α) Σημείο που επιλέχθηκε και (Β) κυματομορφή ακτινικής θέσης του σημείου και απομόνωση ενός καρδιακού κύκλου.....	58
Εικόνα 32 : Σχηματική απεικόνιση του σταδίου επεξεργασίας δεδομένων κίνησης και εξαγωγής ελαστογραφήματος μεταξύ δύο εικόνων κατά τη διάρκεια της διαστολής της καρωτίδας.....	61

Εικόνα 33 : (A) Σημείο στο σύνορο αυλού - τοιχώματος που επιλέχθηκε (B) Ακτινική κίνηση του σημείου	63
Εικόνα 34 : Ελαστογραφήματα ακτινικής κίνησης (A)-(B) για την συνθετική ακολουθία εικόνων Synthetic μεταξύ των εικόνων 7-17 και 17-27 αντίστοιχα (Γ)-(Δ) για την συνθετική ακολουθία εικόνων Synthetic25 μεταξύ των εικόνων 7-17 και 17-27 αντίστοιχα και (E)-(ΣΤ) για την συνθετική ακολουθία εικόνων Synthetic15 μεταξύ των εικόνων 7-17 και 17-27 αντίστοιχα.....	64
Εικόνα 35 : Ελαστογραφήματα διαμήκους κίνησης (A)-(B) για την συνθετική ακολουθία εικόνων Synthetic μεταξύ των εικόνων 7-17 και 17-27 αντίστοιχα (Γ)-(Δ) για την συνθετική ακολουθία εικόνων Synthetic25 μεταξύ των εικόνων 7-17 και 17-27 αντίστοιχα και (E)-(ΣΤ) για την συνθετική ακολουθία εικόνων Synthetic15 μεταξύ των εικόνων 7-17 και 17-27 αντίστοιχα.....	65
Εικόνα 36 : Ελαστογραφήματα μεταξύ των εικόνων 7-17 και 17-27 (A)-(B) ακτινικής (Γ)-(Δ) διαμήκους κίνησης.	65
Εικόνα 37 : (A) Σημείο του οποίου η ακτινική κίνηση εξετάστηκε για όλη την ακολουθία εικόνων GPL (B) Ακτινική κίνηση του σημείου στο (A)	67
Εικόνα 38 : (A) Ακτινική και (B) διαμήκης θέση χαρακτηριστικού σημείου τοιχώματος για την ακολουθία εικόνων GPL. Έχουν σημειωθεί οι εικόνες μεταξύ των οποίων εξάγονται ελαστογραφήματα	68
Εικόνα 39 : Ελαστογραφήματα ακτινικής κίνησης για έναν καρδιακό κύκλο για την ακολουθία πραγματικών εικόνων GPL. Τα ελαστογραφήματα (a) έως (c) αντιστοιχούν σε συστολή της καρωτίδας και τα ελαστογραφήματα (d) έως (o) σε διαστολή.....	68
Εικόνα 40 : Ελαστογραφήματα διαμήκους κίνησης για έναν καρδιακό κύκλο για την ακολουθία πραγματικών εικόνων GPL. Τα ελαστογραφήματα (a) έως (c) αντιστοιχούν σε συστολή της καρωτίδας και τα ελαστογραφήματα (d) έως (o) σε διαστολή.....	69
Εικόνα 41 : (A) Σημείο του οποίου η ακτινική κίνηση εξετάστηκε για όλη την ακολουθία εικόνων MCL (B) Ακτινική κίνηση του σημείου στο (A)	69
Εικόνα 42 : (A) Ακτινική και (B) διαμήκης θέση χαρακτηριστικού σημείου τοιχώματος για την ακολουθία εικόνων MCL. Έχουν σημειωθεί οι εικόνες μεταξύ των οποίων εξάγονται ελαστογραφήματα	70
Εικόνα 43 : Ελαστογραφήματα ακτινικής κίνησης για έναν καρδιακό κύκλο για την ακολουθία πραγματικών εικόνων MCL. Τα ελαστογραφήματα (a) έως (c) αντιστοιχούν σε συστολή της καρωτίδας και τα ελαστογραφήματα (d) έως (k) σε διαστολή.....	70
Εικόνα 44 : Ελαστογραφήματα διαμήκους κίνησης για έναν καρδιακό κύκλο για την ακολουθία πραγματικών εικόνων MCL. Τα ελαστογραφήματα (a) έως (c) αντιστοιχούν σε συστολή της καρωτίδας και τα ελαστογραφήματα (d) έως (k) σε διαστολή.....	71

Εικόνα 45 : (A) Σημείο του οποίου η ακτινική κίνηση εξετάστηκε για όλη την ακολουθία εικόνων VVL (B) Ακτινική κίνηση του σημείου στο (A).....	71
Εικόνα 46 : (A) Ακτινική και (B) διαμήκης θέση χαρακτηριστικού σημείου τοιχώματος για την ακολουθία εικόνων VVL.....	72
Εικόνα 47 : Ελαστογραφήματα ακτινικής κίνησης για έναν καρδιακό κύκλο για την ακολουθία πραγματικών εικόνων VVL. Τα ελαστογραφήματα (a) έως (d) αντιστοιχούν σε συστολή της καρωτίδας και τα ελαστογραφήματα (e) έως (n) σε διαστολή.....	72
Εικόνα 48 : Ελαστογραφήματα διαμήκους κίνησης για έναν καρδιακό κύκλο για την ακολουθία πραγματικών εικόνων VVL. Τα ελαστογραφήματα (a) έως (d) αντιστοιχούν σε συστολή της καρωτίδας και τα ελαστογραφήματα (e) έως (n) σε διαστολή.....	73
Εικόνα 49 : (A) Σημείο του οποίου η ακτινική κίνηση εξετάστηκε για όλη την ακολουθία εικόνων IKL (B) Ακτινική κίνηση του σημείου στο (A)	73
Εικόνα 50 : (A) Ακτινική και (B) διαμήκης θέση χαρακτηριστικού σημείου τοιχώματος για την ακολουθία εικόνων IKL.....	74
Εικόνα 51 : Ελαστογραφήματα ακτινικής κίνησης για έναν καρδιακό κύκλο για την ακολουθία πραγματικών εικόνων IKL. Τα ελαστογραφήματα (a) έως (c) αντιστοιχούν σε συστολή της καρωτίδας και τα ελαστογραφήματα (d) έως (m) σε διαστολή.....	74
Εικόνα 52 : Ελαστογραφήματα διαμήκους κίνησης για έναν καρδιακό κύκλο για την ακολουθία πραγματικών εικόνων IKL. Τα ελαστογραφήματα (a) έως (c) αντιστοιχούν σε συστολή της καρωτίδας και τα ελαστογραφήματα (d) έως (m) σε διαστολή.....	75
Εικόνα 53 : Διαχωρισμός των ελαστογραφημάτων που αντιστοιχούν σε συστολή από αυτά που αντιστοιχούν σε διαστολή για κάθε ακολουθία εικόνων από υγιείς εξεταζόμενους.....	75
Εικόνα 54 : (A) Σημείο του οποίου η ακτινική κίνηση εξετάστηκε για όλη την ακολουθία εικόνων MH (B) Ακτινική κίνηση του σημείου στο (A).....	77
Εικόνα 55 : Ακτινική κίνηση χαρακτηριστικού σημείου στην οποία έχουν σημειωθεί οι εικόνες μεταξύ των οποίων εξάγονται ελαστογραφήματα	77
Εικόνα 56 : Ελαστογραφήματα ακτινικής κίνησης για έναν καρδιακό κύκλο για την ακολουθία πραγματικών εικόνων MH. Τα ελαστογραφήματα (a) έως (c) αντιστοιχούν σε συστολή της καρωτίδας και τα ελαστογραφήματα (d) έως (k) σε διαστολή. Το τελευταίο ελαστογράφημα (l) αντιστοιχεί σε συστολή από επόμενο καρδιακό κύκλο.	78
Εικόνα 57 : Ελαστογραφήματα διαμήκους κίνησης για έναν καρδιακό κύκλο για την ακολουθία πραγματικών εικόνων MH. Τα ελαστογραφήματα (a) έως (c) αντιστοιχούν σε συστολή της καρωτίδας και τα ελαστογραφήματα (d) έως (k) σε διαστολή. Το τελευταίο ελαστογράφημα (l) αντιστοιχεί σε συστολή από επόμενο καρδιακό κύκλο.	78
Εικόνα 58 : (A) Σημείο του οποίου η ακτινική κίνηση εξετάστηκε για όλη την ακολουθία εικόνων MCR (B) Ακτινική κίνηση του σημείου στο (A)	79

Εικόνα 59 : (A) Ακτινική και (B) διαμήκης θέση χαρακτηριστικού σημείου τοιχώματος για την ακολουθία εικόνων MCR.....	80
Εικόνα 60 : Ελαστογραφήματα ακτινικής κίνησης για έναν καρδιακό κύκλο για την ακολουθία πραγματικών εικόνων MCR. Τα ελαστογραφήματα (a) έως (h) αντιστοιχούν σε συστολή της καρωτίδας και τα ελαστογραφήματα (i) έως (l) σε διαστολή	80
Εικόνα 61 : Ελαστογραφήματα ακτινικής κίνησης για έναν καρδιακό κύκλο για την ακολουθία πραγματικών εικόνων MH. Τα ελαστογραφήματα (a) έως (h) αντιστοιχούν σε συστολή της καρωτίδας και τα ελαστογραφήματα (i) έως (l) σε διαστολή	81
Εικόνα 62 : Διαχωρισμός των ελαστογραφήματων που αντιστοιχούν σε συστολή από αυτά που αντιστοιχούν σε διαστολή για κάθε ακολουθία εικόνων από ασθενείς εξεταζόμενους	82
Εικόνα 63 : Μέση τιμή ακτινικής καταπόνησης ανά σημείο της περιοχής ενδιαφέροντος για κάθε έναν από τους υγιείς εξεταζόμενους. Στον οριζόντιο άξονα βρίσκονται τα αντίστοιχα ελαστογραφήματα	82
Εικόνα 64 : Μέση τιμή ακτινικής καταπόνησης ανά σημείο της περιοχής ενδιαφέροντος για κάθε έναν από τους ασθενείς εξεταζόμενους. Στον οριζόντιο άξονα βρίσκονται τα αντίστοιχα ελαστογραφήματα	83
Εικόνα 65 : Μέσος όρος που λήφθηκε για την καταπόνηση ανά σημείο της περιοχής ενδιαφέροντος σε όλους τους υγιείς εξεταζόμενους και σε όλους τους ασθενείς σε κάθε ελαστογράφημα	83
Εικόνα 66 : Διαδοχικά ελαστογραφήματα ακτινικής κίνησης στη διάρκεια ενός καρδιακού κύκλου όπου μία χρονική περίοδος διαστολής (a) έως (p) (λευκοί χρωματισμοί) ακολουθείται από μία περίοδο συστολής (q) έως (x) (σκούροι χρωματισμοί) [Mau08].....	86
Εικόνα 67 : Ελαστογραφήματα ακτινικής κίνησης της ασυμπτωματικής αθηρωματικής πλάκας (A) κατά τη συστολή και (B) κατά τη συστολή του αγγείου με σημειωμένα τα σημεία όπου παρατηρείται μεγαλύτερη μηχανική καταπόνηση κατά μέτρο.....	88
Εικόνα 68 : Ελαστογραφήματα διαμήκους κίνησης της ασυμπτωματικής αθηρωματικής πλάκας (A) κατά τη συστολή και (B) κατά τη συστολή του αγγείου με σημειωμένα τα σημεία όπου παρατηρείται μεγαλύτερη μηχανική καταπόνηση κατά μέτρο.....	89
Εικόνα 69 : Ελαστογράφημα καρωτίδας με αθηρωματική πλάκα, η οποία έχει σημειωθεί στο σχήμα [Rib05].....	90
Εικόνα 70 : Μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις ακτινικής καταπόνησης που υπολογίστηκαν στη χρονική διάρκεια 4 καρδιακών κύκλων σε όλη τη διάρκεια ενός καρδιακού κύκλου [Sch07].....	91

1

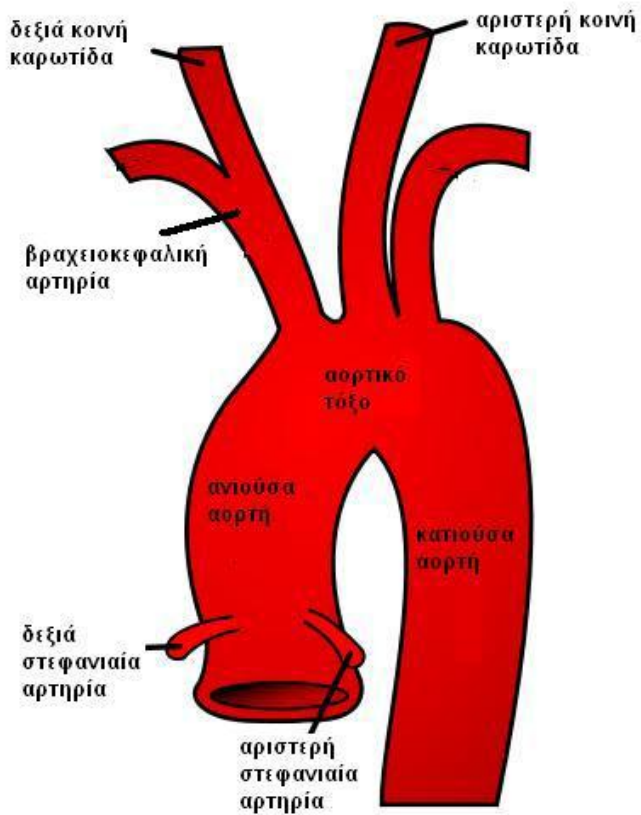
Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στην αρτηριακή φυσιολογία και ανατομία και συγκεκριμένα στα χαρακτηριστικά και τις λειτουργίες της καρωτίδας. Επίσης, εξετάζεται μια σοβαρή αρτηριακή πάθηση, η αθηρωμάτωση. Επιπλέον, γίνεται αναφορά στις απεικονιστικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται με τη βοήθεια υπερήχων β-σάρωσης για να επιτευχθεί η εξέτασή της με μη παρεμβατικό τρόπο. Σε όλα τα παραπάνω εστιάζουμε στις μηχανικές ιδιότητες του αρτηριακού τοιχώματος, ώστε να γίνει καλύτερα κατανοητή η μέθοδος της ελαστογραφίας. Στο τέλος αυτού του κεφαλαίου παρατίθενται ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας καθώς και τα προβλήματα που καλείται να επιλύσει.

1.1 Δομικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά της καρωτίδας

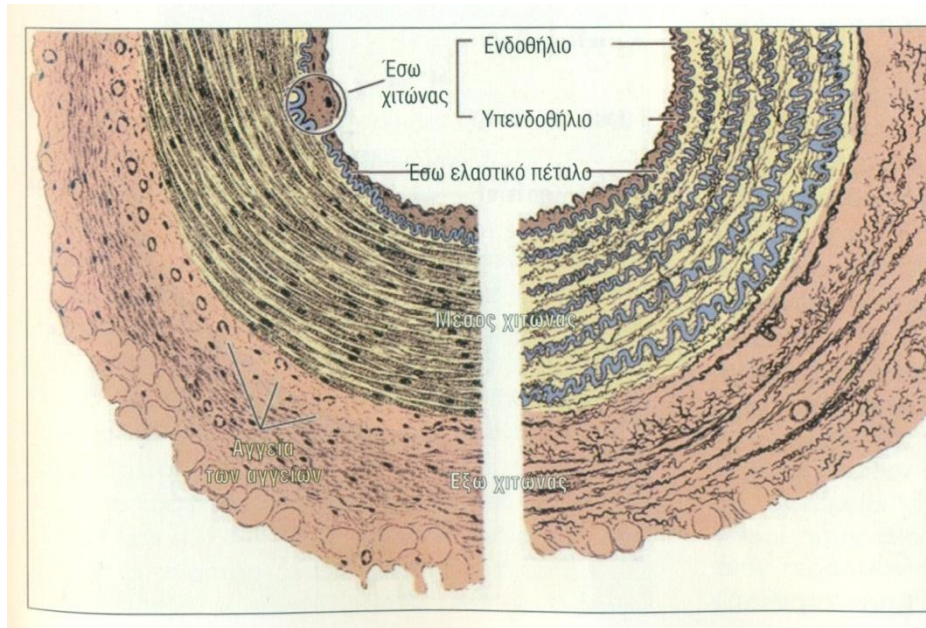
Η καρωτίδα είναι ένας κύριος κλάδος της αορτής και διοχετεύει οξυγονωμένο αίμα σε όλους τους ιστούς και τα όργανα της κεφαλής καθώς και στον τράχηλο. Υπάρχουν δύο κοινές καρωτίδες μία για την αριστερή πλευρά και μία για την δεξιά πλευρά του κεφαλιού. Ακολουθούν περίπου παρόμοιες διαδρομές με μόνη διαφορά το σημείο εκκίνησής τους. Ειδικότερα, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα (*Εικόνα 1*) παρατηρούμε πως η δεξιά κοινή καρωτίδα ξεκινά από το λαιμό στη βραχειοκεφαλική αρτηρία, ενώ η αριστερή κοινή καρωτίδα ξεκινά από το αορτικό τόξο στη θωρακική περιοχή [Γασ09]. Κάθε μία από τις καρωτίδες διαχωρίζεται σε δύο τμήματα, στο ύψος περίπου του λαιμού. Διαχωρίζεται στην έσω (εσωτερική) καρωτίδα και την έξω (εξωτερική) καρωτίδα. Η έσω καρωτίδα τροφοδοτεί

με οξυγονωμένο αίμα τον εγκέφαλο, τα μάτια, τα αυτιά και το εξωτερικό τμήμα της μύτης. Η εξωτερική καρωτίδα τροφοδοτεί τους ιστούς που δε βρίσκονται στο εσωτερικό του κρανίου.



Εικόνα 1 : Σχηματική αναπαράσταση της αορτής και των κλάδων της [Γασ09]

Οι κοινές καρωτίδες ανήκουν σε μία κατηγορία αρτηριών οι οποίες ονομάζονται ελαστικές [Hum03]. Γενικά οι ελαστικές αρτηρίες χαρακτηρίζονται από τη μεγαλύτερη διάμετρό τους καθώς και από το γεγονός ότι βρίσκονται πιο κοντά στην καρδιά. Σε κάθε περίπτωση, ανεξαρτήτως τύπου, όλα τα αιμοφόρα αγγεία με διάμετρο πάνω από ένα ορισμένο όριο διαθέτουν από κοινού ένα αριθμό δομικών χαρακτηριστικών και ένα γενικό σχέδιο κατασκευής [Jun03]. Μία σχηματική αναπαράσταση του κυτταρικού τοιχώματος δίδεται στην *Εικόνα 2*.



Εικόνα 2 : Σχηματική αναπαράσταση μυϊκού τύπου αρτηρίας (αριστερά) και ελαστικού τύπου αρτηρίας (δεξιά) [Jun03]

Το τοίχωμα των αρτηριών αποτελείται από τρία σαφώς καθορισμένα μεταξύ τους ομόκεντρα στρώματα, τα οποία είναι τα παρακάτω:

1. **Έσω Χιτώνας:** Ο έσω χιτώνας σχηματίζεται από μια στιβάδα ενδοθηλιακών κυττάρων, τα οποία είναι επίπεδα και επιμηκυμένα προς την κατεύθυνση ροής του αίματος, με εξαίρεση τις περιοχές κοντά σε διακλαδώσεις, όπου η ροή του αίματος είναι σύνθετη και το σχήμα των κυττάρων συνήθως πολυγωνικό [Hum03]. Η στιβάδα αυτή ενδοθηλιακών κυττάρων επικάθεται στο βασικό υμένα, κάτω από τον οποίο αναγνωρίζεται μια υποενδοθηλιακή στιβάδα χαλαρού συνδετικού ιστού που περιέχει λίγα λεία μυϊκά κύτταρα. Στις αρτηρίες ο έσω χιτώνας χωρίζεται από το μέσο χιτώνα με ένα έσω ελαστικό έλασμα, που αποτελεί το εξώτατο όριο του έσω χιτώνα. Αυτό το έλασμα, το οποίο αποτελείται από ελαστίνη, έχει θυρίδες που επιτρέπουν τη διάχυση ουσιών για τη διατροφή κυττάρων βαθιά στο κυτταρικό τοίχωμα [Jun03]. Τέλος στα νεαρά άτομα με υγιές τοίχωμα καρωτίδας ο έσω χιτώνας είναι πολύ λεπτός, αλλά με την πάροδο του χρόνου το πάχος του αυξάνεται και γίνεται πιο άκαμπτος με αποτέλεσμα η συνεισφορά του στη μηχανική συμπεριφορά του τοιχώματος να είναι πιο σημαντική.
2. **Μέσος Χιτώνας:** Ο μέσος χιτώνας μιας ελαστικού τύπου αρτηρίας όπως η κοινή καρωτίδα αποτελείται από στιβάδες λείων μυϊκών ινών, μεταξύ των οποίων παρεμβάλλονται ελαστικά ελάσματα. Αυτά τα ελαστικά ελάσματα είναι παρόμοια με το έσω ελαστικό έλασμα και επιτρέπουν την ακτινική διοχέτευση μεταβολιτών μέσα στο τοίχωμα, την επικοινωνία μεταξύ των κυττάρων και βοηθούν στην διατήρηση της τρισδιάστατης συνοχής του κυτταρικού τοιχώματος [Hum03].

3. Έξω Χιτώνας: Ο έξω χιτώνας αποτελείται κυρίως από κολλαγόνο και ελαστικές ίνες. Το κολλαγόνο στον έξω χιτώνα είναι τύπου 1. Ο έξω χιτώνας βαθμιαία συνδέεται με το συνδετικό ιστό του οργάνου, διαμέσου του οποίου πορεύεται το αγγείο [Jun03]. Αν και το συγκεκριμένο τμήμα του τοιχώματος αποτελεί μόνο το 10% του αρτηριακού τοιχώματος στις ελαστικές αρτηρίες θεωρείται ότι εμποδίζει την υπερδιεύρυνση της αρτηρίας [Hum03]. Δηλαδή, ο κολλαγονούχος έξω χιτώνας λειτουργεί σαν μία προστατευτική θήκη για την αρτηρία, παρόμοια με το επικάρδιο της καρδιάς.

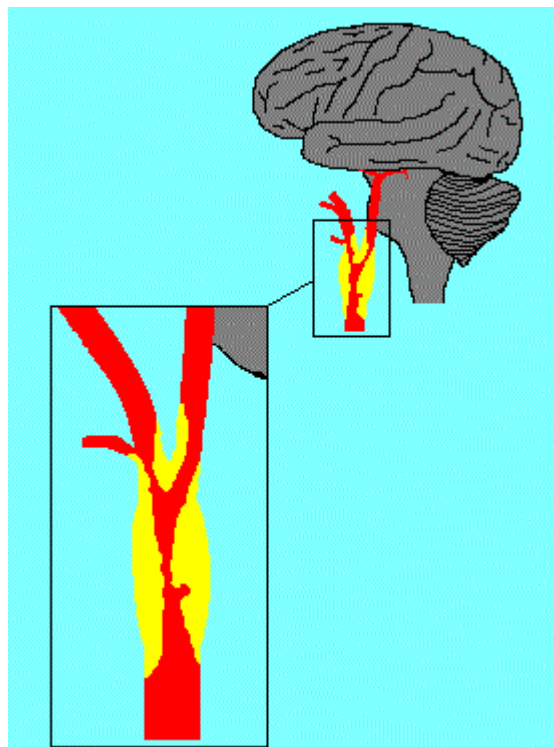
Στο κυκλοφορικό σύστημα τα τοιχώματα των αρτηριών βρίσκονται σε διαρκή κίνηση λόγω της πίεσης και της ροής του αίματος καθώς και λόγω της πρόσδεσης στους περιβάλλοντες ιστούς. [Gol07]. Λόγω των παραπάνω, το τοίχωμα των αρτηριών παραμορφώνεται σε τρεις διευθύνσεις: ακτινική, διαμήκη και περιφερική.

Πιο συγκεκριμένα, η καρδιά λειτουργεί ως μία παλμική αντλία, η οποία εγχέει αίμα στην κυκλοφορία. Αυτό συμβαίνει μόνο κατά τη φάση στην οποία βρίσκεται σε συστολή που διαρκεί το 1/3 του καρδιακού κύκλου. Συνεπώς, αν και η σύσπαση της καρδιάς γενικά οδηγεί την κυκλοφορία του αίματος προς τα εμπρός, κάποια ποσότητα αίματος αποθηκεύεται στις «μεγάλες» αρτηρίες, οι οποίες διευρύνονται λόγω της υψηλής πίεσης που δέχονται [Hum03]. Καθώς λοιπόν, η πίεση αυξάνεται, εξαπλώνεται προς όλες τις κατευθύνσεις στο αρτηριακό τοίχωμα. Τότε έχουμε συμπίεση στην ακτινική διεύθυνση, η οποία ενισχύεται καθώς ο έξω χιτώνας σταματά την υπέρ-διεύρυνση των εσωτερικών στρωμάτων του τοιχώματος. Με αυτήν τη συμπίεση σε ακτινική διεύθυνση επιτυγχάνεται ένας δεύτερος παλμός πίεσης, ο οποίος υποβοηθά την κυκλοφορία του αίματος και σταθεροποιεί τη ροή του [Hum03]. Οι τάσεις που εφαρμόζονται στην διαμήκη και την περιφερική διεύθυνση είναι γενικά τάσεις εφελκυσμού και οδηγούν στην επιμήκυνση του αγγείου [Gol07]. Επιπλέον, εξαιτίας της ροής του αίματος και της τριβής που προκαλείται μπορούμε να έχουμε τάσεις οι οποίες δρουν εφαπτομενικά προς το αρτηριακό τοίχωμα. Το μέτρο τους γενικά είναι συνάρτηση της τοπικής γεωμετρίας του αγγείου, της τοπικής ταχύτητας της ροής του αίματος καθώς και του ιξώδους του, το οποίο συνδέεται σε μεγάλο βαθμό με τον αιματοκρίτη. Επίσης, οι περιβάλλοντες ιστοί κατά τη μετακίνησή τους πιέζουν το αρτηριακό τοίχωμα και συνεισφέρουν στην παραμόρφωσή του [Γασ09].

1.2 Αθηρωμάτωση

Η Αθηρωμάτωση ή Αθηροσκλήρωση είναι μία πολύ σοβαρή νόσος των αρτηριών, η οποία χαρακτηρίζεται από την εστιασμένη συγκέντρωση λιπιδίων, σύνθετων υδατανθράκων, ερυθρών αιμοσφαιρίων, και ινωδών ιστών, με αποτέλεσμα το σχηματισμό αθηρωματικής

πλάκας στο τοίχωμα των αρτηριών [Mau07]. Η σταδιακή αυτή συσσώρευση εμφανίζεται κυρίως σε ευπαθείς περιοχές των βασικών αρτηριών και αυξάνει το πάχος του αρτηριακού τοιχώματος καθώς δημιουργούνται νέα μυϊκά κύτταρα μέσα σε αυτές τις λιπαρές αποθήκες. Οι βλάβες αυτές παρατηρούνται αρχικά στον έσω χιτώνα και στη συνέχεια επεκτείνονται στα υπόλοιπα στρώματα του αγγείου [Jun03]. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη στένωση των αρτηριών και την παρεμπόδιση της κυκλοφορίας του αίματος. Επίσης, στην επιφάνεια των παραπάνω επικαθίσεων μπορεί να συγκεντρωθούν αιμοπετάλια και να αποτελέσουν τη βάση για τη δημιουργία θρόμβων. Ένας μεγάλος θρόμβος μπορεί να μπλοκάρει τη ροή αίματος προς ένα όργανο, με αποτέλεσμα το όργανο αυτό να πάσχει από έλλειψη οξυγόνου. Ειδικά στην περίπτωση της καρωτίδας αντιλαμβανόμαστε πόσο σοβαρή είναι αυτή η επίπτωση διότι με τη στένωσή της παρεμποδίζεται η σωστή οξυγόνωση του εγκεφάλου. Επιπλέον, αξίζει να σημειώσουμε ότι η αθηρωμάτωση είναι η κύρια αιτία καρδιακής προσβολής, εγκεφαλικού και κακής κυκλοφορίας του αίματος στα κάτω άκρα [Ame99]. Γενικά η ασθένεια αυτή γίνεται περισσότερο αισθητή με την πάροδο της ηλικίας και είναι πιο κοινή στους άνδρες. Επιπλέον έχει παρατηρηθεί πως μερικές φορές παρουσιάζεται σε μέλη της ίδιας οικογένειας. Ως κύριες αιτίες παρουσιάζονται το κάπνισμα, η υψηλή σε λιπαρά διαίτα, η έλλειψη άσκησης και το υπερβολικό βάρος [Ame99]. Στο παρακάτω σχήμα (Εικόνα 3) έχουμε μία σχηματική αναπαράσταση καρωτίδας με αθηρωμάτωση.



Εικόνα 3 : Καρωτίδα με αθηρωματική πλάκα

Σύμφωνα με παλαιότερες έρευνες έχει διατυπωθεί η άποψη ότι η εμφάνιση αθηρωμάτωσης ευνοείται σε περιοχές του αρτηριακού δένδρου όπου παρατηρούνται υψηλές διαμητικές τάσεις, δηλαδή σε σημεία όπου παρατηρείται διαχωρισμός της ροής του αίματος σε δύο η περισσότερες ροές. Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιου σημείου αποτελεί το σημείο διαχωρισμού της καρωτίδας [Thu95]. Ωστόσο σε κάποια πιο σύγχρονη μελέτη [Car09] τονίζεται ότι υπάρχουν αντικρουόμενες απόψεις σχετικά με το θέμα αυτό, με κάποιες να υποστηρίζουν ότι η ανάπτυξη υψηλών τάσεων ευνοεί την εμφάνιση αθηρωμάτωσης και κάποιες άλλες να υποστηρίζουν ότι η αθηρωμάτωση ευνοείται σε περιοχές με χαμηλή διαμητική τάση.

Επίσης, μία άλλη διχογνωμία παρατηρείται στο θέμα σχετικά με το εάν η αθηρωμάτωση αυξάνει ή μειώνει την ελαστικότητα του αρτηριακού τοιχώματος [Hay03]. Σε γενικές γραμμές, η συσσώρευση λιπιδίων και η ασβεστοποίηση θεωρείται ότι μαλακώνουν και σκληραίνουν αντίστοιχα το αρτηριακό τοίχωμα. Συνεπώς ο συνδυασμός των παραπάνω επιδράσεων οδηγεί σε αντιφατικά αποτελέσματα που εντείνουν τη διαφωνία. Ωστόσο ύστερα από πιο ενδελεχείς έρευνες πάνω στο ζήτημα [Hay03] παρατηρήθηκε ότι η εξέλιξη της αθηρωμάτωσης αρχικά επιφέρει πάχυνση του τοιχώματος και στη συνέχεια οδηγεί στη σκλήρυνση του. Μάλιστα στα πιο προχωρημένα στάδια αθηρωμάτωσης η σκληρότητα του τοιχώματος είναι αυξημένη σημαντικά λόγω της ασβεστοποίησης και της υπερτροφίας του τοιχώματος. Συνεπώς, με βάση τα παραπάνω γίνεται αντιληπτός ο αυξημένος κίνδυνος ρήξης της αρτηρίας με αθηρωμάτωση.

Ένας επιπλέον κίνδυνος που υπάρχει και εντείνεται καθώς μεγεθύνεται η αθηρωματική πλάκα στην καρωτίδα είναι να υποστεί ρήξη λόγω των τάσεων που εφαρμόζονται σε αυτήν και να απελευθερώσει μικρότερα τμήματα χοληστερίνης και θρόμβους. Αυτά ακολουθούν την πορεία του αίματος προς τον εγκέφαλο και φράσσουν μικρότερες αρτηρίες με αποτέλεσμα να προκαλέσουν ισχαιμικό εγκεφαλικό επεισόδιο [Gas09]. Οι μηχανισμοί που προκαλούν αυτή τη ρήξη των αθηρωματικών πλακών δεν έχουν κατανοηθεί πλήρως [Gol00], [Mea99]. Ωστόσο, έχει προταθεί ότι η μηχανική καταπόνηση που προκαλείται στις πλάκες λόγω της κίνησης του αρτηριακού τοιχώματος μπορεί να οδηγήσει σε μικρές ρωγμές και ρήξεις. [Woo89], [Fal92] Άλλος ένας παράγοντας που μπορεί να οδηγήσει στη ρήξη της πλάκας είναι η σχετική κίνηση μεταξύ της πλάκας και του αρτηριακού τοιχώματος [Woo89]. Συνεπώς, σχετική κίνηση μεταξύ διαφορετικών τμημάτων της πλάκας μπορεί να αποτελεί δείγμα αστάθειας της πλάκας αυξάνοντας τον κίνδυνο εγκεφαλικού επεισοδίου.

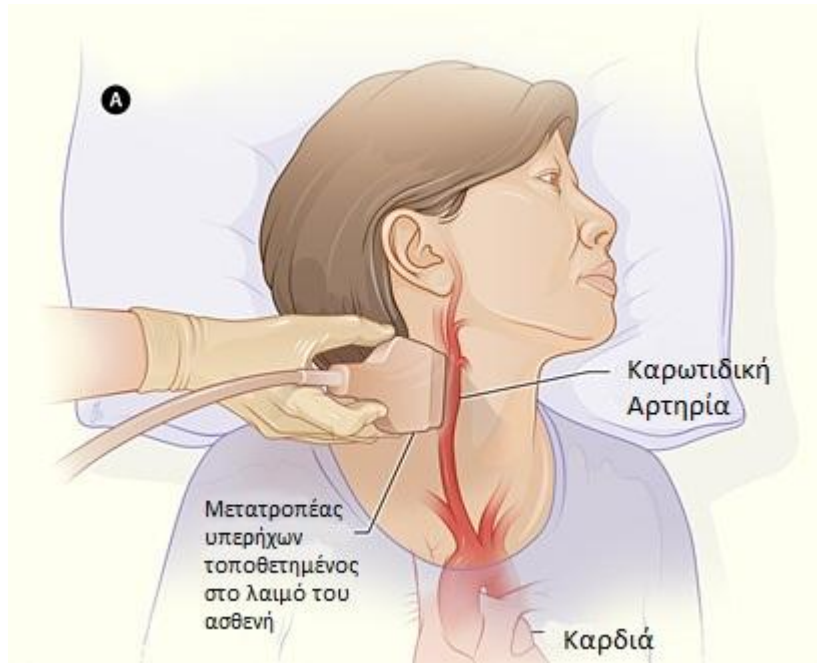
Η αθηρωμάτωση στην καρωτίδα δε γίνεται αντιληπτή στο πρώιμο στάδιό της. Συμπτώματα εμφανίζονται όταν αρχίζει να παρεμποδίζεται η ροή οξυγόνου προς τον εγκέφαλο. Δυστυχώς στην πλειοψηφία των περιπτώσεων το πρώτο δείγμα της αθηρωμάτωσης είναι ένα εγκεφαλικό επεισόδιο.

Για την αντιμετώπιση της αθηρωμάτωσης εκτός βέβαια από την πρόληψη με σωστή διατροφή και υγιεινότερο τρόπο ζωής, υπάρχει και το ενδεχόμενο χειρουργική επέμβασης. Σε αυτήν την περίπτωση πραγματοποιείται η λεγόμενη ενδαρτηρεκτομή με την οποία αφαιρούνται οι αθηρωματικές πλάκες. Γενικά υπάρχουν στοιχεία πως η επέμβαση αυτή μειώνει την πιθανότητα εμφάνισης εγκεφαλικού επεισοδίου [Bar98]. Συγκεκριμένα έχει δειχθεί ότι σε περιπτώσεις συμπτωματικών αθηρωματικών πλακών που μείωναν τη διάμετρο του αγγείου κατά περισσότερο από 70% η αφαίρεσή τους μείωσε τον κίνδυνο εγκεφαλικού επεισοδίου κατά 17% για τα επόμενα 2 χρόνια [Nor91]. Σε περιπτώσεις ασυμπτωματικών αθηρωματικών πλακών που μείωναν τη διάμετρο του αγγείου κατά περισσότερο από 60%, η αφαίρεσή τους επίσης μείωσε τον κίνδυνο εγκεφαλικού επεισοδίου για 5 χρόνια [Exe95]. Ωστόσο, αξίζει να αναφέρουμε ότι ένας μεγάλος αριθμός ασθενών χειρουργείται χωρίς να έχει σοβαρό πρόβλημα και αυτό διότι το κριτήριο με βάση το οποίο θα επιλεγεί το ενδεχόμενο της χειρουργικής παρέμβασης είναι για δεδομένο ασθενή ο βαθμός στένωσης και τα κλινικά συμπτώματα με αποτέλεσμα να παραγνωρίζεται το γεγονός ότι ακόμα και μια μικρή στένωση μπορεί να προκαλέσει συμπτώματα στον ασθενή [Pol98]. Συνεπώς, χρειάζεται προσεκτικός σχεδιασμός με πρόσθετα κριτήρια για να ελεγχθεί κατά πόσο ένας ασθενής πρέπει να υποβληθεί στην εν λόγω επέμβαση.

1.3 Απεικόνιση καρωτίδας με χρήση υπερήχων Β-σάρωσης

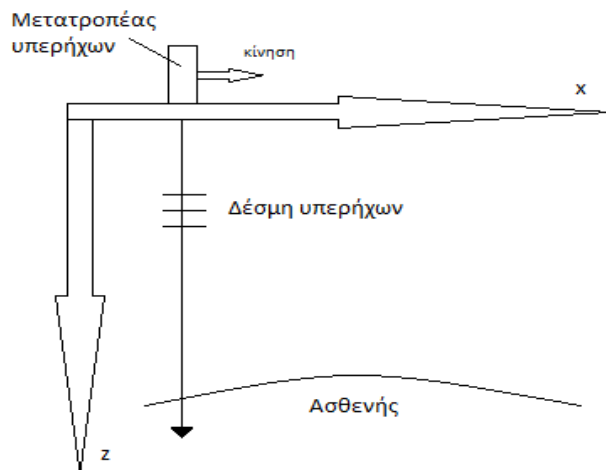
Οι υπέρηχοι χρησιμοποιούνται στην ιατρική κυρίως στον τομέα της διάγνωσης και της θεραπείας ασθενειών. Η διάγνωση με τη βοήθεια υπερήχων επιτυγχάνεται με τη μέτρηση διαφόρων χαρακτηριστικών των ανακλώμενων ή των διερχόμενων ηχητικών κυμάτων. Η παραγωγή και η ανίχνευση των υπερήχων στηρίζεται στο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, δηλαδή στη μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική και αντίστροφα από ειδικούς κρυστάλλους [Kou04].

Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται σε ένα όργανο, το οποίο καλείται μετατροπέας υπερήχων και το οποίο φέρνουμε σε επαφή με το λαιμό του ασθενούς όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Εικόνα 4). Αυτό όμως αφού όμως τοποθετηθεί πρώτα ένα κατάλληλο υλικό (gel ή coupling fluid) το οποίο αποτρέπει τον αέρα να παρεμβληθεί μεταξύ του μετατροπέα και του δέρματος.



Εικόνα 4 : Λήψη εικόνων υπερήχων στην κοινή καρωτίδα

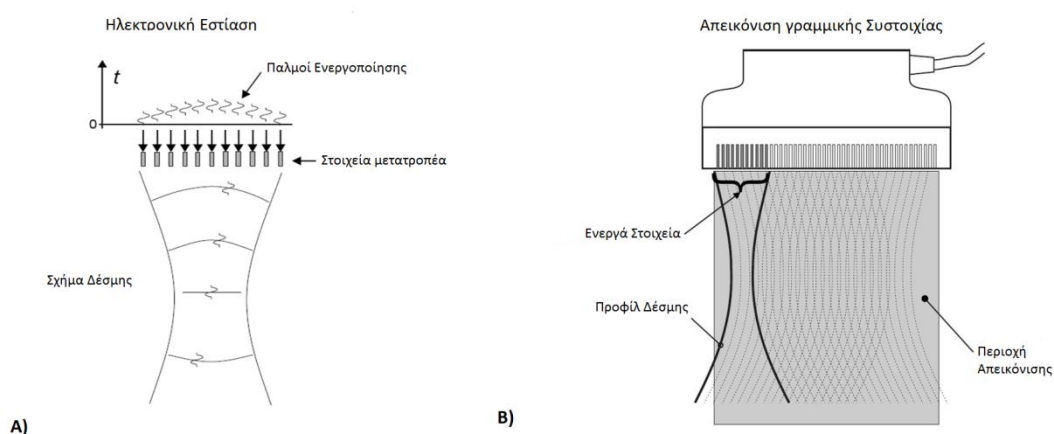
Ειδικά στην εργασία αυτή θα στηριχθούμε σε εικόνες υπερήχων Β-σάρωσης (B-Mode). Η τεχνική αυτή βασίζεται στην εστίαση της δέσμης υπερήχων του μετατροπέα σε ένα επίπεδο προκειμένου να έχουμε σάρωση μίας τομής του σώματος. Όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα (Εικόνα 5) ο μετατροπέας κινείται στον άξονα X και η δέσμη κατευθύνεται προς τον άξονα Z τέμνοντας τον ιστό του ασθενή.



Εικόνα 5 : Απλός σαρωτής B-Mode

Αν και στα πρώτα ιατρικά απεικονιστικά μηχανήματα η παραπάνω απλή τεχνική ήταν διαδεδομένη, σήμερα πλέον χρησιμοποιούνται περισσότεροι από ένας μετατροπείς οργανωμένοι σε γραμμικές, κυρτές ή φασικές συστοιχίες [Pri06]. Ο παραπάνω διαχωρισμός έχει γίνει με βάση το πώς είναι στοιχισμένοι οι μετατροπείς στο σαρωτή καθώς και με βάση

τον τρόπο με τον οποίο επιτυγχάνεται η εστίαση. Οι εικόνες της καρωτίδας στις οποίες θα εργαστούμε έχουν αποκτηθεί με τη βοήθεια γραμμικού μετατροπέα. Ο γραμμικός μετατροπέας έχει τα στοιχεία του διατεταγμένα σε ευθεία γραμμή μιμούμενος με αυτόν τον τρόπο τη γραμμική μετατόπιση ενός στοιχείου μετατροπέα χωρίς να χρειαστεί να κινείται. Στη σύγχρονη ιατρική απεικόνιση χρησιμοποιούνται μετατροπείς με τουλάχιστον 128 στοιχεία. Στους μετατροπείς αυτούς για να επιτύχουμε εισχώρηση σε μεγαλύτερο βάθος καθώς και καλύτερη ανάλυση [Tan11] ακολουθείται η εξής τεχνική: κάθε φορά εκπέμπει υπερήχους μόνο μια ομάδα στοιχείων (των 32 ή περισσότερων στοιχείων) ενώ αφουγκράζονται και λαμβάνουν όλα τα στοιχεία. Η ομάδα αυτή των στοιχείων μετατροπέα που εκπέμπει μετατοπίζεται σειριακά πάνω στη γραμμική συστοιχία προκειμένου να έχουμε μια τομή. Για την επίτευξη καλύτερης εστίασης εφαρμόζουμε κατάλληλες καθυστερήσεις στη διέγερση των στοιχείων (Εικόνα 6A). Έτσι σχηματίζεται αρχικά μια κοίλη δέσμη υπερήχων η οποία όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 6B) μεταφέρεται σειριακά στα επόμενα στοιχεία.

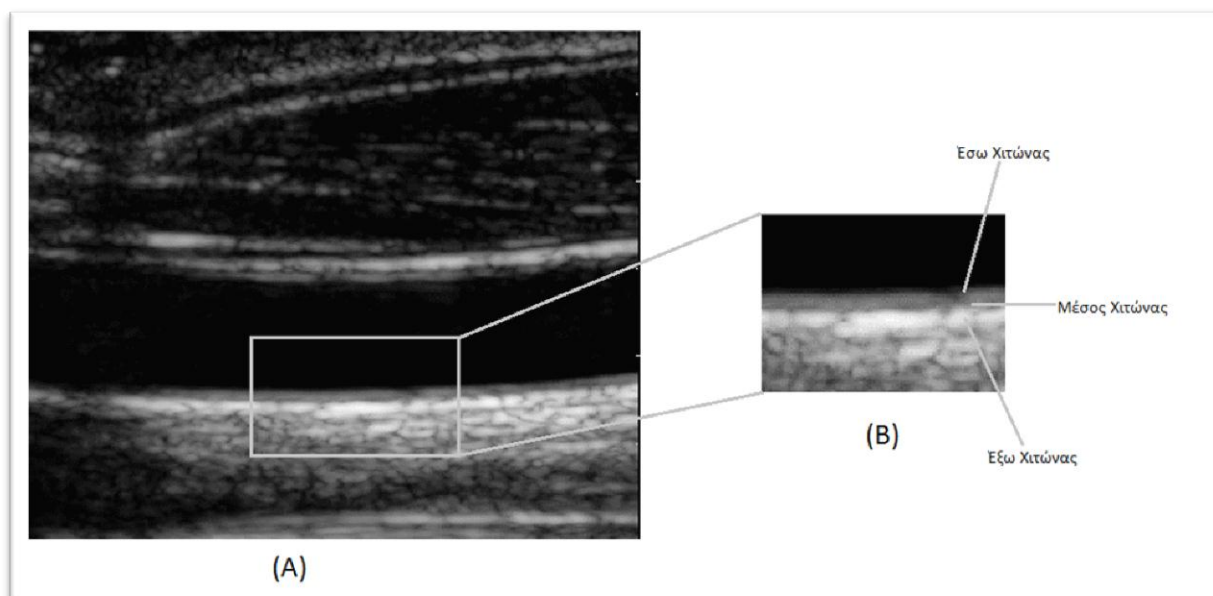


Εικόνα 6 : A) Ηλεκτρονική εστίαση με κατάλληλες καθυστερήσεις διέγερσης. B) Μετατροπέας γραμμικής συστοιχίας [Στο07].

Η λειτουργία του μετατροπέα βασίζεται στο γεγονός ότι οι υπέρηχοι κατευθύνονται προς το σώμα του ασθενούς και κάθε φορά που συναντούν δομές διαφορετικής ακουστικής εμπέδησης, ανακλώνται μερικώς και στη συνέχεια οι ανακλασθείσες δέσμες ανιχνεύονται από το μετατροπέα. Η μέτρηση της χρονικής διαφοράς της εκπομπής του παλμού και της ανίχνευσης της ανακλασθείσας δέσμης προσδιορίζει το βάθος της δομής που συνάντησε ο παλμός. Τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά της ανακλασθείσας δέσμης (πλάτος, φάση) παρέχουν δεδομένα για τον τύπο της ανακλαστικής επιφάνειας. Στα πλαίσια, λοιπόν, της τεχνικής της Β-σάρωσης το πλάτος μιας αντήχησης αντιπροσωπεύεται από ένα σημείο ανάλογης φωτεινότητας (Brightness), το οποίο βρίσκεται στην αντίστοιχη γεωμετρική του θέση με αυτή

πάνω στην τομή του σώματος [Κου04]. Γενικά η μέθοδος αυτή βοηθά στην ανίχνευση διαφόρων ασθενειών και αποτελεί τη συνηθέστερη επιλογή παρουσίασης.

Στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 7) έχουμε τη διαμήκη σάρωση της καρωτίδας ενός υγιούς ατόμου με τεχνική Β-σάρωσης. Αν εστιάσουμε καλύτερα στο τοίχωμα της καρωτίδας θα μπορούσαμε να διακρίνουμε τα τμήματα του τοιχώματος.



Εικόνα 7 : (Α) Παράδειγμα διαμήκους εικόνας Β-σάρωσης της καρωτίδας και (Β) Τμήματα αρτηριακού τοιχώματος σε εικόνα Β-σάρωσης της καρωτίδας

Η χρήση υπερήχων για απεικονιστικούς σκοπούς παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα. Καταρχάς τα αντίστοιχα απεικονιστικά μηχανήματα είναι σχετικά φθηνά, δεν απαιτούν ειδική προετοιμασία του χώρου μέσα στον οποίο θα χρησιμοποιηθούν και μπορούν να μεταφερθούν εύκολα. Επίσης, θεωρείται ότι κύτταρα τα οποία ακτινοβολούνται με υπέρηχους επιζούν χωρίς βλάβη ή διαφοροποίηση γι' αυτό και η χρήση τους χαρακτηρίζεται ως ακίνδυνη [Κου04]. Τέλος, η διαδικασία σάρωσης είναι γρήγορη και ανώδυνη για τον ασθενή ενώ οι παρεχόμενες πληροφορίες είναι υψηλής διαγνωστικής αξίας.

Ωστόσο, από την άλλη πλευρά, η χρήση υπερήχων συνοδεύεται και από κάποια μειονεκτήματα. Ένα από αυτά είναι η σκίαση, η οποία οφείλεται στους διαφορετικούς συντελεστές εξασθένησης των υπερήχων στις διάφορες ανατομικές δομές και τα όργανα που συναντούν. Επίσης, ένα άλλο θεμελιώδες πρόβλημα της απεικονιστικής τεχνικής με υπέρηχους είναι ο θόρυβος τύπου speckle, ο οποίος λειτουργεί περιοριστικά στην ποιότητα της εικόνας [Tan11]. Τέλος, ένα άλλο πρόβλημα είναι τα διάφορα σφάλματα γεωμετρικής φύσης που μπορούν να οδηγήσουν στην αλλοιωμένη απεικόνιση κάποιων οργάνων ή και στην απεικόνισή τους σε λάθος θέση. Τα σφάλματα αυτά οφείλονται στη διάθλαση της δέσμης υπερήχων.

Η απεικόνιση της καρωτίδας με υπερήχους αποτελεί μία απεικονιστική τεχνική που χρησιμοποιείται πλέον ευρέως για τη διάγνωση της αθηροσκλήρωσης [Gol07]. Πιο συγκεκριμένα επιτρέπει τη μη παρεμβατική αξιολόγηση του βαθμού στένωσης καθώς και της μορφολογίας της πλάκας. Ωστόσο, τα στοιχεία που μπορούμε να εξάγουμε από τις απεικονίσεις αυτές είναι περιορισμένα λόγω της μη ύπαρξης συστηματικής μεθόδου αναζήτησης από ανθρώπους, του θορύβου και της ύπαρξης σύνθετων ασθενειών που απαιτούν ένα μεγάλο αριθμό εικόνων και πλήθος ιατρικών πληροφοριών. Ωστόσο, μέσω της ανάλυσης με τη χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών και κατάλληλου λογισμικού επεξεργασίας εικόνας μπορεί να αποδειχτεί πολύ χρήσιμο σαν ένα επικουρικό εργαλείο στην ανίχνευση βλαβών, την εκτίμηση της σοβαρότητας της ασθένειας καθώς και στη λήψη σχετικών αποφάσεων.

Παλαιότερες εργασίες σχετικές με την ανάλυση και επεξεργασία εικόνων υπερήχων Β-σάρωσης περιλαμβάνουν αυτόματη κατάτμηση του αρτηριακού αυλού [Mao00], ανάλυση υφής [Tsi10] καθώς και ανάλυση της κίνησης του αρτηριακού τοιχώματος [Gol07]. Οι παραπάνω υπολογιστικές τεχνικές επιτυγχάνουν την ανάλυση εικόνων υπερήχων για εξαγωγή περισσότερων πληροφοριών, ενισχύοντας έτσι την ερμηνεία τους και συνεισφέροντας στην αντικειμενική διάγνωση αγγειακών παθήσεων. Ιδιαίτερης αξίας σε αυτήν την κατεύθυνση είναι η εκτίμηση της ελαστικότητας ιστών του σώματος, μέσω ανάλυσης κίνησης ή και της ελαστογραφίας. Ελαστογραφία είναι μία μέθοδος απεικόνισης του μέτρου της ελαστικότητας και της μηχανικής καταπόνησης των μαλακών βιολογικών ιστών [Oph91].

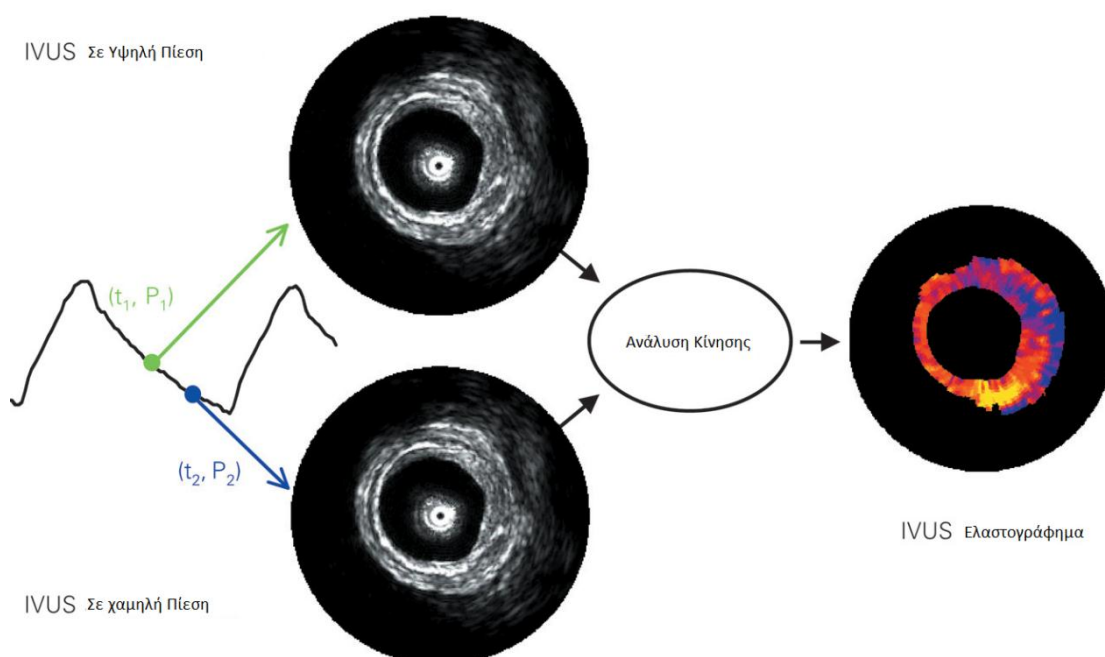
1.4 Ελαστογραφία και χαρακτηρισμός του αρτηριακού

τοιχώματος από εικόνες υπερήχων – σύντομη επισκόπηση

Στις αρχές της δεκαετίας του 90 εισήχθη η τεχνική της ελαστογραφίας [Oph91] η οποία ορίζεται ως η απεικόνιση της ελαστικότητας βιολογικών ιστών. Κύριος σκοπός της ήταν να λειτουργήσει σαν συμπλήρωμα των εικόνων υπερήχων Β-σάρωσης, προκειμένου να βοηθήσει στην ανίχνευση σκληρών περιοχών στο στήθος [Gar97], [Ces97] καθώς και στην έρευνα καρκινωμάτων στην περιοχή του προστάτη [Lor99], [Pes00]. Η ελαστογραφία απαιτεί ο υπό εξέταση ιστός να συμπιεστεί, είτε από κάποιον εξωγενή παράγοντα (πχ. απευθείας άσκηση πίεσης στον ιστό) είτε από κάποιον ενδογενή παράγοντα (πχ. καρδιακό παλμό, πίεση του αίματος). Στη συνέχεια, η βασική της ιδέα είναι να υπολογιστεί η μετατόπιση μεταξύ ζευγών εικόνων πριν και μετά τη συμπίεση και να αποτυπώσει με τη βοήθεια χρωματικού χάρτη (colormap) την κίνηση κάθε σημείου ενδιαφέροντος πάνω στην αρχική εικόνα του βιολογικού ιστού. Σε αυτήν την κατεύθυνση χρησιμοποιούνται τεχνικές ετεροσυσχέτισης, ώστε να υπολογιστεί η μηχανική καταπόνηση που υφίστανται οι υπό εξέταση ιστοί.

Η ελαστογραφία έχει βρει σημαντική εφαρμογή και στο χαρακτηρισμό αθηρωματικών πλακών αρτηριακών τοιχωμάτων για παράδειγμα έχει χρησιμοποιηθεί για το χαρακτηρισμό του τοιχώματος της στεφανιαίας αρτηρίας [deK03] [Sch03] καθώς και του τοιχώματος της καρωτίδας. [Mau07], [Mau04], [Mau08].

Στην πρώτη περίπτωση που προηγείται και χρονικά, δηλαδή στην εξέταση της στεφανιαίας αρτηρίας, η ελαστογραφία χρησιμοποιείται κυρίως με παρεμβατικό τρόπο (με χρήση καθετήρα) και ήταν γνωστή ως παρεμβατική ενδοαγγειακή ελαστογραφία (intravascular ultrasound elastography (IVUSE) ή endovascular elastography (EVE)). Σε αυτήν την περίπτωση η συμπίεση μπορούσε να επιτευχθεί ασκώντας δύναμη μέσα από την κοιλότητα της αρτηρίας. Τέτοια δύναμη μπορούσε να ασκηθεί είτε απλά από τον καρδιακό παλμό είτε από ένα μπαλόνι αγγειοπλαστικής. Έτσι, μέσω της παρεμβατικής ελαστογραφίας αναπτύχθηκε ένα συμπληρωματικό εργαλείο, το οποίο βοηθά στην εκτίμηση βλαβών σε προεγχειρητικό στάδιο καθώς και στο σχεδιασμό ενδοαγγειακής θεραπείας. Η γενική μέθοδος περιλαμβάνει την επιλογή ενός ζεύγους εικόνων (frames) υπερήχων της στεφανιαίας αρτηρίας σε διαφορετικά χρονικά σημεία του καρδιακού κύκλου και την αξιοποίηση αλγόριθμων εκτίμησης κίνησης σε δύο διαστάσεις, με τη βοήθεια των οποίων μετρώνται η πλευρική και η αξονική καταπόνηση (strain) του αγγειακού τοιχώματος [deK02] για όλα τα σημεία της περιοχής ενδιαφέροντος που έχει οριστεί. Επόμενο βήμα είναι η απόδοση της μηχανικής καταπόνησης του τοιχώματος καθώς και της αντίστοιχης κίνησης του τοιχώματος με τη βοήθεια κατάλληλου χρωματικού χάρτη. Η παραπάνω διαδικασία αποτυπώνεται στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 8) [Sch03].

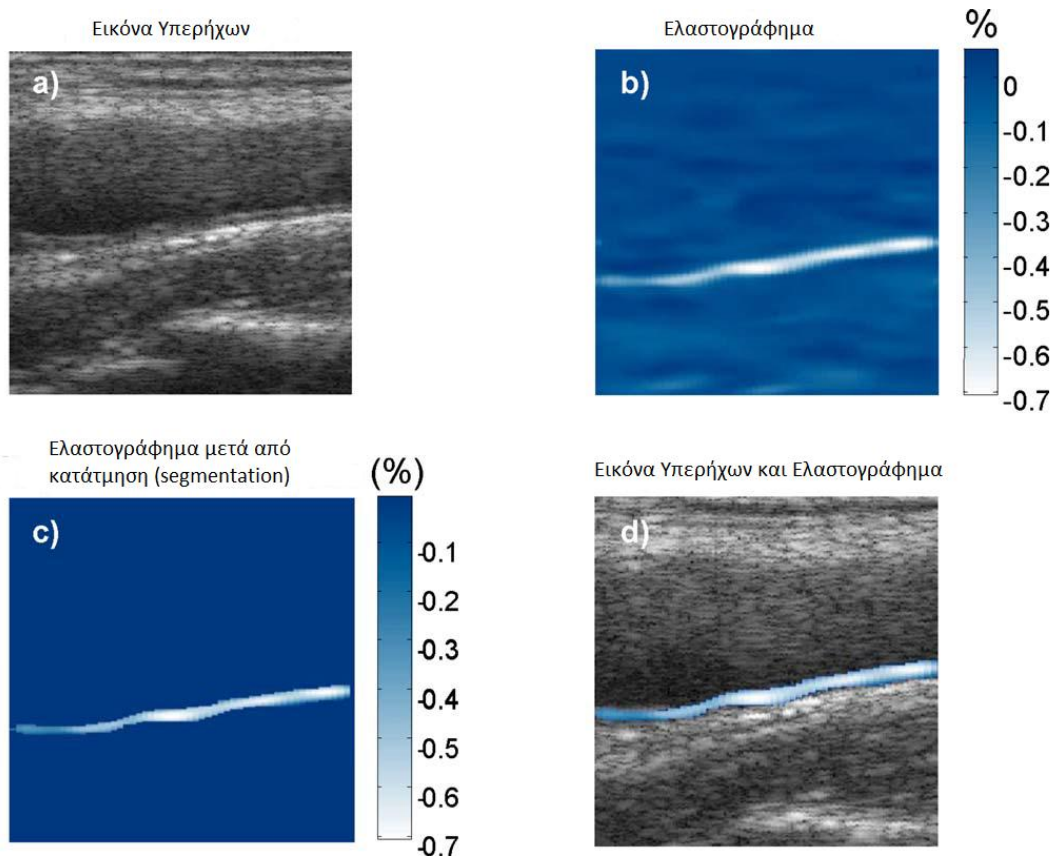


Εικόνα 8 : Βασική αρχή λειτουργίας του Ελαστογραφήματος [deK03]

Όσον αφορά στο χαρακτηρισμό του τοιχώματος της καρωτίδας, με βάση νεότερες μελέτες [Mau04], [Mau08], [Sch07] ερευνήθηκε η πιθανότητα χρήσης της ελαστογραφίας με μη παρεμβατικό τρόπο. Τα δεδομένα (εικόνες υπερήχων) που χρησιμοποιήθηκαν στις εργασίες αυτές λήφθηκαν με εφαρμογή του μετατροπέα υπερήχων πάνω στο δέρμα καθώς τα αγγειακά τοιχώματα κινούνται λόγω της ροής του αίματος και της παλμικής λειτουργίας της καρδιάς. Γενικά, μελετήθηκαν ελαστογραφήματα πραγματικών ακολουθιών εικόνων που προέρχονταν από υγιείς εξεταζόμενους [Mau08] αλλά και από ασθενείς με αθηρωμάτωση στην καρωτίδα [Sch07]. Οι εικόνες υπερήχων προέρχονται από διαμήκεις τομές της καρωτίδας, ώστε να είναι δυνατός ο υπολογισμός όχι μόνο της ακτινικής αλλά και της διαμήκου καταπόνησης των τοιχωμάτων. Ωστόσο, υπάρχουν και κάποιες εργασίες που βασίστηκαν σε εικόνες που απεικονίζουν εγκάρσιες τομές της καρωτίδας [Rib05], [Sch05].

Για τον υπολογισμό των καταπονήσεων οι περισσότερες από τις παραπάνω εργασίες βασίστηκαν στον αλγόριθμο Lagrangian Speckle model estimator (LSME) [Mau99]. Ο αλγόριθμος αυτός είναι ένας εκτιμητής κίνησης δύο διαστάσεων και υπολογίζει τη δισδιάστατη μήτρα παραμόρφωσης (Δ), η οποία περιλαμβάνει τις ακτινικές και διαμήκεις καταπονήσεις του τοιχώματος. Το πλεονέκτημα που παρουσιάζει αυτός ο αλγόριθμος είναι ότι κατά την κίνηση των σημείων που μελετά λαμβάνει υπόψη και την κίνηση των σημείων θορύβου τύπου speckle καθώς και την αλλαγή της μορφολογίας του θορύβου αυτού. Με αυτόν τον τρόπο παρέχει εκτίμηση κίνησης υψηλής αξιοπιστίας, τα οποία έχουν επαληθευτεί μέσω δοκιμών σε εμβιο-μηχανικές προσομοιώσεις [Mer08].

Συνεπώς, αρχικά επιλέγεται μια περιοχή ενδιαφέροντος, η οποία συνήθως είναι είτε το κάτω τοίχωμα είτε και τα δύο τοιχώματα στην περίπτωση διαμήκου τομής της καρωτίδας ή το περιβάλλον τοίχωμα στην περίπτωση εγκάρσιας τομής της καρωτίδας. Στη συνέχεια, με τη βοήθεια του παραπάνω αλγορίθμου ή άλλων τεχνικών ετεροσυσχέτισης [Sch07] υπολογίζονται οι μηχανικές καταπονήσεις (ακτινικές και διαμήκεις). Τα ελαστογραφήματα κατασκευάστηκαν αποδίδοντας την τιμή της καταπόνησης (ακτινικής ή διαμήκου) κάθε σημείου της περιοχής ενδιαφέροντος σε ποσοστιαίες μονάδες (%) με τη βοήθεια κατάλληλου χρωματικού χάρτη. Με αυτό τον τρόπο, προκύπτει ένας χρωματικός χάρτης κατανομής της καταπόνησης στο αρτηριακό τοίχωμα της καρωτίδας ο οποίος είναι το ελαστογράφημα. Μάλιστα για μεγαλύτερη εστίαση στη μηχανική συμπεριφορά του τοιχώματος επιλέχθηκε η κατάτμηση τους με χειροκίνητο [Mau08] ή ημιαυτόματο [Sch07] τρόπο. Η υπέρθεση των κατατετμημένων τμημάτων του τοιχώματος πάνω στην αρχική εικόνα υπερήχων αποτελεί συνήθη τακτική για να επιτευχθεί μια περισσότερο εποπτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Παράδειγμα μη παρεμβατικής ελαστογραφίας έχουμε στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 9):

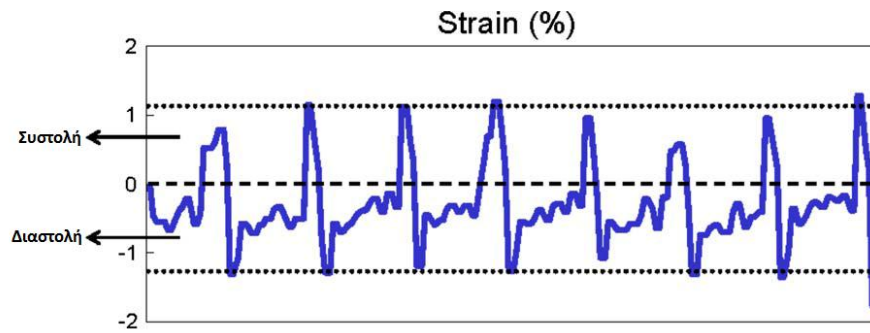


Εικόνα 9 : Μη παρεμβατικό ελαστογράφημα κατά τη διάρκεια της διαστολής της καρωτίδας και υπέρθεσή του σε εικόνα υπερήχων. (Η χρωματική του κλίμακα αποδίδει την καταπόνηση (strain) σε ποσοστιαίες μονάδες (%)) [Mau08]

Επίσης, μια ακόμα ποσότητα που υπολογίστηκε στις παραπάνω εργασίες και ερευνήθηκε η μεταβολή της τιμής της σε διαφορετικές ακολουθίες εικόνων είναι το μέτρο ελαστικότητας (elastic modulus). Το μέγεθος αυτό υπολογίζεται ως το πηλίκο της τάσης (stress) του τοιχώματος προς την αντίστοιχη μηχανική καταπόνηση. Μία μέθοδος υπολογισμού παρουσιάζεται στην εργασία [Mau04]. Στην εργασία [Mau08] υπολογίζεται ως ο λόγος της βαθμίδας (gradient) της πίεσης μεταξύ δύο συνεχόμενων εικόνων (ΔP) προς τη μέση μηχανική καταπόνηση στη φάση της μέγιστης διαστολής της αρτηρίας ($\bar{\epsilon}_D$).

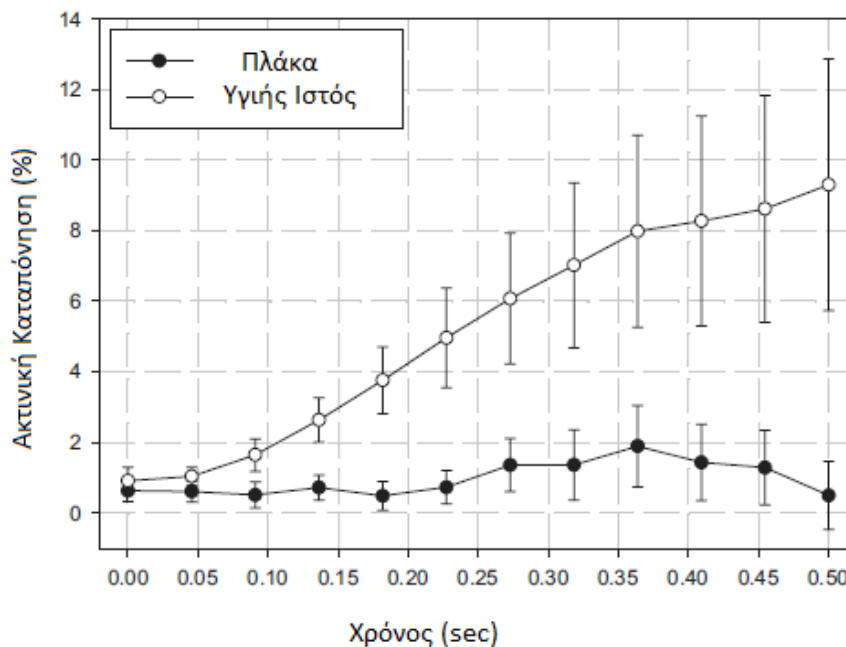
$$E_D = \frac{\Delta P}{\bar{\epsilon}_D} \quad (1.1)$$

Επιπλέον, σε πολλές από τις παραπάνω εργασίες επιλέχθηκε να παρουσιαστούν σε γραφήματα οι μέσες τιμές της μηχανικής καταπόνησης των σημείων σε κάποια περιοχή ενδιαφέροντος στη διάρκεια ενός ή περισσοτέρων καρδιακών κύκλων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιου γραφήματος βλέπουμε στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 10):



Εικόνα 10 : Μέση μηχανική καταπόνηση κατά τη διάρκεια 8 καρδιακών κύκλων για την περιοχή ενδιαφέροντος που φαίνεται στην Εικόνα 10 [Mau08]

Τα αποτελέσματα των παραπάνω εργασιών έδειξαν αρχικά για την περίπτωση υγιών ατόμων ότι τα ελαστογραφήματα που προέκυψαν μπορούν να αναπαραχθούν με σχετικά καλή συνέπεια για διαφορετικούς καρδιακούς παλμούς ακόμα και για διαφορετικά άτομα τόσο για την αριστερή όσο και για τη δεξιά κοινή καρωτίδα [Mau08]. Όσον αφορά σε άτομα με αθηρωματικές πλάκες αρχικά παρατηρήθηκε ότι στην περίπτωση που υφίσταται και ασβεστοποίηση του τοιχώματος οι τιμές της καταπόνησης στα συγκεκριμένα σημεία είναι πολύ χαμηλή [Sch07]. Ποσοτική επιβεβαίωση της παραπάνω πρότασης αποτελεί το παρακάτω διάγραμμα (Εικόνα 11) όπου δίδονται μέσοι όροι ακτινικής καταπόνησης που υπολογίστηκαν στη διάρκεια 7 καρδιακών κύκλων σε ένα χρονικό διάστημα από το τέλος της διαστολής ($t = 0s$) μέχρι την πλήρη συστολή ($t = 0.5s$).



Εικόνα 11 : Μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις ακτινικής καταπόνησης που υπολογίστηκαν στη χρονική διάρκεια 7 καρδιακών κύκλων μεταξύ του τέλους της διαστολής και της πλήρους συστολής [Sch07]

Η μελέτη της ελαστικότητας αθηρωματικών πλακών οδήγησε στην παρατήρηση ότι η καταπόνηση ήταν αντιστρόφως ανάλογη του πάχους της πλάκας [Sch07]. Ειδικά στην περίπτωση σκληρών αθηρωματικών πλακών που έχουν υποστεί ασβεστοποίηση παρατηρούνται μικρές τιμές καταπόνησης πάνω στα σημεία της πλάκας, όμως ο περιβάλλον ιστός παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές καταπόνησης. Το γεγονός αυτό μπορεί να οφείλεται στο ότι η πολύ σκληρή πλάκα δεν υφίσταται παραμόρφωση με αποτέλεσμα να μεταφέρει υψηλή ενέργεια στο περιβάλλον τοίχωμα και να προκαλεί αθροιστικά μεγαλύτερη παραμόρφωση σε αυτό. Το γεγονός αυτό επαληθεύεται εν μέρει και από άλλη εργασία [Rib05] όπου παρατηρείται ότι σε ασθενείς με αθηρωμάτωση η καταπόνηση στα τοιχώματα εμφανίζει υψηλές αλλά και χαμηλές τιμές σε διαφορετικές περιοχές. Ωστόσο, σε γενικές γραμμές σημειώνεται ότι σε ετερογενές τοίχωμα (που περιλαμβάνει δηλαδή και αθηρωματικές πλάκες ή και ασβεστοποίηση σε κάποια σημεία) τα αποτελέσματα δεν ήταν ιδιαίτερα συνεπή στην αναπαραγωγή τους [Sch07].

1.5 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας

Στην παρούσα διπλωματική εργασία σκοπός μας είναι να αξιοποιήσουμε τις τεχνικές της μη παρεμβατικής ελαστογραφίας προκειμένου να μελετήσουμε τη μηχανική συμπεριφορά του τοιχώματος της κοινής καρωτίδας. Για να το πετύχουμε αυτό αρχικά εργαστήκαμε σε συνθετικές ακολουθίες εικόνων και στη συνέχεια εφαρμόσαμε την τεχνική που αναπτύξαμε σε πραγματικές ακολουθίες εικόνων υπερήχων Β-σάρωσης της κοινής καρωτίδας ατόμων που είναι υγιή καθώς και ατόμων που πάσχουν από αθηρωμάτωση. Με αυτόν τον τρόπο διερευνήσαμε και τη δυνατότητα χρήσης της μη παρεμβατικής ελαστογραφίας στο χαρακτηρισμό του αρτηριακού τοιχώματος της κοινής καρωτίδας.

2

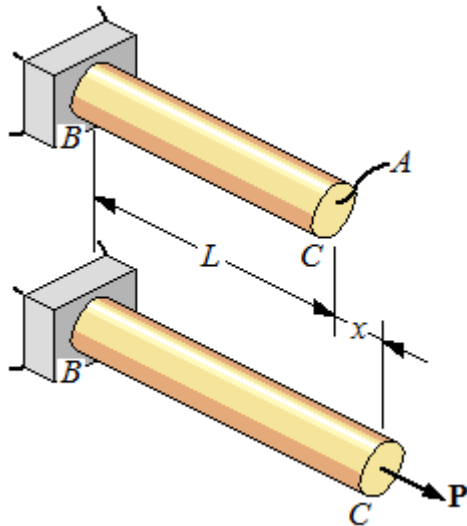
Θεωρητικό Υπόβαθρο

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο πάνω στο οποίο στηρίζεται η τεχνική κατασκευής του ελαστογραφήματος. Αρχικά, παρουσιάζεται ένα μονοδιάστατο μοντέλο το οποίο θέτει τις βάσεις για τον υπολογισμό των μηχανικών καταπονήσεων που θα απεικονιστούν στη συνέχεια από το ελαστογράφημα. Επίσης, αναλύεται το μονοδιάστατο πρόβλημα του υπολογισμού της καταπόνησης βιολογικού ιστού με τη βοήθεια υπερήχων. Τέλος, γίνεται γενίκευση στις δύο διαστάσεις.

2.1 Μονοδιάστατο μοντέλο

Ο στόχος της τεχνικής της ελαστογραφίας είναι η ποσοτική αποτίμηση και απεικόνιση των τοπικών μεταβολών της ελαστικότητας των βιολογικών ιστών. Έχει αποδειχθεί ότι χρήσιμες εικόνες μπορεί να εξαχθούν αποτυπώνοντας είτε το μέτρο της ελαστικότητας του βιολογικού ιστού είτε την μηχανική καταπόνηση που υφίσταται [*Oph91*]. Στην παρούσα διπλωματική εργασία τα ελαστογραφήματα υπολογίστηκαν με βάση τη μηχανική καταπόνηση των βιολογικών ιστών.

Η μηχανική καταπόνηση (normal strain / strain) που υφίσταται ένα αντικείμενο στο οποίο ασκείται κάποια δύναμη που το παραμορφώνει είναι ίση με το λόγο της παραμόρφωσής του προς το αρχικό του μήκος [*Oph*]. Για παράδειγμα έστω ράβδος αρχικού μήκους L και διατομής A στην οποία ασκείται δύναμη που προκαλεί την παραμόρφωσή της και συγκεκριμένα την επιμήκυνσή της κατά μήκος x (*Εικόνα 12*).

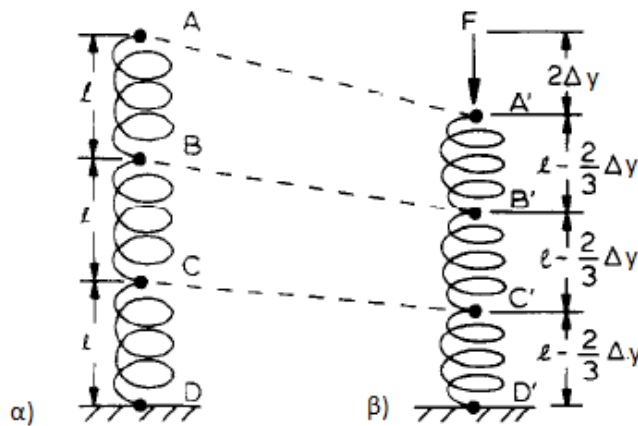


Εικόνα 12 : Παραμόρφωση ράβδου αρχικού μήκους L σε νέο μήκος $L+x$

Τότε η μηχανική καταπόνηση που υφίσταται η παραπάνω ράβδος ορίζεται ως το πηλίκο:

$$\text{Καταπόνηση} = \frac{\text{Παραμόρφωση}}{\text{Αρχικό Μήκος}} = \frac{x}{L} \quad (2.1)$$

Στη συνέχεια, για να γίνει κατανοητή η χρήση του παραπάνω μεγέθους στην περίπτωση βιολογικών ιστών παρουσιάζεται ένα απλό μονοδιάστατο μοντέλο με αλληπάλληλα ελατήρια συνδεδεμένα στη σειρά όπως φαίνονται στην *Εικόνα 13* [Oph91].

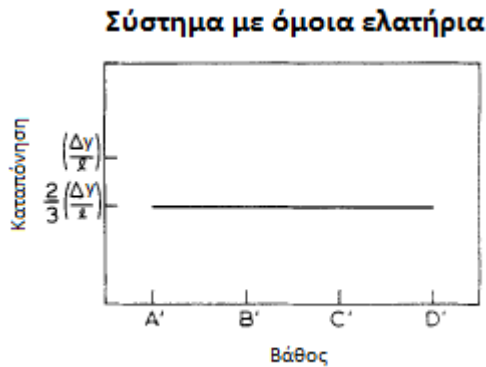


Εικόνα 13 : Απλό μοντέλο βιολογικού ιστού όμοιων ελατηρίων α) πριν τη συμπίεση και β) μετά τη συμπίεση [Oph91]

Στο παραπάνω μοντέλο τα τρία ελατήρια είναι όμοια, έχουν ίσο μήκος ηρεμίας l και καθένα από αυτά αναπαριστά την ελαστική συμπεριφορά βιολογικού ιστού κυλινδρικού σχήματος με μοναδιαία διάμετρο. Εάν το κορυφαίο ελατήριο συμπιεστεί και το συνολικό μήκος του συστήματος των ελατηρίων μειωθεί κατά μήκος $2\Delta y$ τότε κάθε ελατήριο θα συμπιεστεί κατά $\Delta l = 2\Delta y/3$. Συνεπώς, με βάση τη σχέση (2.1) για κάθε ελατήριο έχουμε :

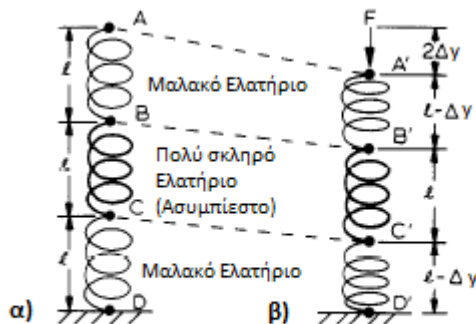
$$\text{καταπόνηση} = \frac{\text{Παραμόρφωση}}{\text{Αρχικό Μήκος}} = \frac{\Delta l}{l} \quad (2.2)$$

Αντικαθιστώντας το Δl προκύπτει ότι η μηχανική καταπόνηση κάθε ελατηρίου είναι ίση με $2\Delta y/3l$. Η γραφική παράσταση της καταπόνησης συναρτήσει του βάθους της κατασκευής για το ζεύγος των στιγμιότυπων ηρεμίας – συμπίεσης του συστήματος ελατηρίων είναι το παρακάτω (Εικόνα 14).



Εικόνα 14 : Γραφική παράσταση καταπόνησης συναρτήσει του βάθους για σύστημα με τρία όμοια ελατήρια συνδεδεμένα στη σειρά [Oph91]

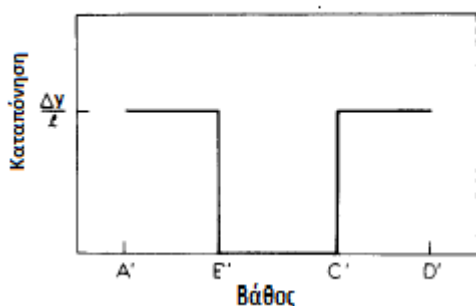
Αντίστοιχο παράδειγμα μοντέλου ελαστικής συμπεριφοράς βιολογικού ιστού είναι το σύστημα ελατηρίων της Εικόνας 15.



Εικόνα 15 : Απλό μοντέλο βιολογικού ιστού με δύο όμοια και ένα ασυμπίεστο ελατήριο α) πριν τη συμπίεση β) μετά τη συμπίεση [Oph91]

Στο παραπάνω μοντέλο το μεσαίο ελατήριο είναι πρακτικά ασυμπίεστο συνεπώς τα άλλα δύο ελατήρια καλούνται να απορροφήσουν τη συμπίεση την οποία υφίσταται το σύστημα. Επομένως, με βάση τα παραπάνω η μηχανική καταπόνηση καθενός από τα δύο αυτά ελατήρια θα είναι ίση με: $\Delta y/l$. Η αντίστοιχη γραφική παράσταση της καταπόνησης για κάθε σημειωμένο σημείο για το ζεύγος καταστάσεων της παραπάνω εικόνας (Εικόνα 15) είναι η παρακάτω (Εικόνα 16).

Σύστημα με διαφορετικά ελατήρια



Εικόνα 16 : Γραφική παράσταση καταπόνησης συναρτήσει του βάθους για σύστημα με τρία ελατήρια διαφορετικών μηχανικών ιδιοτήτων στη σειρά [Oph91]

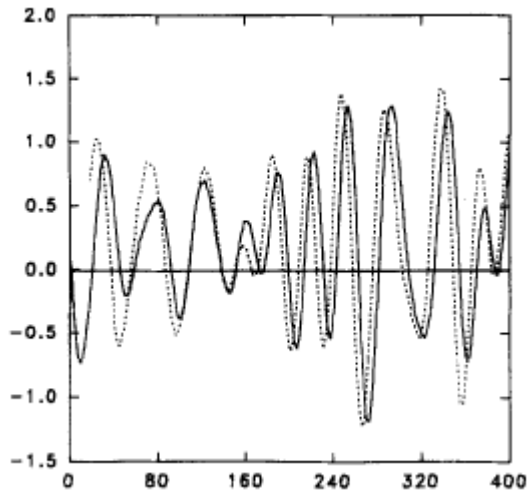
Με βάση τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι η μηχανική καταπόνηση εξαρτάται από τη συμπίεση που υφίσταται το σύστημα καθώς και από τη σκληρότητα των ελατηρίων που το απαρτίζουν. Ωστόσο, πρέπει να τονιστεί ότι σε μία πιο ρεαλιστική τρισδιάστατη προσέγγιση βιολογικού ιστού η καταπόνηση δε θα είναι σταθερή συναρτήσει του βάθους, διότι οι επιμέρους δυνάμεις που ασκούνται κατά τη συμπίεση σε κάθε σημείο του ελατηρίου είναι συναρτήσεις της μετατόπισης η οποία με τη σειρά της είναι συνάρτηση του βάθους του βιολογικού ιστού [Oph91].

2.2 Ελαστογραφία βιολογικών ιστών σε μία διάσταση

Στην περίπτωση πραγματικού βιολογικού ιστού, για να επιτευχθεί η μονοδιάστατη επίλυση του προβλήματος της απεικόνισης της μηχανικής καταπόνησης, απαιτείται ένα μόνο στοιχείο μετατροπέα το οποίο στέλνει μία ακτίνα υπερήχων στην κατεύθυνση του υπό εξέταση ιστού. Για την απεικόνιση του αποτελέσματος της σάρωσης αυτής ακολουθείται η τεχνική Α-σάρωσης (A-mode), δηλαδή οι αντηχήσεις της δέσμης υπερήχων καταγράφονται ως συναρτήσεις του βάθους. Το βάθος (Depth) σε αυτήν την περίπτωση υπολογίζεται ως το γινόμενο της ταχύτητας των υπερήχων μέσα στο βιολογικό ιστό (c), η οποία θεωρείται σταθερή για το συγκεκριμένο μέσο μετάδοσης, επί το μισό του χρόνου που χρειάστηκε για να διαδοθεί και να επιστρέψει η αντήχηση ($\frac{t_{ολ}}{2}$). Δηλαδή:

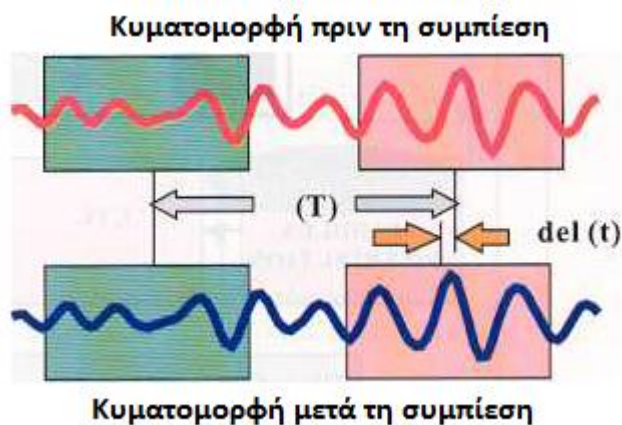
$$Depth = c \cdot \frac{t_{ολ}}{2} \quad (2.3)$$

Όπως και στην περίπτωση του μοντέλου έτσι και εδώ ο υπολογισμός των καταπονήσεων βασίζεται σε ένα ζεύγος Α-κυματομορφών (A-lines) που λήφθηκαν πριν και κατά τη διάρκεια της συμπίεσης του ιστού. Πρέπει να σημειωθεί ότι και στην κατάσταση πριν την κύρια συμπίεση ο ιστός υφίσταται μια μικρή συμπίεση ώστε να επιτευχθεί καλύτερη επαφή του με τον μετατροπέα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα ζεύγους Α-κυματομορφών είναι το παρακάτω (Εικόνα 17):



Εικόνα 17 : Γραφική παράσταση του πλάτους των αντηχήσεων συναρτήσει του συνολικού χρόνου επιστροφής (ο οριζόντιος άξονας είναι κβαντισμένος σε διαστήματα των 20 nsec). Με συνεχόμενη γραμμή απεικονίζεται ο ιστός πριν τη συμπίεση και με διακεκομμένη ο ιστός κατά τη διάρκεια της συμπίεσης [Oph91]

Επόμενο βήμα είναι οι δύο Α-κυματομορφές να χωριστούν σε μικρότερα χρονικά παράθυρα και στη συνέχεια υπολογίζεται η χρονική μετατόπιση μεταξύ όμοιων παραθύρων των δύο Α-κυματομορφών [Oph02]. Αυτό επιτυγχάνεται με διάφορες τεχνικές υπολογισμού χρονικής καθυστέρησης, όπως τεχνικές ετεροσυσχέτισης. Η τοπική καταπόνηση, θεωρώντας την ταχύτητα του ήχου σταθερή και εξαλείφοντάς την, υπολογίζεται από τη βαθμίδα της μετατόπισης. Παράδειγμα υπολογισμού της καταπόνησης με δύο Α-κυματομορφές δίδεται στο παρακάτω σχήμα (Εικόνα 18).



Εικόνα 18 : Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας υπολογισμού της μηχανικής καταπόνησης βιολογικού ιστού με τη βοήθεια κυματομορφών υπερήχων. [Oph02]

Παρατηρείται ότι στο κοντινότερο παράθυρο η καθυστέρηση μεταξύ του σήματος πριν τη συμπίεση και μετά τη συμπίεση παρουσιάζει μηδαμινή χρονική καθυστέρηση. Αντίθετα στην

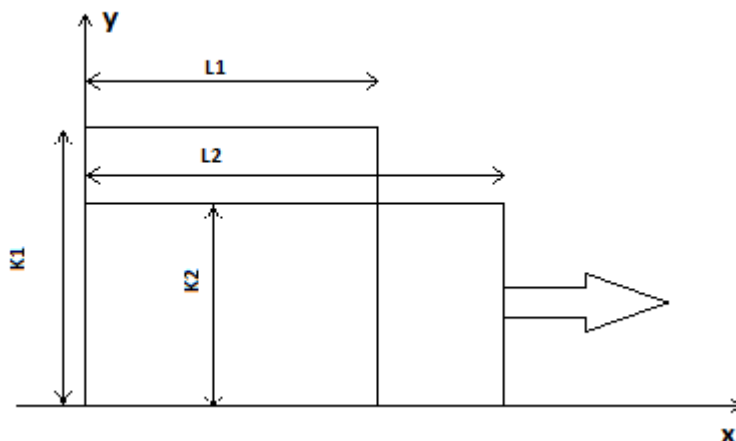
περίπτωση του επόμενου παραθύρου παρατηρείται πεπερασμένη χρονική καθυστέρηση ($\text{del}(t)$). Συνεπώς, η καταπόνηση με βάση το παραπάνω σχήμα δίδεται από τη σχέση:

$$\text{Καταπόνηση} = \frac{\text{del}(t)}{T} \quad (2.4)$$

όπου T είναι η χρονική διαφορά ανάμεσα στα παράθυρα [Oph02].

2.3 Ελαστογραφία σε δύο διαστάσεις

Ο υπολογισμός των μηχανικών καταπονήσεων στις δύο διαστάσεις είναι μια γενίκευση των όσων ισχύουν στη μία διάσταση. Η διαφορά έγκειται στο ότι τα δισδιάστατα αντικείμενα μπορούν να υποστούν παραμόρφωση και στους δύο άξονες, κατά συνέπεια υπολογίζονται δύο καταπονήσεις, μία για κάθε διεύθυνση. Παράδειγμα, υπολογισμού καταπόνησης σε δύο διαστάσεις δίδεται στην *Εικόνα 19*:



Εικόνα 19 : Παραμόρφωση αρχικού αντικειμένου διαστάσεων $L1$ και $K1$ σε διαστάσεις $L2$ και $K2$

Στην παραπάνω περίπτωση υπολογίζονται οι καταπονήσεις στον άξονα x (s_x) και στον άξονα y (s_y) με βάση τις παρακάτω σχέσεις:

$$s_x = \frac{\Delta L}{L1} = \frac{L2 - L1}{L1} \quad (2.5)$$

$$s_y = \frac{\Delta K}{K1} = \frac{K2 - K1}{K1} \quad (2.6)$$

Επομένως, σύμφωνα με τα παραπάνω στην περίπτωση του ελαστογραφήματος της καρωτίδας υπολογίζεται η κίνηση και η μηχανική καταπόνηση των τοιχωμάτων της που προκαλείται από εσωτερικούς παράγοντες και συγκεκριμένα από την πίεση του αίματος και την παλμική λειτουργία της καρδιάς. Σε αυτήν την περίπτωση η επεξεργασία γίνεται με τη βοήθεια εικόνων υπερήχων Β-σάρωσης της καρωτίδας. Ειδικότερα, όπως συμβαίνει και στη μονοδιάστατη περίπτωση με τις Α-κυματομορφές, επιλέγεται ένα ζεύγος εικόνων σε

διαφορετικές χρονικά στιγμές του ίδιου καρδιακού κύκλου μεταξύ των οποίων πραγματοποιείται ανάλυση κίνησης των σημείων των τοιχωμάτων. Η κίνηση των σημείων του τοιχώματος αναλύεται σε δύο διευθύνσεις, τη διαμήκη και την ακτινική. Επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός της μηχανικής καταπόνησης που υφίστανται τα τοιχώματα σε κάθε σημείο και για τις δύο διευθύνσεις. Για να επιτευχθεί αυτό αξιοποιούνται οι παραπάνω σχέσεις (2.5, 2.6) οπότε έχοντας υπολογίσει την ακτινική και τη διαμήκη μετατόπιση κάθε σημείου ανάμεσα στις δύο εικόνες χρησιμοποιούνται οι παρακάτω σχέσεις:

$$\text{Ακτινική Καταπόνηση} = \frac{\text{Ακτινική Μετατόπιση}}{\text{Αρχική Ακτινική Θέση}} \quad (2.7)$$

$$\text{Διαμήκης Καταπόνηση} = \frac{\text{Διαμήκης Μετατόπιση}}{\text{Αρχική Διαμήκης Θέση}} \quad (2.8)$$

Στην συνέχεια, ακολουθεί η εξαγωγή των ελαστογραφημάτων, η οποία περιλαμβάνει την απόδοση των υπολογισθέντων τιμών της καταπόνησης σε κάθε σημείο της εικόνας με τη βοήθεια κατάλληλου χρωματικού χάρτη.

3

Υλικό και Μέθοδοι

Σε αυτό το κεφάλαιο αναφερόμαστε στο υλικό αλλά και τις τεχνικές που χρησιμοποιήσαμε προκειμένου να εξάγουμε και να αξιολογήσουμε ελαστογραφήματα. Καταρχάς, περιγράφονται οι συνθετικές και οι πραγματικές ακολουθίες εικόνων στις οποίες βασίστηκε η εργασία. Στη συνέχεια, περιγράφονται αναλυτικά τα συγκεκριμένα βήματα που ακολουθήθηκαν για την εφαρμογή της ελαστογραφίας σε ακολουθίες εικόνων υπερήχων, δηλαδή η επιλογή των περιοχών ενδιαφέροντος, η ανάλυση της κίνησής τους με κατάλληλο αλγόριθμο και η απόδοση των αποτελεσμάτων με χρήση χρωματικού χάρτη.

3.1 Συνθετικά δεδομένα

Σε αυτή τη διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκαν ακολουθίες συνθετικών εικόνων οι οποίες κατασκευάστηκαν στα πλαίσια της εργασίας [Στο07]. Οι πρώτες τρεις ακολουθίες εικόνων δημιουργήθηκαν χρησιμοποιώντας πραγματική εικόνα υπερήχων β-σάρωσης και διαφορετικά επίπεδα θορύβου, ενώ η τέταρτη κατασκευάστηκε με το λογισμικό πακέτο προσομοίωσης πεδίου υπερήχων Field II. Μέσω των τριών πρώτων ακολουθιών ελέγχθηκαν και θα αξιολογήθηκαν τα αποτελέσματα της ελαστογραφίας σε ένα περιβάλλον ελεγχόμενου θορύβου, ενώ με τη βοήθεια της τέταρτης ελέγχθηκαν τα αποτελέσματα σε ένα περιβάλλον με ρεαλιστικά χαρακτηριστικά υπερήχων. Σημειώνουμε ότι και στις δύο περιπτώσεις η προσομοίωση της κίνησης έγινε με χρήση ενός μοντέλου που περιγράφει τη χωρική και χρονική μεταβολή της οριζόντιας και κατακόρυφης θέσης σύμφωνα με τη σχέση:

$$d(x, t) = \begin{bmatrix} r(x, t) \\ l(x, t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w(x) \cdot z(t) \\ n(x) \cdot k(t) \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Όπου $r(x, t)$, $l(x, t)$ αντιστοιχούν στο χωροχρονικό όρο μεταβολής της θέσης για την ακτινική και διαμήκη διεύθυνση αντίστοιχα. Για τον καθορισμό του χωρικού όρου χρησιμοποιήθηκε μια εκθετική συνάρτηση:

$$w(x) = a_2 \cdot e^{b_2|y-y_i|} \quad (3.2)$$

Όπου $a_2 = 0.4 \text{ mm}$ είναι το μέγιστο πλάτος της μετατόπισης για την ακτινική διεύθυνση, $b_2 = -0.1722$ είναι η παράμετρος που καθορίζει την απόσβεση του πλάτους της μετατόπισης και y_i είναι η ακτινική θέση του ορίου του αγγείου στο άνω ή στο κάτω τοίχωμα. Για την επιλογή της μαθηματικής εξίσωσης (3.2) χρησιμοποιήθηκαν μετρήσεις του πλάτους της κίνησης για διάφορα σημεία του τοιχώματος υγιούς καρωτίδας.

Αντίστοιχα για τον προσδιορισμό του χωρικού όρου $n(x)$ χρησιμοποιήθηκε μια εκθετική συνάρτηση που περιγράφει την εξάρτηση του πλάτους της διαμήκου μετατόπισης από την ακτινική θέση:

$$n(x) = a_3 \cdot e^{b_3|y-y_i|} \quad (3.3)$$

Όπου $a_3 = 0.4 \text{ mm}$ είναι το μέγιστο πλάτος της μετατόπισης στην διαμήκη διεύθυνση και $b_3 = -1.075$ είναι η παράμετρος που καθορίζει την απόσβεση του πλάτους της μετατόπισης. Οι χρονικοί όροι $z(t)$, $k(t)$ καθορίζονται στη συνέχεια για κάθε κατηγορία συνθετικών ακολουθιών με βάση τις εργασίες [Στο07] [Sto07].

3.1.1 Ακολουθίες συνθετικών εικόνων υπερήχων με τη χρήση πραγματικής

εικόνας και διαφορετικών επιπέδων θορύβου

Για τη δημιουργία των εικόνων αυτής της κατηγορίας χρησιμοποιήθηκε μια πραγματική διαμήκης εικόνα υπερήχων Β-σάρωσης μεγέθους 539×397 εικονοστοιχείων, από το αρτηριακό τοίχωμα της καρωτίδας ενός υγιούς άνδρα νεαρής ηλικίας. Η εικόνα αυτή παραμορφώθηκε σύμφωνα με το μαθηματικό μοντέλο που ορίζεται στη συνέχεια και προέκυψε μια ακολουθία 29 εικόνων που αντιστοιχεί στην κίνηση τοιχώματος ενός καρδιακού κύκλου.

Η χρονική μεταβολή της μετατόπισης του τοιχώματος της καρωτίδας ορίστηκε με τη βοήθεια της συνάρτησης παλμού $\Pi(t_i, t_{i+1})$ ως εξής:

$$z(t) = \Pi(t_0, t_1) \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot t}{c \cdot T}\right) + \Pi(t_1, t_2)(a + b \cdot t) \quad (3.4)$$

Όπου T είναι η διάρκεια του κύκλου και a , b , c , t_1 , t_2 είναι οι παράμετροι του μοντέλου.

Η συνάρτηση παλμού ορίζεται ως:

$$\Pi(t_i, t_{i+1}) = \frac{1}{4} \left(1 - \tanh \left((d \cdot (t - t_i)) \right) \right) \left(1 - \tanh(d \cdot (t_{i-1} - t)) \right) \quad (3.5)$$

Στις παραπάνω σχέσεις η παράμετρος a (εικονοστοιχεία) καθορίζει το πλάτος της κυματομορφής b (εικονοστοιχεία/sec) αντιστοιχεί στην κλίση του δεύτερου τμήματος της καμπύλης και εκφράζει την ταχύτητα του τοιχώματος από το τέλος της συστολής μέχρι το τέλος της διαστολής, c είναι η παράμετρος που καθορίζει την κλίση του αρχικού τμήματος της καμπύλης που έχει μικρότερη κλίση από το κυρίως τμήμα, t_1 (sec) είναι η διάρκεια του πρώτου παλμού και αντιστοιχεί στη διάρκεια της συστολής, t_2 (sec) είναι η διάρκεια του δεύτερου παλμού και αντιστοιχεί στο διαστολικό τμήμα της καμπύλης και το d (sec^{-1}) ελέγχει την κλίση του πρώτου τμήματος της καμπύλης και αντιστοιχεί στην ταχύτητα του αρτηριακού τοιχώματος από το τέλος της διαστολής έως το τέλος της συστολής. Η χρονική μεταβολή της μετατόπισης του τοιχώματος της καρωτίδας κατά την διαμήκη διεύθυνση $k(t)$, ορίστηκε με τη βοήθεια της σχέσης:

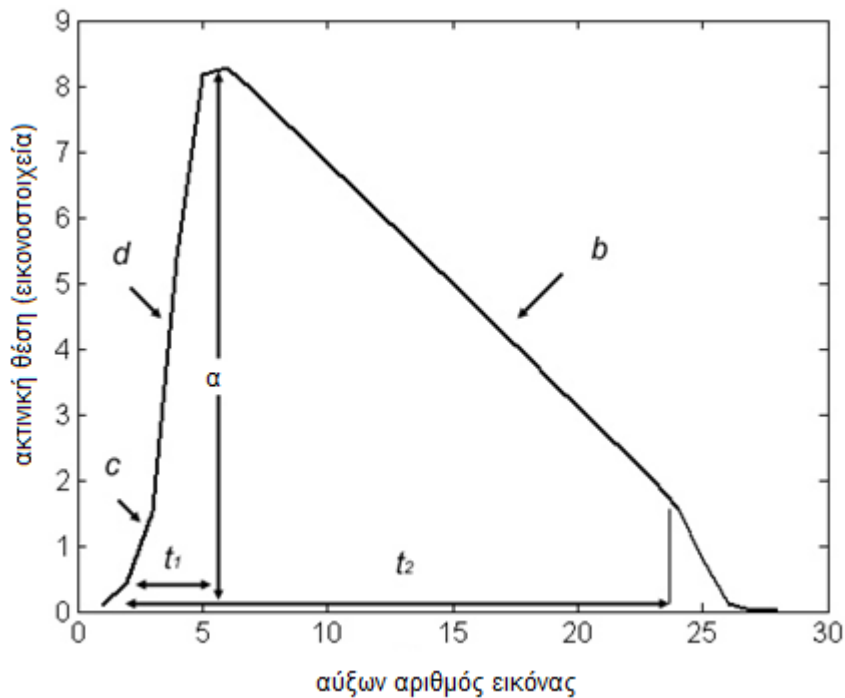
$$k(t) = \Pi(t_0, t_1) \cdot \sin^2 \left(\frac{\pi \cdot T}{c \cdot T} \right) + \Pi(t_1, t_2)(a + b \cdot t) \quad (3.6)$$

Όπου οι συναρτήσεις παλμού δίδονται από τις σχέσεις:

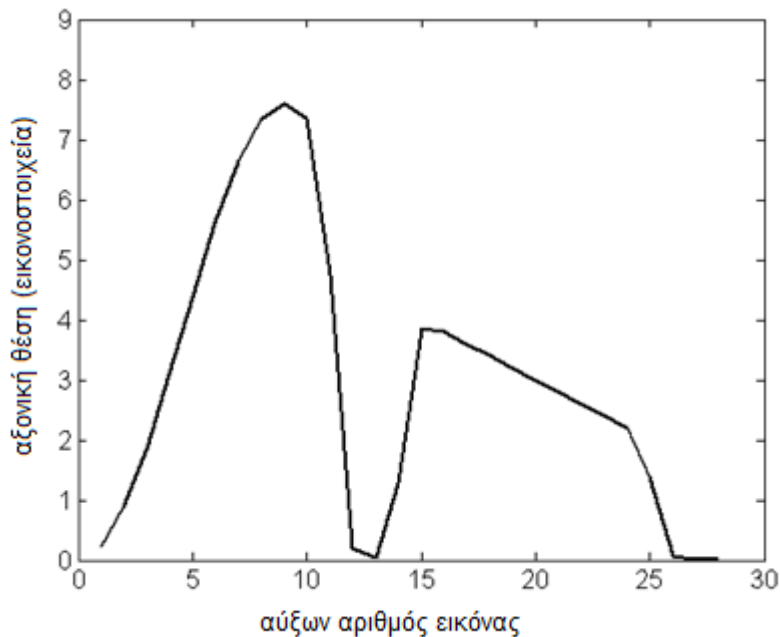
$$\Pi(t_0, t_1) = f \cdot (1 + \tanh(d(t - (t_1 + k)))) (1 + \tanh(d(t_{i-1} - t))) \quad (3.7)$$

$$\Pi(t_1, t_2) = \frac{1}{4} (1 + \tanh(d(t - t_2)))(1 + \tanh(d(t_1 - t))) \quad (3.8)$$

Η παράμετρος f ελέγχει το πλάτος του πρώτου παλμού και η παράμετρος k (sec) ελέγχει την απόσταση μεταξύ των δύο παλμών. Η παράμετρος a στο μοντέλο της διαμήκου μετατόπισης ελέγχει κυρίως το πλάτος του δεύτερου και όχι της κυματομορφής συνολικά, όπως συνέβαινε στην περίπτωση ακτινικής κίνησης. Για τις υπόλοιπες παραμέτρους ισχύει ό,τι έχει αναφερθεί στην περίπτωση του μοντέλου ακτινικής μετατόπισης. Στις *Εικόνες 20* και *21* παρουσιάζονται παραδείγματα καμπυλών του μαθηματικού μοντέλου για την εξέλιξη της κίνησης στην ακτινική και διαμήκη διεύθυνση, αντίστοιχα.



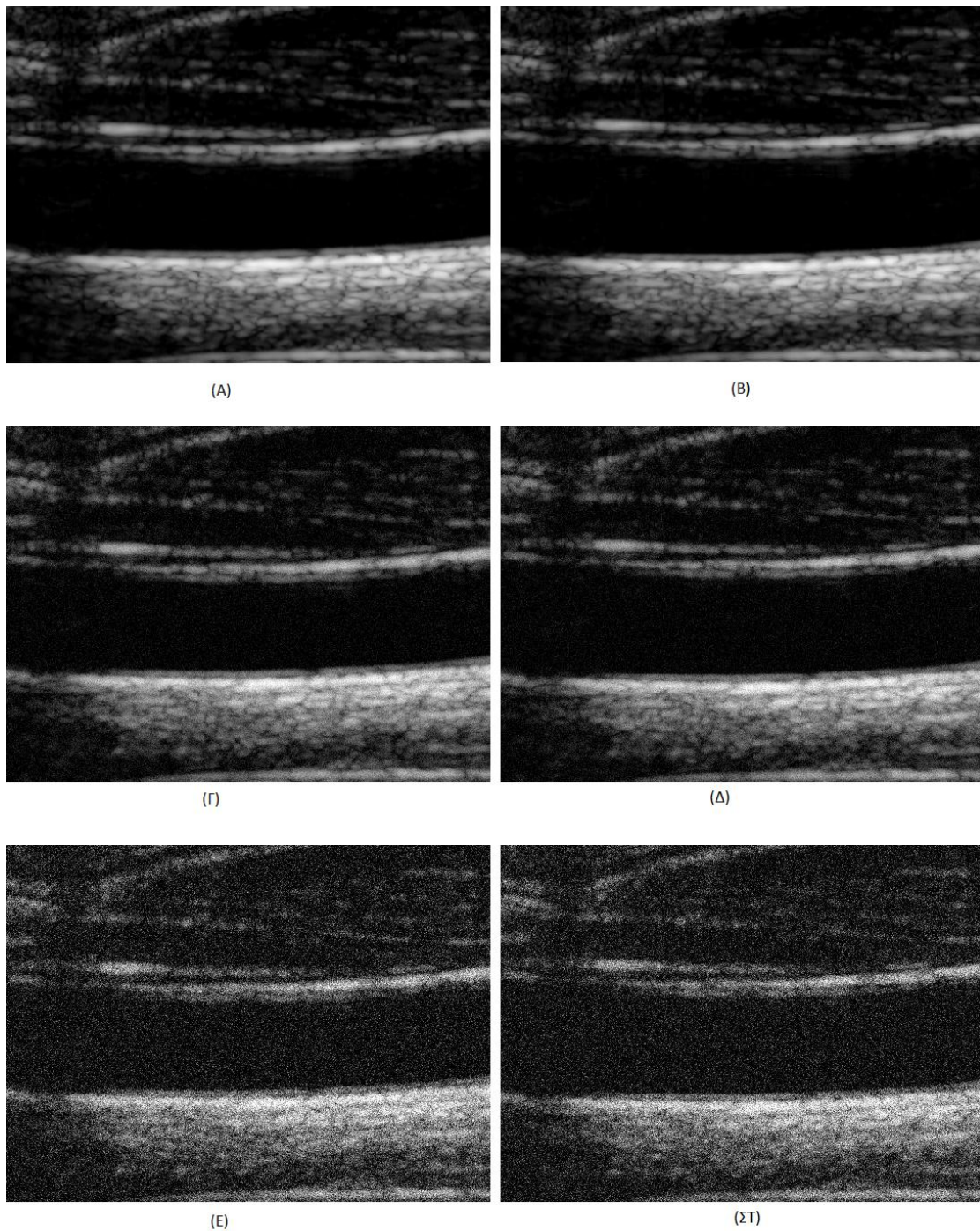
Εικόνα 20 : Παράδειγμα κυματομορφής του μαθηματικού μοντέλου κίνησης στην ακτινική διεύθυνση για την κατασκευή συνθετικών εικόνων με χρήση πραγματικής εικόνας και διαφορετικών επιπέδων θορύβου



Εικόνα 21 : Παράδειγμα κυματομορφής του μαθηματικού μοντέλου κίνησης στη διαμήκη διεύθυνση για την κατασκευή συνθετικών εικόνων με χρήση πραγματικής εικόνας και διαφορετικών επιπέδων θορύβου

Στη συνέχεια στις ακολουθίες εικόνων που δημιουργήθηκαν προστέθηκε γκαουσιανός θόρυβος με διαφορετικό σηματοθορυβικό λόγο (SNR ratio). Τελικά κατασκευάστηκαν τρεις ακολουθίες εικόνων με επίπεδα θορύβου που αντιστοιχούν σε σηματοθορυβικούς λόγους 0

db (Synthetic), 15 db (Synthetic15) και 25 db (Synthetic25). Παρακάτω παρατίθενται αντιπροσωπευτικά δείγματα εικόνων από τις 3 ακολουθίες τα οποία αντιστοιχούν στις φάσεις διαστολής και συστολής (Εικόνα 22).

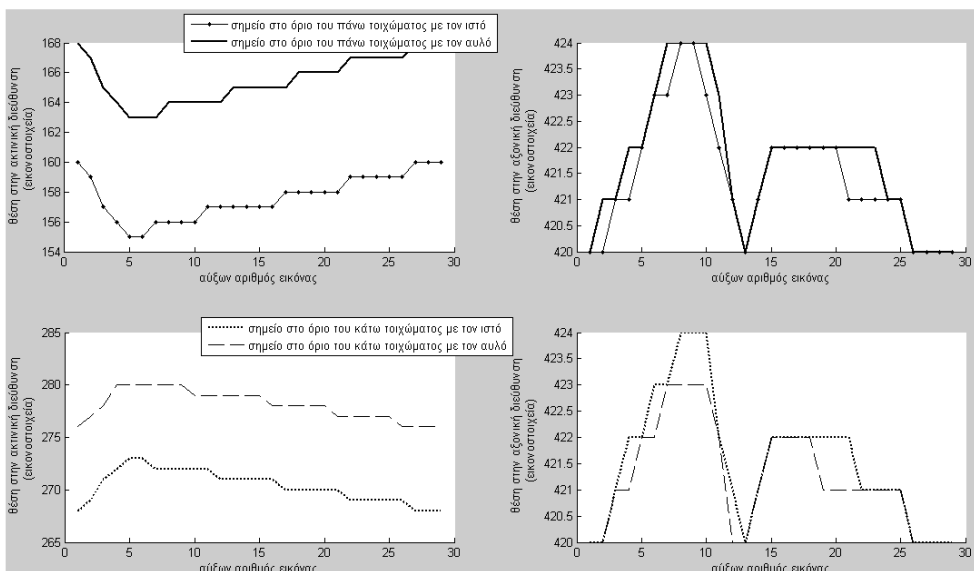
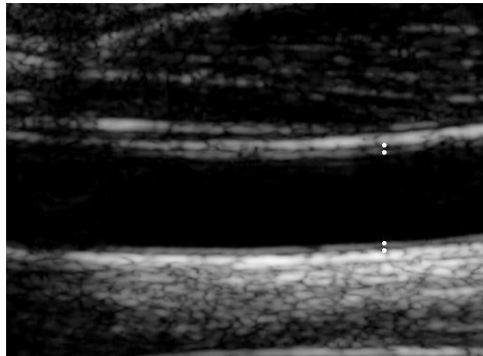


Εικόνα 22 : (Α)-(Β) Εικόνες συνθετικής ακολουθίας χωρίς θόρυβο με την εικόνα (Α) να αντιστοιχεί σε φάση διαστολής και την εικόνα (Β) σε φάση συστολής

(Γ)-(Δ) Εικόνες συνθετικής ακολουθίας με θόρυβο SNR = 25 db με την εικόνα (Γ) να αντιστοιχεί σε φάση διαστολής και την εικόνα (Δ) σε φάση συστολής

(Ε)-(ΣΤ) Εικόνες συνθετικής ακολουθίας με θόρυβο SNR = 15 db με την εικόνα (Ε) να αντιστοιχεί σε φάση διαστολής και την εικόνα (ΣΤ) σε φάση συστολής

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η κίνηση που ακολουθούν τέσσερα σημεία του τοιχώματος, δύο στο πάνω τοίχωμα και δύο στο κάτω τοίχωμα, εκ των οποίων σε κάθε περίπτωση το ένα βρίσκεται στο όριο του τοιχώματος με τον αυλό και το άλλο στο όριο του τοιχώματος με τον περιβάλλον ιστό (Εικόνα 23).



Εικόνα 23 : (πάνω) Σημεία των οποίων η κίνηση παρουσιάζεται στο κάτω μέρος της εικόνας (κάτω) Η κίνηση τεσσάρων σημείων στην ακτινική και διαμήκη διεύθυνση σύμφωνα με το μαθηματικό μοντέλο που κατασκευάστηκε με χρήση πραγματικής εικόνας και διαφορετικών επιπέδων θορύβου.

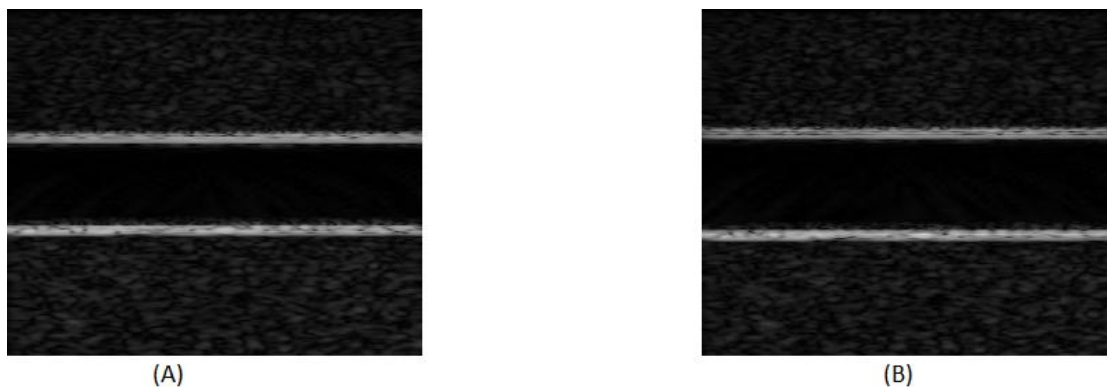
3.1.2 Ακολουθίες συνθετικών εικόνων με χρήση πραγματικής εικόνας και

λογισμικού πακέτου *FIELD II*

Η ακολουθία συνθετικών εικόνων αυτής της κατηγορίας κατασκευάστηκε με χρησιμοποίηση του λογισμικού πακέτου υπερήχων *Field II* και ως βάση χρησιμοποιήθηκε ένας χάρτης σκεδαστών [Στο07]. Για τη δημιουργία του ανατομικού ομοιώματος χρησιμοποιήθηκαν 100.000 σκεδαστές. Χρησιμοποιήθηκε ένα κατώφλι για την τιμή της έντασης σκέδασης ίσο

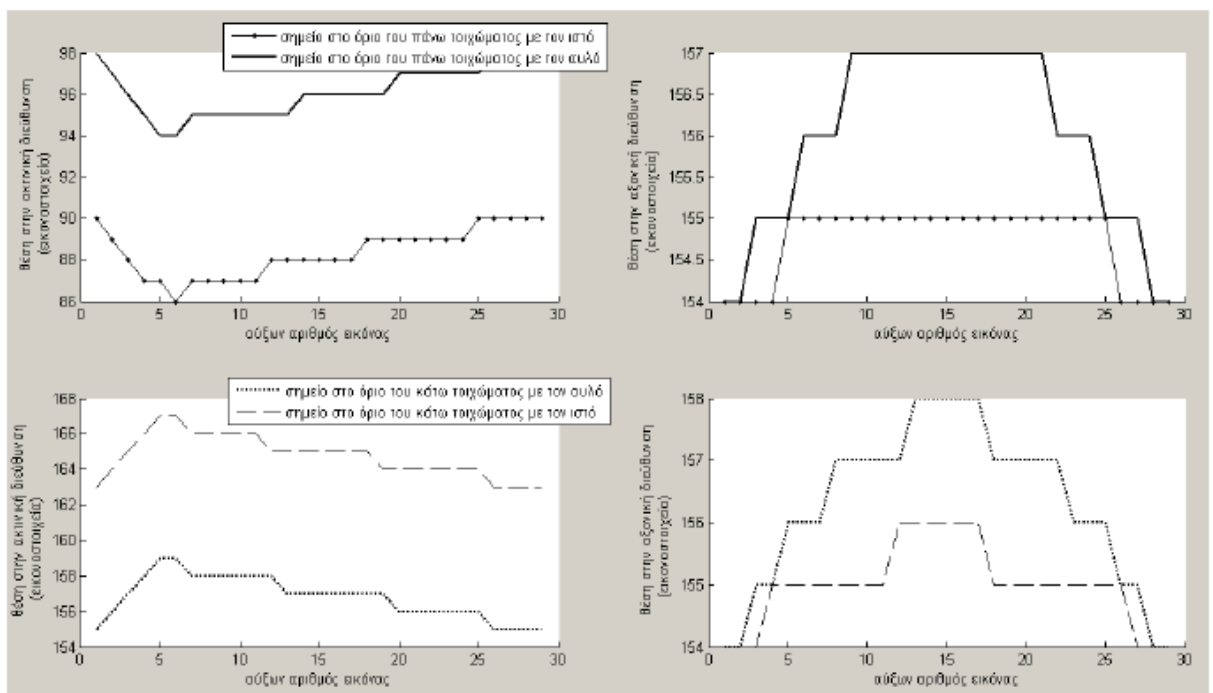
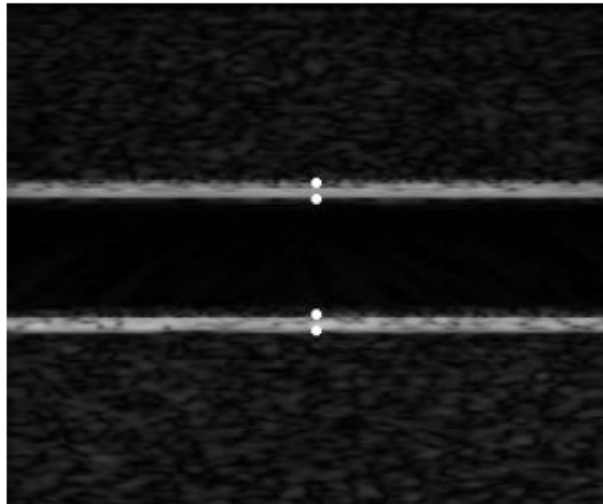
με 180 για τον καθορισμό των ισχυρών σκεδαστών, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση ισχυρών ανακλαστικών επιφανειών (έξω χιτώνας στην περίπτωση της καρωτίδας). Οι ισχυροί σκεδαστές δημιουργήθηκαν επιπλέον των 100.000 σκεδαστών του ανατομικού ομοιώματος.

Για τη δημιουργία της ακολουθίας των ανατομικών ομοιωμάτων, οι σκεδαστές του χάρτη σκέδασης μετακινήθηκαν σύμφωνα με το μαθηματικό μοντέλο κίνησης του τοιχώματος καρωτίδας που περιγράφηκε πιο πάνω. Ως χρονικός όρος για τη διαμήκη κίνηση χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση $k(t)$ όπως ορίστηκε προηγουμένως. Αντίστοιχα για την ακτινική κίνηση χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση $z(t)$ όπως ορίστηκε πιο πάνω. Για την κατασκευή της συνθετικής ακολουθίας ορίστηκε ένας τυπικός μετατροπέας για εξέταση αγγείων με τα εξής χαρακτηριστικά: κεντρική συχνότητα 5 MHz, συστοιχία 64 στοιχείων μετατροπέα με καταπίεση πλευρικών λοβών τόσο κατά τη λήψη όσο και κατά την εκπομπή με τη μέθοδο Hanning, απλή εστίαση για την εκπομπή και πολλαπλή εστίαση για τη λήψη. Η συχνότητα δειγματοληψίας σάρωσης ήταν 100 MHz. Χρησιμοποιήθηκαν 128 γραμμές σάρωσης για την απεικόνιση της περιοχής της κοινής καρωτίδας και οι εικόνες που κατασκευάστηκαν είχαν μέγεθος 300×250 εικονοστοιχεία. Παραδείγματα των εικόνων της συνθετικής ακολουθίας παρουσιάζονται στην *Εικόνα 24*.



Εικόνα 24 : Παραδείγματα εικόνων συνθετικής ακολουθίας που κατασκευάστηκε χρησιμοποιώντας το λογισμικό πακέτο Field II. Η εικόνα (A) αντιστοιχεί στη φάση διαστολής και η εικόνα (B) στη φάση συστολής

Η κίνηση τεσσάρων σημείων δύο στο πάνω τοίχωμα και δύο στο κάτω, εκ των οποίων το καθένα βρίσκεται στο όριο του τοιχώματος με τον αυλό και στο όριο του τοιχώματος με τον ιστό φαίνεται στην *Εικόνα 25*:



Εικόνα 25 : (πάνω) Σημεία των οποίων την κίνηση θα παρουσιάσουμε στο κάτω μέρος της εικόνας (κάτω) Η κίνηση τεσσάρων σημείων στην ακτινική και διαμήκη διεύθυνση σύμφωνα με το μαθηματικό μοντέλο που κατασκευάστηκε με χρήση πραγματικής εικόνας και του λογισμικού πακέτου Field II.

3.2 Πραγματικές εικόνες υπερήχων β-σάρωσης της καρωτίδας

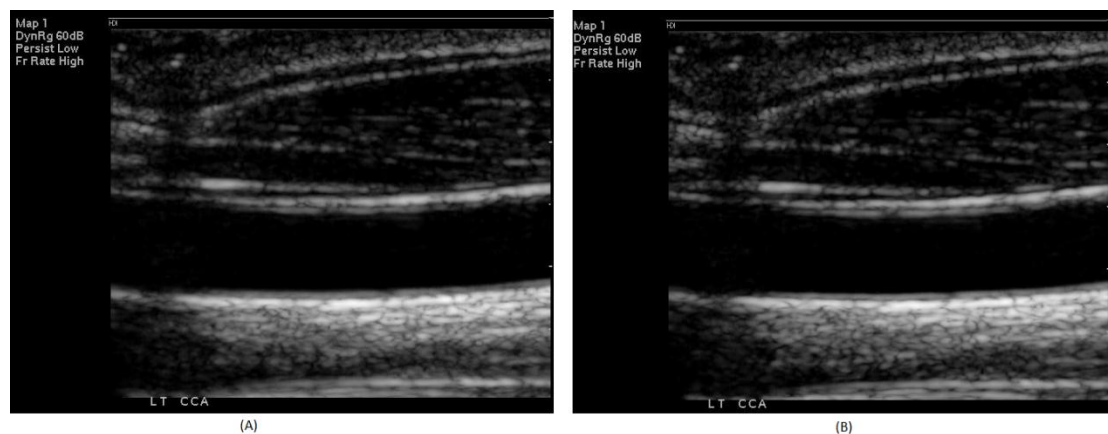
Οι ακολουθίες πραγματικών εικόνων καταγράφηκαν στο Irvine laboratory του St. Mary's Hospital στο Λονδίνο με ένα μηχάνημα υπερήχων ATL (Advanced Technology Laboratory) Ultramark 4 Duplex (Philips Medical Systems, Bothell, WA, USA) και γραμμική κεφαλή

υψηλής ανάλυσης με κεντρική συχνότητα 7.5 MHz. Οι ακολουθίες καταγράφηκαν με συχνότητα 25 Hz για διάρκεια περίπου 3 δευτερολέπτων (2-3 καρδιακοί κύκλοι).

Για την καταγραφή των εικόνων, οι εξεταζόμενοι τοποθετήθηκαν σε ύπτια θέση με ελαφριά κλίση του κεφαλιού προς τα πίσω. Για μεγαλύτερη ακρίβεια καταγραφής, ο χειριστής κρατούσε την κεφαλή του μηχανήματος υπερήχων με τα δύο χέρια και ο εξεταζόμενος κρατούσε την αναπνοή του όσο διαρκούσε η διαδικασία.

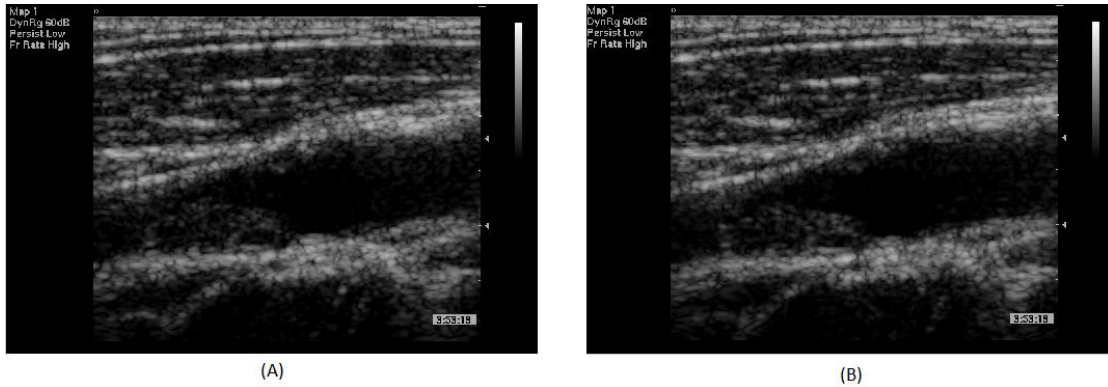
Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε μεγέθυνση των εικόνων υπερήχων σε ανάλυση 15.8 pixels/mm. Αυτός ο δείκτης βαθμονόμησης ήταν ο ίδιος και για τις δύο διευθύνσεις. Η πλευρική απόσταση μεταξύ των γραμμών ήταν 0.28 mm. Οι εικόνες μεταφέρθηκαν σε μαγνητικό δίσκο και καταγράφηκαν στη συνέχεια σε Compact Disk (CD). Τελικά, μεταφέρθηκαν σε προσωπικό υπολογιστή όπου και πραγματοποιήθηκε η επεξεργασία και η ανάλυση των ακολουθιών.

Η απεικόνιση της καρωτίδας πραγματοποιήθηκε σε διαμήκεις τομές ώστε να είναι δυνατή η μέτρηση τόσο της ακτινικής όσο και της διαμήκου μετατόπισης. Η κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των τοιχωμάτων θεωρήθηκε ότι αντιστοιχεί στη διάμετρο του αγγείου και η κίνηση σε σχέση με την κεφαλή του μηχανήματος θεωρήθηκε ως ακτινική κίνηση. Ως διαμήκης κίνηση θεωρήθηκε η κίνηση κάθετα στη δέσμη υπερήχων. Παραδείγματα των εικόνων της πραγματικής ακολουθίας παρουσιάζονται στην *Εικόνα 26*:



Εικόνα 26 : Παραδείγματα εικόνων ακολουθίας υπερήχων β-σάρωσης της καρωτίδας. Η εικόνα (A) αντιστοιχεί στη φάση διαστολής και η εικόνα (B) στη φάση συστολής

Επίσης, παρατίθενται και παραδείγματα εικόνων από την πραγματική ακολουθία εικόνων που αντιστοιχεί σε ασθενή με αθηρωμάτωση στην καρωτίδα (*Εικόνα 27*).



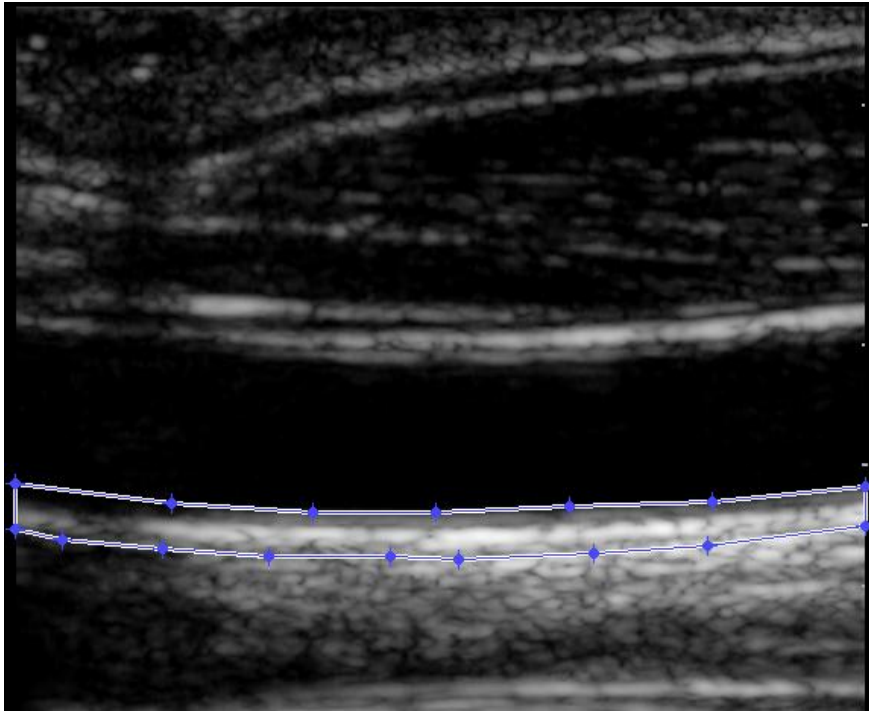
Εικόνα 27 : Παραδείγματα εικόνων ακολουθίας υπερήχων β-σάρωσης της καρωτίδας με αθηρωμάτωση. Η εικόνα (A) αντιστοιχεί στη φάση διαστολής και η εικόνα (B) στη φάση συστολής.

3.3 Υλοποίηση ελαστογραφίας

Η υλοποίηση της ελαστογραφίας πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον Matlab (The MathWorks, Natick, Massachusetts, USA) με χρήση εργαλείων από την εργαλειοθήκη επεξεργασίας εικόνας (image processing toolbox). Τα βασικά βήματα για την υλοποίηση αυτή περιλαμβάνουν την επιλογή των περιοχών ενδιαφέροντος, την ανάλυση της κίνησής τους με κατάλληλο αλγόριθμο και την απόδοση των αποτελεσμάτων με χρήση χρωματικού χάρτη.

3.3.1 Επιλογή περιοχών ενδιαφέροντος

Πρώτο βήμα της τεχνικής που αναπτύχθηκε είναι η επιλογή των σημείων των οποίων η κίνηση θα μελετηθεί. Συγκεκριμένα επιλέγεται μια περιοχή ενδιαφέροντος, κάθε σημείου της οποίας θα αναλυθεί η κίνηση από τον αντίστοιχο αλγόριθμο. Καταρχάς, πρέπει να σημειωθεί ότι στην παρούσα διπλωματική εργασία επιλέχθηκε η μελέτη της κίνησης να εστιαστεί στο κάτω τοίχωμα της καρωτίδας, του οποίου τα χαρακτηριστικά είναι περισσότερο ευδιάκριτα σε σχέση με το πάνω τοίχωμα [Wen91]. Για την απομόνωση της περιοχής ενδιαφέροντος του κάτω τοιχώματος με χειροκίνητο τρόπο, αξιοποιήθηκε η έτοιμη συνάρτηση του Matlab «roioly». Παράδειγμα χρήσης της συνάρτησης αυτής φαίνεται στην *Εικόνα 28*:

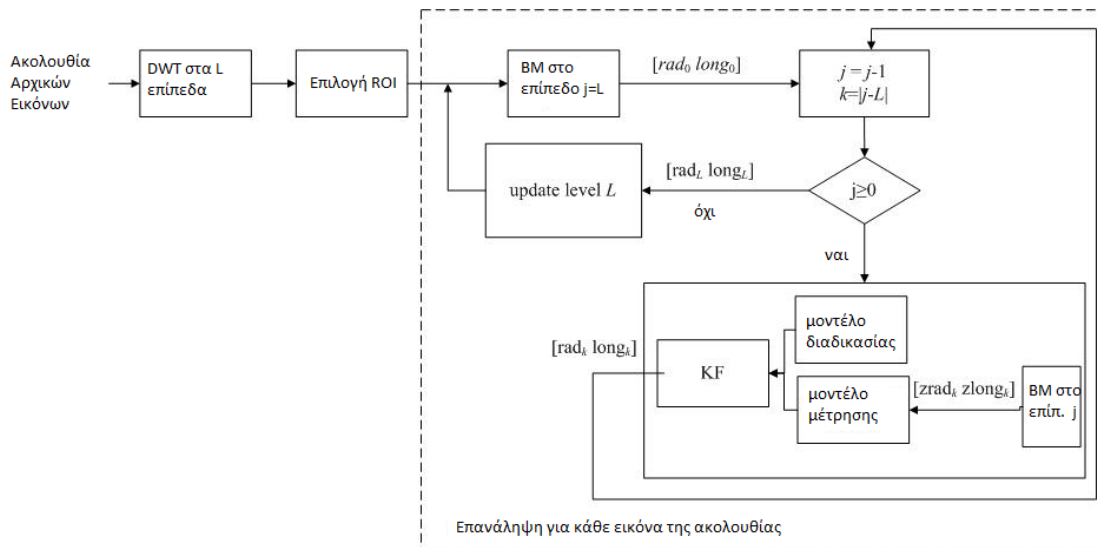


Εικόνα 28 : Χειροκίνητη επιλογή της περιοχής ενδιαφέροντος με τη βοήθεια της συνάρτησης "roioly"

Η περιοχή ενδιαφέροντος επιλέχθηκε στην πρώτη εικόνα της ακολουθίας των υπό ανάλυση εικόνων. Επίσης, λόγω της αυξημένης ανάγκης σε υπολογιστικούς πόρους καθώς και λόγω της επαναληψιμότητας των αποτελεσμάτων [Mau08] επιλέχθηκε να μελετηθεί η κίνηση των σημείων της περιοχής ενδιαφέροντος σε εικόνες που αντιστοιχούν σε διάρκεια ενός καρδιακού κύκλου. Για να γίνει εφικτό αυτό επιλέχθηκε ένα σημείο του κάτω τοιχώματος κοντά στο όριο τοιχώματος και αυλού του οποίου η κίνηση υπολογίστηκε για όλη την ακολουθία εικόνων, ώστε να απομονωθούν στη συνέχεια οι εικόνες που αντιστοιχούν σε έναν καρδιακό κύκλο.

3.3.2 Ανάλυση κίνησης

Για την ανάλυση της κίνησης των σημείων της περιοχής ενδιαφέροντος αλλά και του σημείου στο όριο αυλού τοιχώματος που αναφέραμε πιο πάνω επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί ο αλγόριθμος που περιγράφεται στην εργασία [Gas11]. Ακολουθεί το διάγραμμα ροής του (Εικόνα 29):



Εικόνα 29 : Διάγραμμα ροής αλγορίθμου πολυκλιμακμακωτής ταύτισης περιοχών βασισμένης στο φίλτρο Kalman [Gas11]

Ο αλγόριθμος αυτός είναι μια πολυκλιμακωτή έκδοση του αλγορίθμου ταύτισης περιοχών, η οποία αξιοποιεί το φίλτρο Kalman προκειμένου να συνδυάσει τις εκτιμήσεις κίνησης διαδοχικών επιπέδων ανάλυσης σε μία εκτίμηση σαν έναν μη γραμμικό συνδυασμό τους.

Τα βήματα που ακολουθεί ο αλγόριθμος είναι τα παρακάτω:

1. Διακριτός μετασχηματισμός κυματιδίου (DWT) στα L επίπεδα: Οι εικόνες της ακολουθίας αποσυντίθενται έως και σε L επίπεδα χρησιμοποιώντας το διακριτό μετασχηματισμό κυματιδίου. Το χαμηλότερο επίπεδο αποσύνθεσης αντιστοιχεί στην υψηλότερη ανάλυση εικόνας (αρχική εικόνα), ενώ το υψηλότερο επίπεδο αποσύνθεσης αντιστοιχεί στην χαμηλότερη ανάλυση εικόνας.
2. Επιλογή περιοχής ενδιαφέροντος: Μία περιοχή ενδιαφέροντος λαμβάνεται ως είσοδος του αλγορίθμου. Θεωρώντας ότι το μέγεθος των εικόνων χαμηλότερης ανάλυσης στο επίπεδο j είναι το διπλάσιο από ότι στο επίπεδο (j+1), η θέση των σημείων της περιοχής ενδιαφέροντος μπορεί να βρεθεί πολλαπλασιάζοντας τη θέση του στην αρχική εικόνα με έναν παράγοντα 2^{-L} και στη συνέχεια στρογγυλοποιώντας το αποτέλεσμα.

Τα βήματα (3)-(5) επαναλαμβάνονται για κάθε εικόνα της ακολουθίας:

3. Ταύτιση περιοχών (BM) στο επίπεδο j=L: Η ταύτιση περιοχών χρησιμοποιείται αρχικά στο υψηλότερο επίπεδο αποσύνθεσης εικόνας L και υπολογίζονται οι ακτινικές (rad_0) και διαμήκεις ($long_0$) θέσεις των σημείων της περιοχής ενδιαφέροντος.
4. Μετάβαση από χαμηλή ανάλυση σε υψηλή ανάλυση: Για κάθε χαμηλότερο επίπεδο αποσύνθεσης εικόνας j, με $0 \leq j < L$, θεωρείται ότι οι θέσεις του κάθε σημείου στόχου ($rad_k, long_k$ με $k = |j - L|$) σχετίζονται με τις εκτιμώμενες θέσεις τους

$(rad_{k-1}, long_{k-1})$ στην εικόνα του προηγούμενου επιπέδου (υψηλότερη αποσύνθεση) σύμφωνα με την εξίσωση (3.10). Μετά μετρήσεις των $rad_k, long_k$ ($zrad_k, zlong_k$, από εξίσωση (3.11)) προκύπτουν με την εφαρμογή ταύτισης περιοχών στο επίπεδο j , σε ένα παράθυρο αναζήτησης γύρω από τις θέσεις $rad_{k-1}, long_{k-1}$ πολλαπλασιασμένες με έναν παράγοντα του 2. Το φίλτρο Kalman στη συνέχεια, συνδυάζει τα ορισμένα μοντέλα διαδικασίας και μετρήσεων για να παράγει τις εκτιμήσεις για τα $rad_k, long_k$

$$\begin{bmatrix} rad_k \\ long_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} rad_{k-1} \\ long_{k-1} \end{bmatrix} + w_k \quad (3.10)$$

$$\begin{bmatrix} zrad_k \\ zlong_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} rad_k \\ long_k \end{bmatrix} + v_k \quad (3.11)$$

Το βήμα αυτό τελικώς για $j=0$ οδηγεί στον υπολογισμό των rad_L και $long_L$, που αντιστοιχούν στις τελικές εκτιμήσεις κίνησης στο χαμηλότερο επίπεδο αποσύνθεσης της τρέχουσας εικόνας.

5. Ανανέωση επιπέδου L: Μετά τη διαδικασία που περιγράφεται στο βήμα (2), οι αρχικές εκτιμήσεις $rad_0, long_0$ ανανεώνονται ύστερα από κατάλληλη κλιμάκωση των θέσεων $rad_L, long_L$. Αυτό το βήμα είναι απαραίτητο για την υλοποίηση του βήματος (3) για την επόμενη εικόνα, επειδή η έρευνα για το καλύτερα ταιριασμένο σημείο βασίζεται στο καλύτερα ταιριασμένο σημείο της προηγούμενης εικόνας.

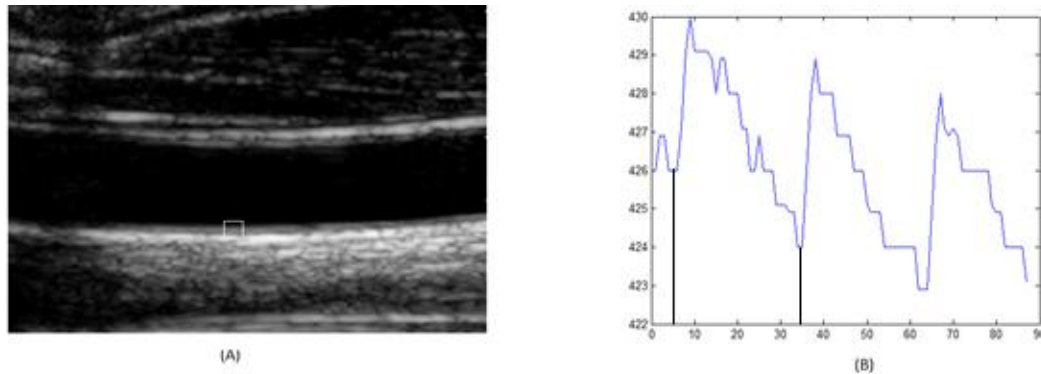
Ο παραπάνω αλγόριθμος εκτιμά την κίνηση των σημείων της περιοχής ενδιαφέροντος που του δίδεται σαν είσοδος λειτουργώντας από χαμηλότερες αναλύσεις εικόνας σε υψηλότερες, ενώ η απόδοση του εξαρτάται από τις παραμέτρους της ταύτισης περιοχών, του διακριτού μετασχηματισμού κυματιδίου καθώς και του φίλτρου Kalman.

Στην παρούσα εργασία σημειώνεται ότι οι παραπάνω τιμές καθορίστηκαν με βάση τις προτεινόμενες τιμές στην εργασία [Gas11]. Επίσης σημειώνεται ότι το μέγεθος της περιοχής αναφοράς λήφθηκε στα 25×27 εικονοστοιχεία. Ο παραπάνω αλγόριθμος χρησιμοποιήθηκε υλοποιημένος σε προγραμματιστικό περιβάλλον Matlab προσαρμοσμένος κατάλληλα ώστε να δέχεται ως είσοδο τις περιοχές σημείων ενδιαφέροντος που επιλέγονται με την έτοιμη συνάρτηση «coiroly». Η μελέτη της κίνησης γίνεται με βάση τους άξονες και τις διευθύνσεις που φαίνονται στην *Εικόνα 30*:

Εικόνα 30: Σύστημα αξόνων στο οποίο δουλεύει ο αλγόριθμος εκτίμησης κίνησης [Gas10]

Συνεπώς, με βάση τους παραπάνω άξονες καθορίστηκαν οι θετικές και οι αρνητικές φορές της κίνησης των σημείων που μελετήθηκαν. Ως σημείο αναφοράς θεωρήθηκε το εικονοστοιχείο στην πάνω αριστερά γωνία της εικόνας.

Όπως αναφέραμε στην προηγούμενη ενότητα για να περιοριστεί η ανάλυση κίνησης της περιοχής ενδιαφέροντος στις εικόνες που αντιστοιχούν σε διάρκεια ενός καρδιακού κύκλου, επιλέχθηκε ένα σημείο κοντά στο όριο τοιχώματος αυλού και μελετήθηκε η ακτινική συνιστώσα της κίνησης του. Στη συνέχεια, με βάση την κυματομορφή της θέσης του συναρτήσει των εικόνων επιλέχθηκε η υπό-ακολουθία εικόνων που αντιστοιχεί σε έναν καρδιακό κύκλο. Παράδειγμα της διαδικασίας αυτής φαίνεται στην *Εικόνα 31*:



Εικόνα 31 : Απομόνωση εικόνων που αντιστοιχούν σε έναν καρδιακό κύκλο. (Α) Σημείο που επιλέχθηκε και (Β) κυματομορφή ακτινικής θέσης του σημείου και απομόνωση ενός καρδιακού κύκλου

Στην παραπάνω εικόνα γίνεται αντιληπτό λόγω της περιοδικότητας ότι έχουν αποτυπωθεί τρεις περίπου καρδιακοί κύκλοι συνεπώς επιλέγεται ένας για να μελετηθεί. Στη συνέχεια, μελετάται η κίνηση των σημείων της περιοχής ενδιαφέροντος στην υπό-ακολουθία εικόνων που επιλέχθηκε και εξάγονται κυματομορφές τόσο για την ακτινική όσο και τη διαμήκη θέση τους.

3.3.3 Απεικόνιση ελαστικών ιδιοτήτων

Έχοντας τα αποτελέσματα από την ανάλυση κίνησης των σημείων της περιοχής ενδιαφέροντος είναι δυνατόν πλέον να κατασκευαστεί το ελαστογράφημα. Έστω i είναι η πρώτη εικόνα και j η δεύτερη τότε με βάση τις παρακάτω σχέσεις υπολογίζονται για κάθε σημείο της περιοχής ενδιαφέροντος οι ποσότητες που θα απεικονιστούν στο ελαστογράφημα:

$$\begin{aligned} & \text{Ακτινική Μετατόπιση}(\text{σημείο}, \text{Εικόνα } i, j) \\ &= \text{Ακτινική Θέση}(\text{σημείο}, j) - \text{Ακτινική Θέση}(\text{σημείο}, i) \quad (3.12) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{Διαμήκης Μετατόπιση}(\text{σημείο}, i, j) \\ &= \text{Διαμήκης Θέση}(\text{σημείο}, j) - \text{Διαμήκης Θέση}(\text{σημείο}, i) \quad (3.13) \end{aligned}$$

Δηλαδή, γνωρίζοντας τη θέση καθενός σημείου της περιοχής ενδιαφέροντος σε κάθε εικόνα της ακολουθίας υπολογίζεται η μετατόπιση του σημείου μεταξύ των επιλεγμένων εικόνων αφαιρώντας από τη θέση του (είτε στην ακτινική είτε στη διαμήκη διεύθυνση) στην τελευταία

εικόνα την αντίστοιχη θέση του στην πρώτη. Στη συνέχεια, επαναλαμβάνεται ο παραπάνω υπολογισμός για όλα τα σημεία της περιοχής ενδιαφέροντος.

Έχοντας υπολογίσει τις παραπάνω μετατοπίσεις στις δύο διευθύνσεις είναι δυνατός ο υπολογισμός της μηχανικής καταπόνησης (strain) του τοιχώματος. Με βάση τα όσα αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 2 οι σχέσεις με τη βοήθεια των οποίων υπολογίζεται η μηχανική καταπόνηση κάθε σημείου είναι οι παρακάτω:

$$\begin{aligned} & \text{ΑκτινικήΚαταπόνηση(σημείο, Εικόνα } i, j) \\ &= \frac{\text{ΑκτινικήΜετατόπιση(σημείο, Εικόνα } i, j)}{\text{ΑκτινικήΘέση(σημείο, } i)} \quad (3.14) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{ΔιαμήκηςΚαταπόνηση(σημείο, Εικόνα } i, j) \\ &= \frac{\text{ΔιαμήκηςΜετατόπιση(σημείο, Εικόνα } i, j)}{\text{ΔιαμήκηςΘέση(σημείο, } i)} \quad (3.15) \end{aligned}$$

Στη συνέχεια, οι παραπάνω καταπονήσεις πολλαπλασιάζονται επί 100 ώστε να παρουσιαστούν ως επί τοις εκατό (%) ποσοστά. Με τη βοήθεια, λοιπόν, των παραπάνω σχέσεων υπολογίζονται όλες οι ποσότητες που θα απεικονιστούν στο ελαστογράφημα, το οποίο είναι και το επόμενο βήμα. Εφόσον έχει υπολογιστεί η μηχανική καταπόνηση για κάθε σημείο της περιοχής ενδιαφέροντος κατασκευάζονται δύο ελαστογραφήματα (ένα για την ακτινική και ένα για τη διαμήκη διεύθυνση). Σε αυτά απεικονίζονται τα σημεία της περιοχής ενδιαφέροντος κατάλληλα χρωματισμένα με βάση κάποιο χρωματικό χάρτη σύμφωνα με την τιμή της καταπόνησης που παρουσιάζουν. Συγκεκριμένα στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε η χρωματική κλίμακα “jet” του Matlab για να αποδώσει τις τιμές της καταπόνησης. Η χρωματική αυτή κλίμακα κυμαίνεται από μπλε σε κόκκινο χρώμα περνώντας από τα χρώματα κυανό, κίτρινο, και πορτοκαλί. Στα ελαστογραφήματα που ακολουθούν χρώματα πιο κοντά στο κόκκινο αντιστοιχούν σε σχετικά μεγαλύτερες θετικές καταπονήσεις ενώ τα χρώματα πλησιέστερα στο μπλε χρώμα αντιστοιχούν σε σχετικά μεγαλύτερες κατά απόλυτη τιμή αλλά με αρνητικό πρόσημο καταπονήσεις.

Τέλος, η περιοχή ενδιαφέροντος του ελαστογραφήματος περνά από κατάτμηση και υπερτίθεται πάνω στην πρώτη από τις δύο εικόνες υπερήχων, ώστε να δοθεί μια πιο εποπτική εικόνα της μηχανικής συμπεριφοράς του τοιχώματος της αρτηρίας.

4

Αποτελέσματα

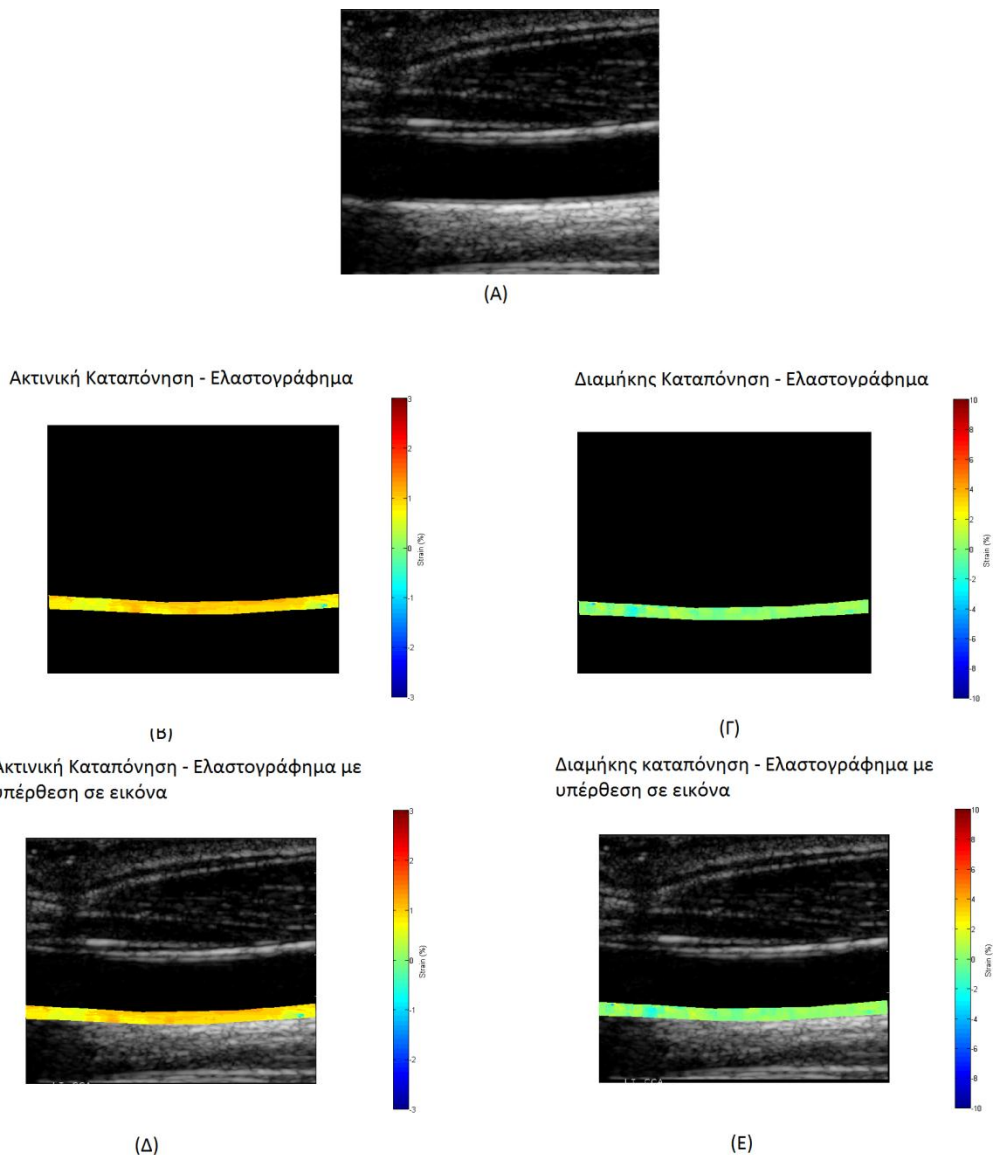
Στο κεφάλαιο που ακολουθεί παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής των τεχνικών ελαστογραφίας που διερευνήθηκαν στα πλαίσια της εργασίας. Αρχικά, γίνεται αναφορά στα στάδια στα οποία χωρίστηκε η διαδικασία κατασκευής ελαστογραφημάτων καθώς και στις χρονικές απαιτήσεις τους. Στη συνέχεια, παρατίθενται κάποια αντιπροσωπευτικά ελαστογραφήματα, τα οποία κατασκευάστηκαν αξιοποιώντας τις συνθετικές ακολουθίες. Επίσης, η τεχνική ελαστογραφίας εφαρμόζεται και σε πραγματικές ακολουθίες εικόνων που προέρχονται από υγιή άτομα. Τέλος, εξετάζεται η χρήση της τεχνικής αυτής και σε δύο ακολουθίες εικόνων από άτομα με αθηρωμάτωση στην καρωτίδα.

4.1 Στάδια και υπολογιστικό κόστος της κατασκευής

ελαστογραφήματος

Η τεχνική κατασκευής ελαστογραφήματος που περιγράφηκε στα προηγούμενα κεφάλαια υλοποιήθηκε και εκτελέστηκε σε φορητό προσωπικό υπολογιστή με λειτουργικό σύστημα Microsoft Windows 7 32-bit, επεξεργαστή Intel(R) Core(TM) 2 Duo CPU T7500 στα 2.20 GHz και 2.00 GB μνήμη RAM. Για να επιτευχθεί καλύτερη εποπτεία της λειτουργίας της, χωρίστηκε σε δύο στάδια. Το πρώτο στάδιο, το οποίο έχει και τις μεγαλύτερες απαιτήσεις σε μνήμη και χρόνο, περιλαμβάνει τον υπολογισμό της κίνησης όλων των σημείων της περιοχής ενδιαφέροντος στις εικόνες της ακολουθίας που επιλέχθηκαν. Στη συνέχεια, ακολουθεί το

δεύτερο στάδιο το οποίο είναι ένα στάδιο επεξεργασίας των αποτελεσμάτων της πρώτης φάσης που οδηγεί στην κατασκευή του ελαστογραφήματος. Το στάδιο αυτό λαμβάνει ως είσοδο τα αποτελέσματα της εκτίμησης κίνησης, καθώς και τις εικόνες μεταξύ των οποίων υπολογίζεται το ελαστογράφημα. Στη συνέχεια, εξάγει τις μηχανικές καταπονήσεις των σημείων της περιοχής ενδιαφέροντος, τις αποδίδει με κατάλληλη χρωματική κλίμακα στα αντίστοιχα σημεία της περιοχής ενδιαφέροντος και τελικά υπερθέτει την χρωματισμένη περιοχή πάνω στην πρώτη από τις δύο εικόνες ανάμεσα στις οποίες υπολογίστηκε το ελαστογράφημα. Σχηματική απεικόνιση της λειτουργίας του σταδίου αυτού δίδεται στην *Εικόνα 32*.

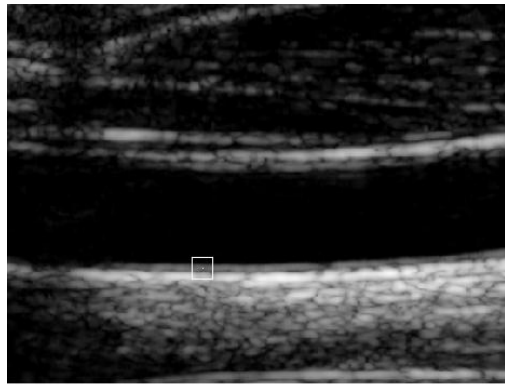


Εικόνα 32 : Σχηματική απεικόνιση του σταδίου επεξεργασίας δεδομένων κίνησης και εξαγωγής ελαστογραφήματος μεταξύ δύο εικόνων κατά τη διάρκεια της διαστολής της καρωτίδας

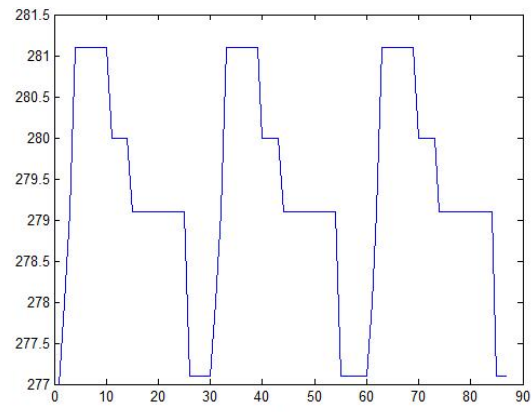
Επίσης, κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης των δύο παραπάνω σταδίων μετρήθηκε ο χρόνος ολοκλήρωσής τους. Συγκεκριμένα, για όλες τις περιπτώσεις ακολουθιών ο χρόνος ολοκλήρωσης και των δύο σταδίων υπολογίστηκε κατά μέσο όρο στις 4 ώρες. Ωστόσο, αυτό που παρατηρήθηκε είναι ότι το σχεδόν όλο το χρονικό διάστημα αυτό το καταλαμβάνει ο υπολογισμός της κίνησης των σημείων της περιοχής ενδιαφέροντος στις εικόνες που επιλέχθηκαν. Το δεύτερο στάδιο δεν απαιτεί πάνω από μερικά δευτερόλεπτα αναλόγως βέβαια και με το πόσα ελαστογραφήματα καλείται να κατασκευάσει. Ο χρόνος ολοκλήρωσης του πρώτου σταδίου μεταβάλλεται με τη μεταβολή δύο παραμέτρων: του μεγέθους της περιοχής ενδιαφέροντος και του πλήθους των εικόνων. Ειδικότερα στην περίπτωση των συνθετικών εικόνων FIELD II, οι οποίες είναι σημαντικά μικρότερες σε μέγεθος, παρατηρήθηκε πτώση του χρόνου ολοκλήρωσης του πρώτου σταδίου στις 3 ώρες. Επίσης, ο χρόνος ολοκλήρωσης μειώνεται σημαντικά με τον περιορισμό των εικόνων στις οποίες θα μελετηθεί η κίνηση των σημείων της περιοχής ενδιαφέροντος. Ο περιορισμός των εικόνων αυτών πολλές φορές επιβάλλεται και λόγω των πολύ υψηλών απαιτήσεων σε μνήμη που συνεπάγεται η μελέτη της κίνησης πλήθους σημείων σε μεγάλο αριθμό εικόνων.

4.2 Ελαστογραφήματα από συνθετικές ακολουθίες εικόνων

Τα πρώτα ελαστογραφήματα που εξήχθησαν με την παραπάνω τεχνική ήταν εκείνα για τις ακολουθίες συνθετικών εικόνων που κατασκευάστηκαν με τη χρήση πραγματικής εικόνας και διαφορετικών επιπέδων θορύβου. Συγκεκριμένα μελετάται η κίνηση του κάτω τοιχώματος στην ακτινική και τη διαμήκη διεύθυνση και στη συνέχεια παρατίθενται χαρακτηριστικά ελαστογραφήματα για τις συνθετικές ακολουθίες εικόνων διαφορετικών επιπέδων θορύβου Synthetic, Synthetic25, Synthetic15. Εφόσον οι εικόνες αυτές βασίζονται στο ίδιο μαθηματικό μοντέλο κίνησης, για να βρούμε τις εικόνες της ακολουθίας στις οποίες θα εργαστούμε αρκεί να επιλέξουμε ένα σημείο στο όριο αυλού και τοιχώματος στη συνθετική ακολουθία χωρίς θόρυβο και να βρούμε την κυματομορφή της ακτινικής κίνησης του (*Εικόνα 33*):



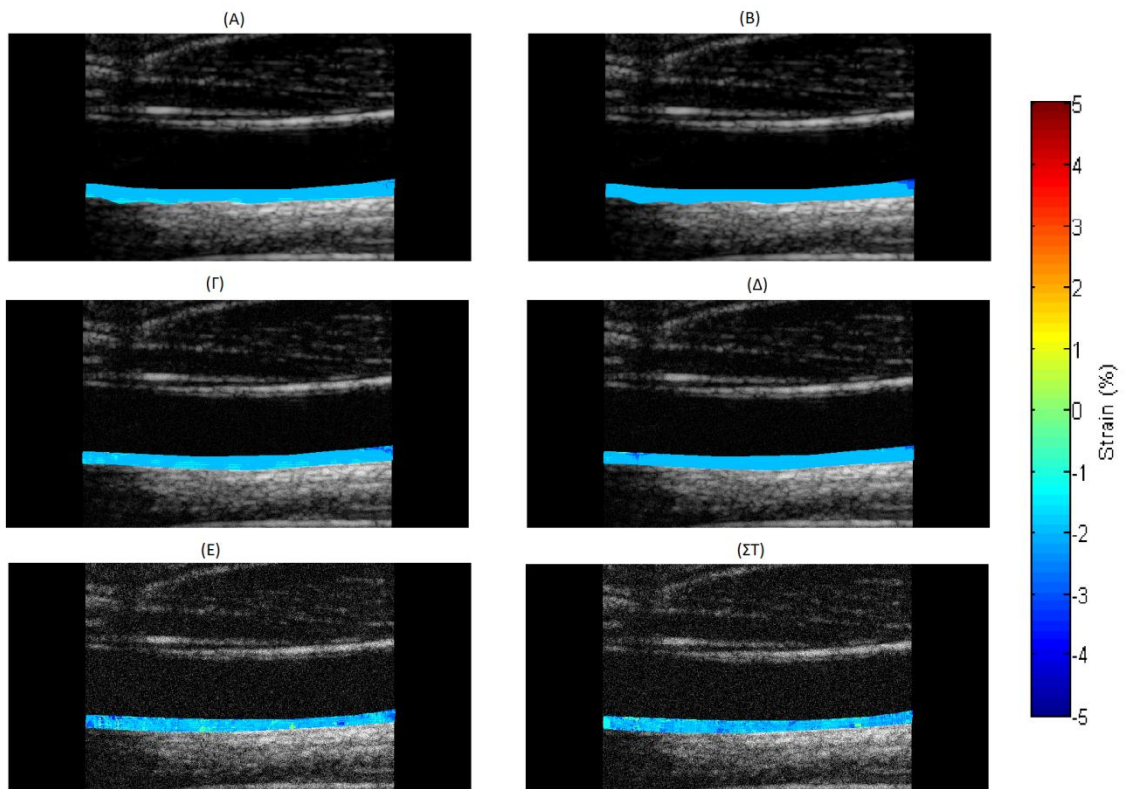
(A)



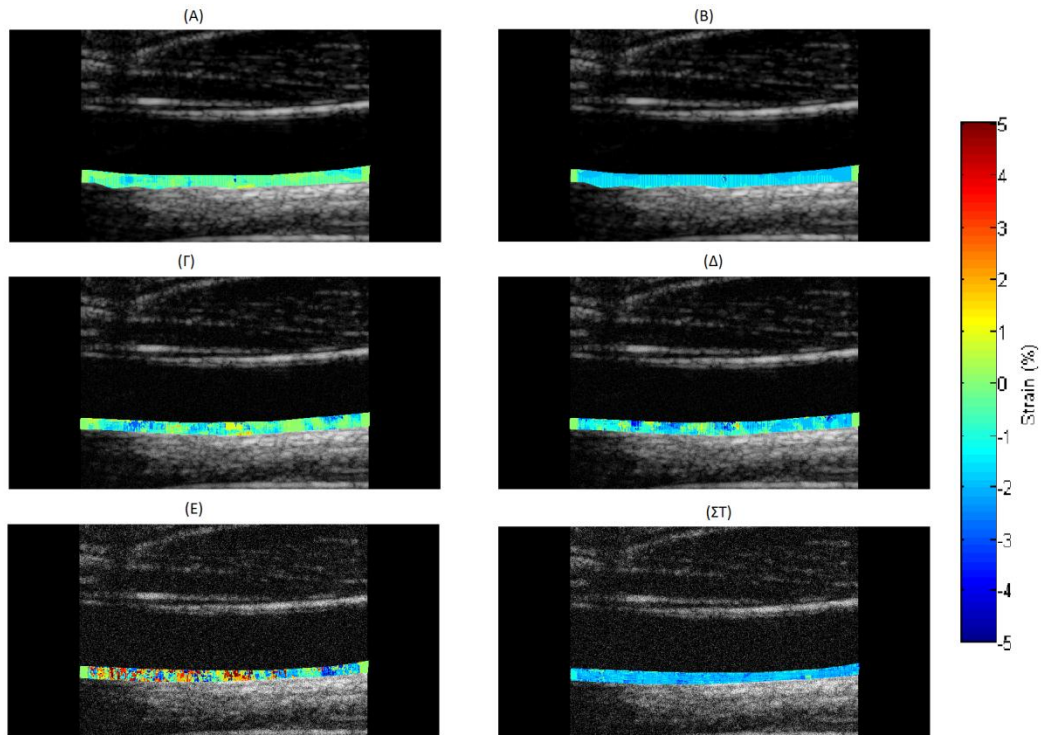
(B)

Εικόνα 33 : (A) Σημείο στο σύνορο αυλού - τοιχώματος που επιλέχθηκε (B) Ακτινική κίνηση του σημείου

Με βάση την παραπάνω εικόνα (*Εικόνα 33*) απομονώνουμε τον πρώτο καρδιακό κύκλο ο οποίος περιλαμβάνει τις εικόνες της ακολουθίας 1 έως και 30. Στη συνέχεια παρατίθενται ελαστογραφήματα (ακτινικής και διαμήκουσ κίνησης) μεταξύ μιας εικόνας στην αρχή της διαστολής της καρωτίδας (εικόνα 7 της ακολουθίας) και μίας εικόνας στο μέσον της διαστολής (εικόνα 17 της ακολουθίας) καθώς και μεταξύ της εικόνας στο μέσον της διαστολής και μιας εικόνας στο τέλος της διαστολής (εικόνα 27 της ακολουθίας). Έτσι, προκύπτουν 4 ελαστογραφήματα για κάθε συνθετική ακολουθία, τα οποία παρατίθενται στις παρακάτω εικόνες (*Εικόνα 34, Εικόνα 35*) :

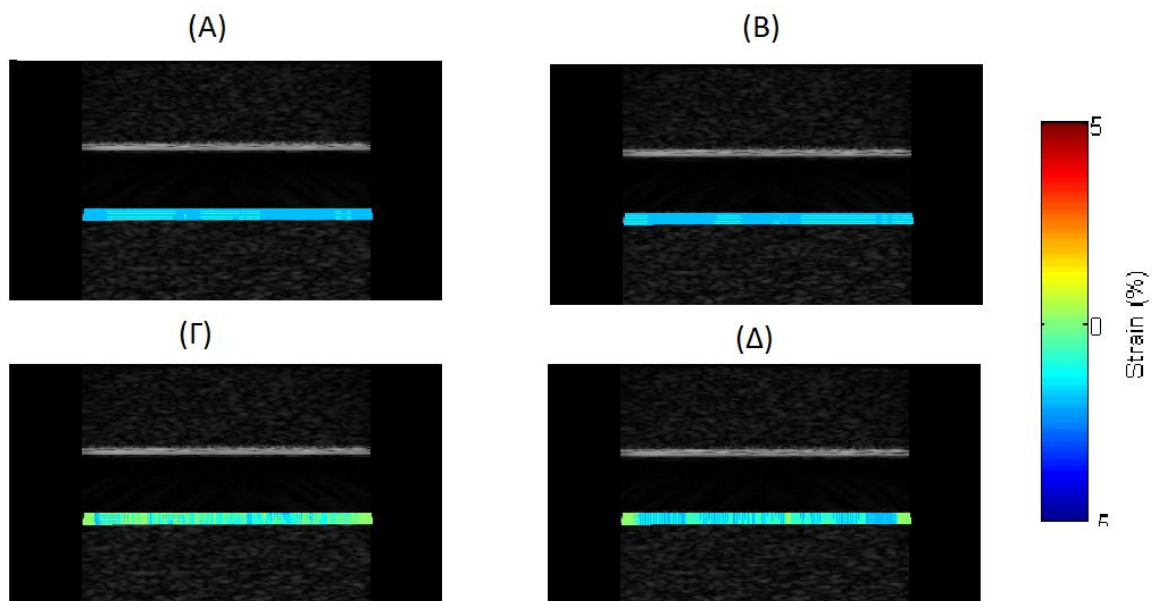


Εικόνα 34 : Ελαστογραφήματα ακτινικής κίνησης (Α)-(Β) για την συνθετική ακολουθία εικόνων Synthetic μεταξύ των εικόνων 7-17 και 17-27 αντίστοιχα (Γ)-(Δ) για την συνθετική ακολουθία εικόνων Synthetic25 μεταξύ των εικόνων 7-17 και 17-27 αντίστοιχα και (Ε)-(ΣΤ) για την συνθετική ακολουθία εικόνων Synthetic15 μεταξύ των εικόνων 7-17 και 17-27 αντίστοιχα.



Εικόνα 35 : Ελαστογραφήματα διαμήκους κίνησης (Α)-(Β) για την συνθετική ακολουθία εικόνων Synthetic μεταξύ των εικόνων 7-17 και 17-27 αντίστοιχα (Γ)-(Δ) για την συνθετική ακολουθία εικόνων Synthetic25 μεταξύ των εικόνων 7-17 και 17-27 αντίστοιχα και (Ε)-(ΣΤ) για την συνθετική ακολουθία εικόνων Synthetic15 μεταξύ των εικόνων 7-17 και 17-27 αντίστοιχα.

Στη συνέχεια τα αντίστοιχα αποτελέσματα από την συνθετική ακολουθία Field είναι τα παρακάτω(Εικόνα36):



Εικόνα 36 : Ελαστογραφήματα μεταξύ των εικόνων 7-17 και 17-27 (Α)-(Β) ακτινικής (Γ)-(Δ) διαμήκους κίνησης.

Στα παραπάνω παρατηρείται πως η προσθήκη θορύβου επιδρά στην εκτίμηση κίνησης του αρτηριακού τοιχώματος. Συγκεκριμένα, γίνεται αντιληπτό ότι αυξάνει το σφάλμα στην εκτίμηση κίνησης του αρτηριακού τοιχώματος με αποτέλεσμα στις εικόνες με μεγαλύτερο θόρυβο να παρατηρείται πιο έντονη και ανομοιογενής κίνηση του τοιχώματος. Η παραπάνω παρατήρηση γίνεται ιδιαίτερα αντιληπτή στην περίπτωση της διαμήκου κίνησης, στην οποία καθώς είναι ήδη δύσκολο να ανιχνευθεί η κίνηση στον διαμήκη άξονα λόγω της μεγάλης «οριζόντιας» ομοιογένειας του τοιχώματος, πιθανή ενίσχυση των επιπέδων θορύβου προκαλεί σημαντικό θόρυβο και στα αποτελέσματα ανάλυσης κίνησης.

Επίσης, γίνεται αντιληπτό στην περίπτωση της ακτινικής κίνησης ότι τα ελαστογραφήματα μεταξύ των εικόνων 7-17 και 17-27 για κάθε ακολουθία εικόνων είναι σχετικά όμοια μεταξύ τους. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι εφόσον η εικόνα 17 αντιστοιχεί στο μέσον περίπου της διαστολής, η ακτινική μετατόπιση των σημείων μεταξύ της αρχής και του μέσου της διαστολής είναι ίση περίπου με την ακτινική μετατόπιση μεταξύ του μέσου της διαστολής και του τέλους της.

Αντίθετα στην περίπτωση της διαμήκου κίνησης παρατηρείται ότι στην πρώτη περίπτωση (μεταξύ των εικόνων 7-17) η κίνηση είναι κοντά στο μηδέν στη δεύτερη περίπτωση (μεταξύ των εικόνων 17-27) παρατηρείται σημαντική κίνηση προς τα αριστερά (αντίθετη κατεύθυνση από τον άξονα διαμήκου κίνησης).

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στο πρόσημο των αποτελεσμάτων καθώς και στο τι αντιπροσωπεύει αυτό για την κίνηση των σημείων σύμφωνα και με το σύστημα αξόνων που έχει οριστεί στο προηγούμενο κεφάλαιο. Συγκεκριμένα εφόσον αναλύεται η κίνηση των σημείων του κάτω τοιχώματος, όσον αφορά στην ακτινική κίνηση χρειάζεται προσοχή διότι θετικό πρόσημο στην καταπόνηση σημαίνει ότι παρατηρείται μετατόπιση του σημείου κατά τη φορά του ακτινικού άξονα (δηλαδή προς τα κάτω). Επομένως, αν και τα υπόλοιπα σημεία του κάτω τοιχώματος έχουν αντίστοιχη συμπεριφορά τότε το κάτω τοίχωμα απομακρύνεται από το πάνω, ο αυλός «ανοίγει» και κατά συνέπεια η αρτηρία βρίσκεται σε φάση συστολής. Αντίστοιχα, όταν το πρόσημο είναι αρνητικό τότε το κάτω τοίχωμα πλησιάζει στο πάνω, «κλείνει» ο αυλός, και κατά συνέπεια παρατηρείται διαστολή της αρτηρίας. Στα παραπάνω αποτελέσματα ακτινικής κίνησης παρατηρούνται κυρίως αρνητικά αποτελέσματα, γεγονός που είναι λογικό αφού οι τα ελαστογραφήματα έχουν εξαχθεί κατά τη διάρκεια της διαστολής.

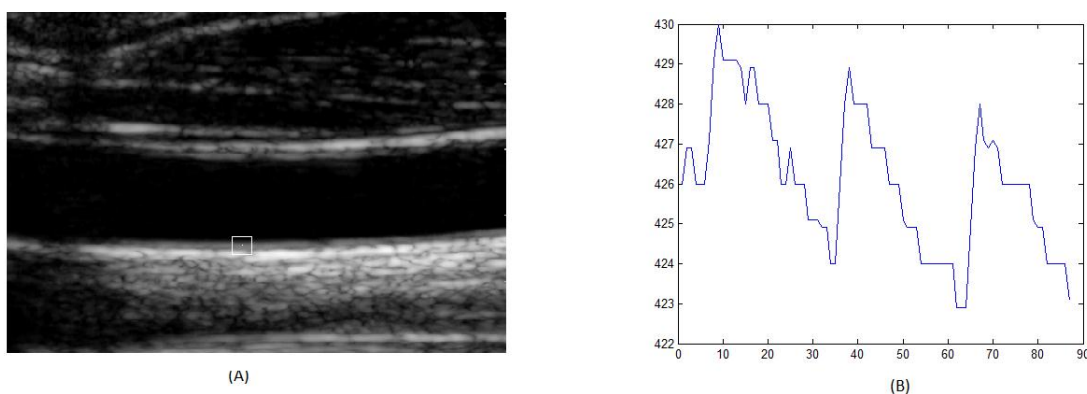
4.3 Ελαστογραφήματα από πραγματικές ακολουθίες εικόνων

υγιών ατόμων

Σε αυτήν την ενότητα της διπλωματικής παρατίθενται τα ελαστογραφήματα που προέκυψαν από τη μελέτη της κίνησης του κάτω τοιχώματος της καρωτίδας από πραγματικές ακολουθίες εικόνων που αντιστοιχούν σε υγιείς εξεταζόμενους.

Επειδή στη συνέχεια παρουσιάζεται ένας μεγάλος αριθμός ελαστογραφημάτων, αξίζει να σημειωθεί ότι σε όλα τα ελαστογραφήματα που προέρχονται από την ίδια ακολουθία εικόνων επιλέχθηκε να παρουσιάζεται η ίδια μάσκα – περιοχή ενδιαφέροντος κατάλληλα χρωματισμένη πάνω στην εκάστοτε εικόνα. Αυτή η επιλογή στηρίχθηκε στο γεγονός ότι κατά τη μελέτη της κίνησης του αρτηριακού τοιχώματος παρατηρήθηκε ότι η κίνηση των σημείων των περιοχών ενδιαφέροντος και ειδικότερα των σημείων του κάτω τοιχώματος είναι γενικά μικρότερη από το πάχος του τοιχώματος, ακριβώς όπως έχει παρατηρηθεί και στην εργασία [Mau08]. Ειδικότερα, η περιοχή αυτή θα είναι εκείνη η περιοχή ενδιαφέροντος που επιλέχθηκε πάνω στην πρώτη εικόνα και η οποία δόθηκε ως είσοδος στον αλγόριθμο εκτίμησης κίνησης.

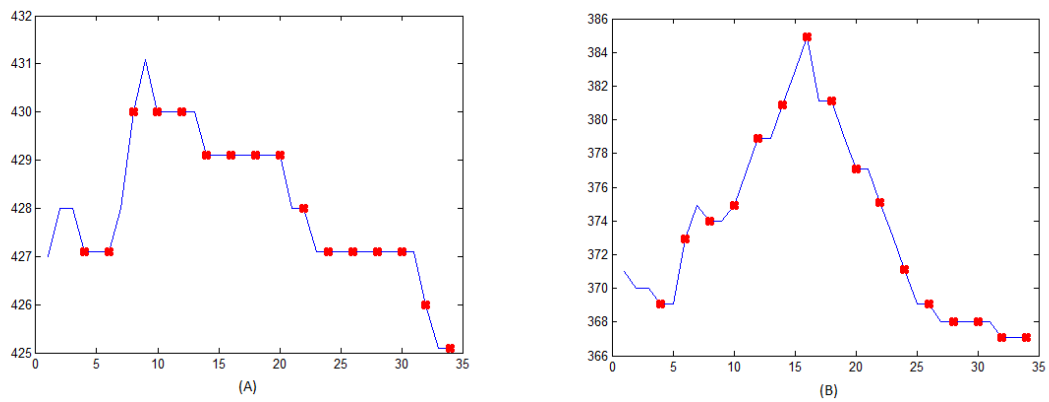
Καταρχάς, η πρώτη ακολουθία εικόνων η οποία εξετάστηκε είναι η GPL. Αρχικά λήφθηκε ένα σημείο στο όριο του τοιχώματος – αυλού και εξετάστηκε η ακτινική του κίνηση προκειμένου να απομονωθούν οι εικόνες που αντιστοιχούν σε έναν καρδιακό κύκλο (Εικόνα 37).



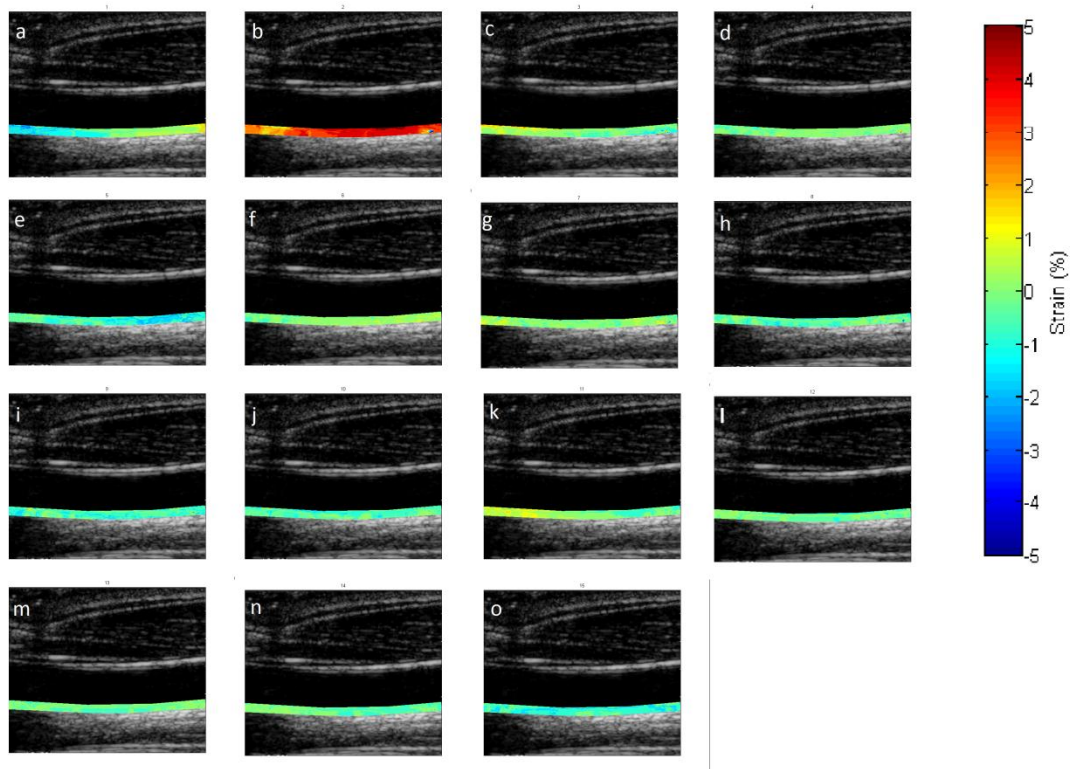
Εικόνα 37 : (A) Σημείο του οποίου η ακτινική κίνηση εξετάστηκε για όλη την ακολουθία εικόνων GPL (B) Ακτινική κίνηση του σημείου στο (A)

Συνεπώς με βάση την παραπάνω εικόνα επιλέχθηκαν οι εικόνες 4 έως 34. Στη συνέχεια, μελετάται η κίνηση των σημείων του κάτω τοιχώματος για τις παραπάνω εικόνες της ακολουθίας GPL και τελικά εξάγονται τα ελαστογραφήματα (Εικόνα 39, Εικόνα 40) των

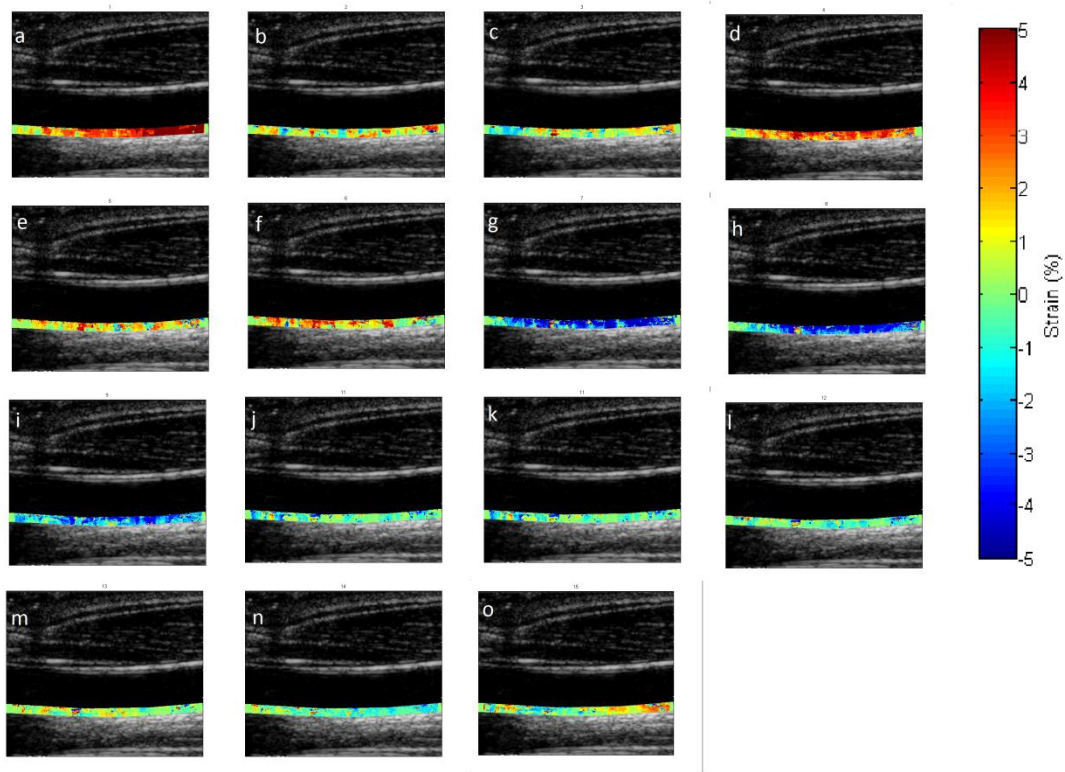
παρακάτω εικόνων για τις εικόνες που έχουν σημειωθεί στην παρακάτω κυματομορφή ακτινικής κίνησης ενός χαρακτηριστικού σημείου κοντά στο όριο αυλού – τοιχώματος (Εικόνα 38):



Εικόνα 38 : (A) Ακτινική και (B) διαμήκης θέση χαρακτηριστικού σημείου τοιχώματος για την ακολουθία εικόνων GPL. Έχουν σημειωθεί οι εικόνες μεταξύ των οποίων εξάγονται ελαστογραφήματα

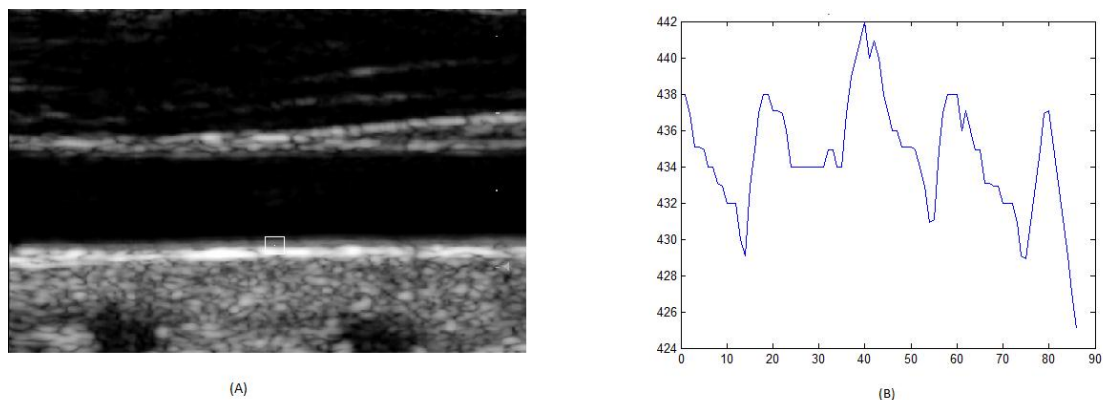


Εικόνα 39 : Ελαστογραφήματα ακτινικής κίνησης για έναν καρδιακό κύκλο για την ακολουθία πραγματικών εικόνων GPL. Τα ελαστογραφήματα (a) έως (c) αντιστοιχούν σε συστολή της καρωτίδας και τα ελαστογραφήματα (d) έως (o) σε διαστολή.



Εικόνα 40 : Ελαστογραφήματα διαμήκους κίνησης για έναν καρδιακό κύκλο για την ακολουθία πραγματικών εικόνων GPL. Τα ελαστογραφήματα (a) έως (c) αντιστοιχούν σε συστολή της καρωτίδας και τα ελαστογραφήματα (d) έως (o) σε διαστολή.

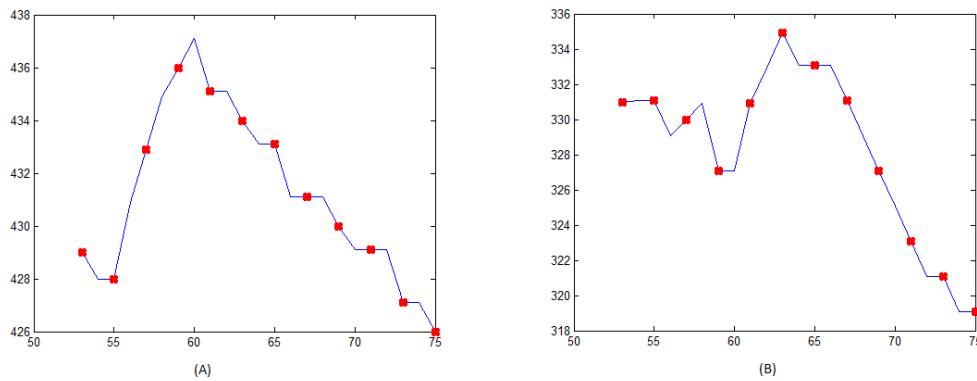
Στη συνέχεια, εφαρμόζεται η ίδια τεχνική για την επόμενη πραγματική ακολουθία εικόνων από υγιή ασθενή, η οποία ονομάζεται MCL. Αρχικά αναλύεται η κίνηση ενός σημείου του τοιχώματος (Εικόνα 41):



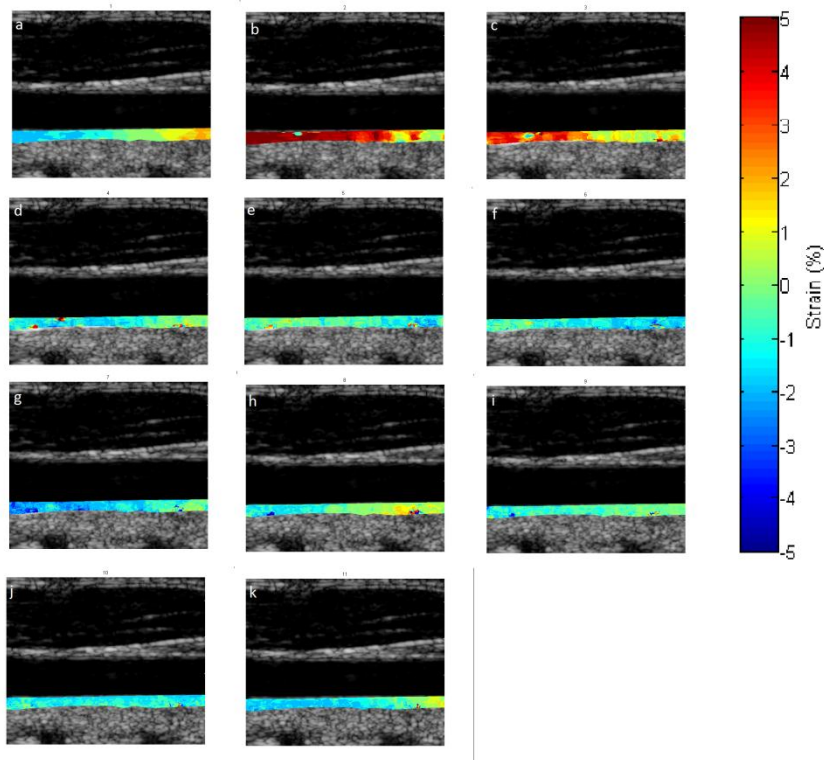
Εικόνα 41 : (A) Σημείο του οποίου η ακτινική κίνηση εξετάστηκε για όλη την ακολουθία εικόνων MCL (B) Ακτινική κίνηση του σημείου στο (A)

Συνεπώς με βάση την παραπάνω εικόνα επιλέχθηκαν οι εικόνες 54 έως 75. Στη συνέχεια, μελετάται η κίνηση των σημείων του κάτω τοιχώματος για τις παραπάνω εικόνες της ακολουθίας MCL και τελικά εξάγονται τα ελαστογραφήματα (Εικόνα 43 , Εικόνα 44) των

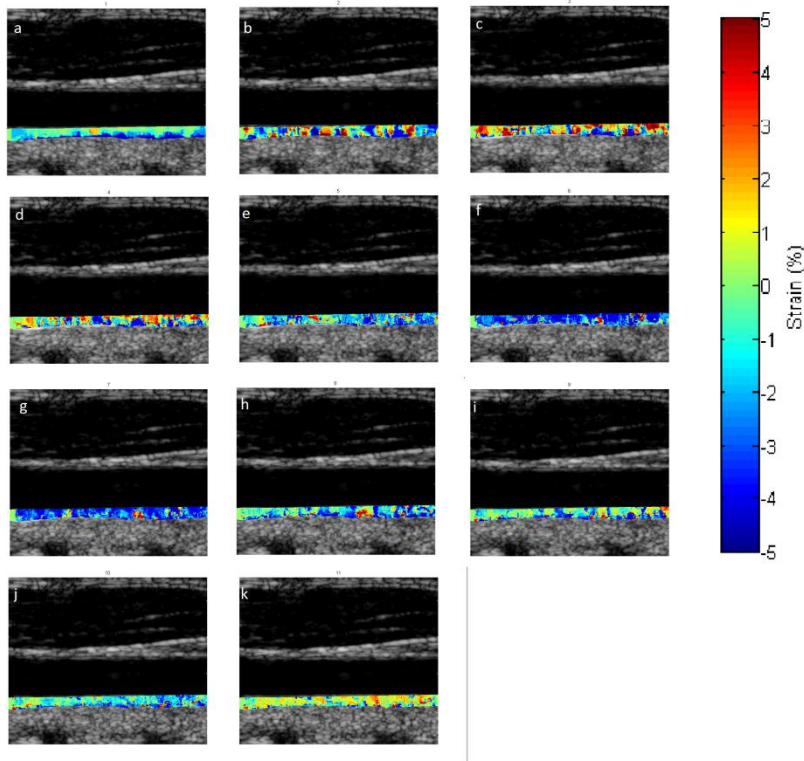
παρακάτω εικόνων για τις εικόνες που έχουν σημειωθεί στην παρακάτω κυματομορφή ακτινικής κίνησης ενός χαρακτηριστικού σημείου κοντά στο όριο αυλού – τοιχώματος (Εικόνα 42):



Εικόνα 42 : (A) Ακτινική και (B) διαμήκης θέση χαρακτηριστικού σημείου τοιχώματος για την ακολουθία εικόνων MCL. Έχουν σημειωθεί οι εικόνες μεταξύ των οποίων εξάγονται ελαστογραφήματα

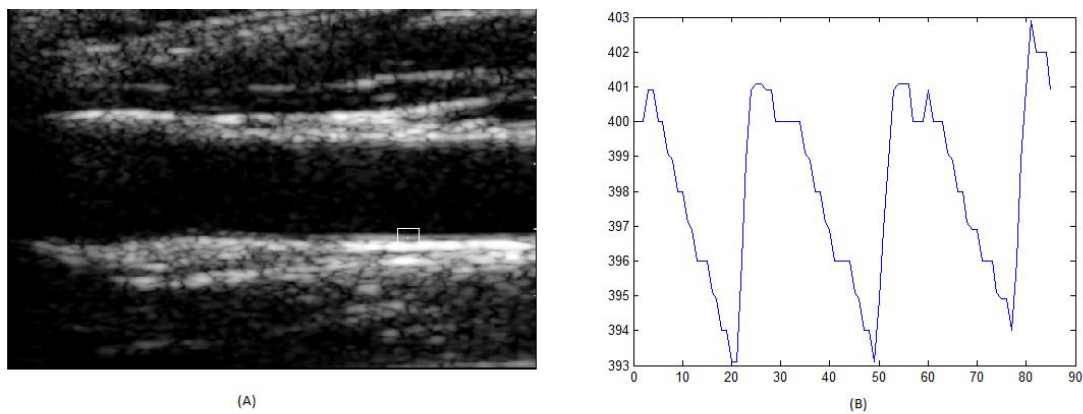


Εικόνα 43 : Ελαστογραφήματα ακτινικής κίνησης για έναν καρδιακό κύκλο για την ακολουθία πραγματικών εικόνων MCL. Τα ελαστογραφήματα (a) έως (c) αντιστοιχούν σε συστολή της καρωτίδας και τα ελαστογραφήματα (d) έως (k) σε διαστολή



Εικόνα 44 : Ελαστογραφήματα διαμήκουσ κίνησης για έναν καρδιακό κύκλο για την ακολουθία πραγματικών εικόνων MCL. Τα ελαστογραφήματα (a) έως (c) αντιστοιχούν σε συστολή της καρωτίδας και τα ελαστογραφήματα (d) έως (k) σε διαστολή

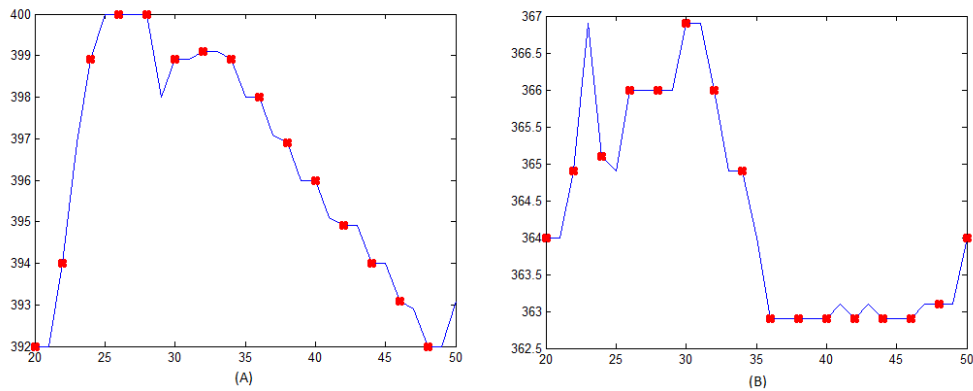
Ακολουθεί η εφαρμογή της τεχνικής στην πραγματική ακολουθία εικόνων VVL. Αρχικά η κυματομορφή ακτινικής κίνησης για ένα σημείο στο όριο τοιχώματος-αυλού είναι η παρακάτω (Εικόνα 45):



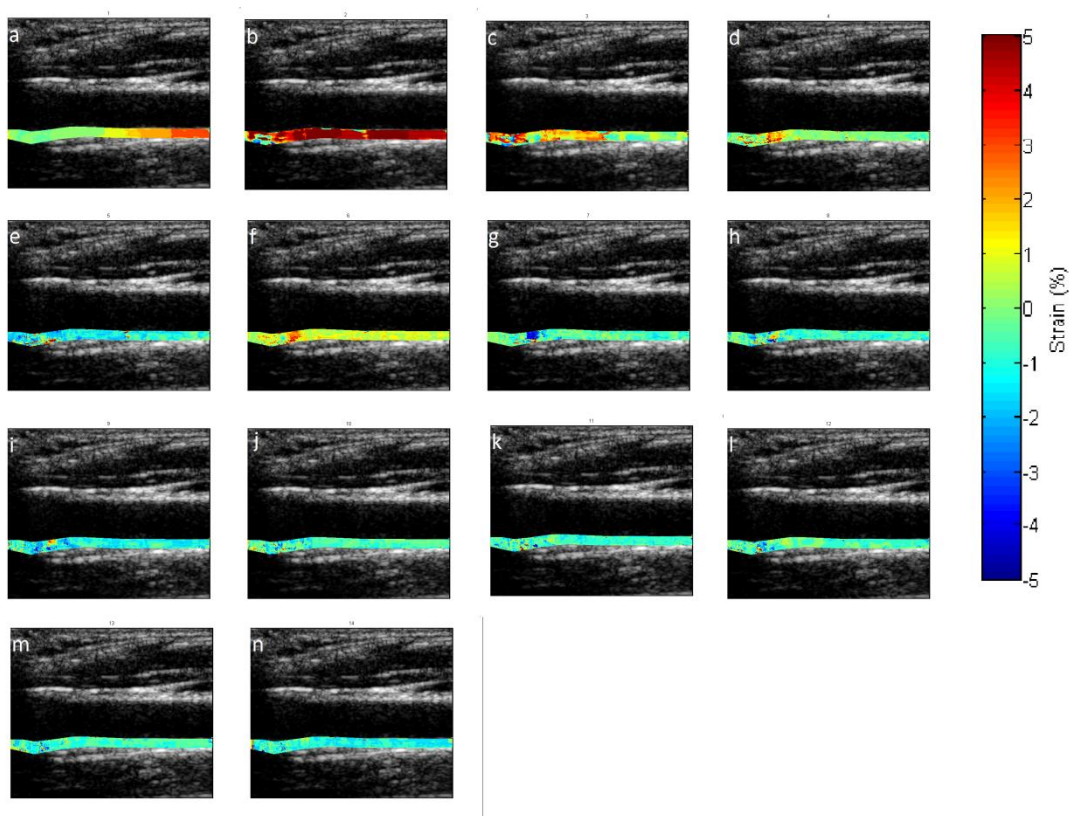
Εικόνα 45 : (A) Σημείο του οποίου η ακτινική κίνηση εξετάστηκε για όλη την ακολουθία εικόνων VVL (B) Ακτινική κίνηση του σημείου στο (A)

Συνεπώς με βάση την παραπάνω εικόνα επιλέχθηκαν οι εικόνες 20 έως περίπου 49. Στη συνέχεια, μελετάται η κίνηση των σημείων του κάτω τοιχώματος για τις παραπάνω εικόνες της ακολουθίας VVL και τελικά εξάγονται τα ελαστογραφήματα (Εικόνα 47, Εικόνα 48) των παρακάτω εικόνων για τις εικόνες που έχουν σημειωθεί στην παρακάτω κυματομορφή

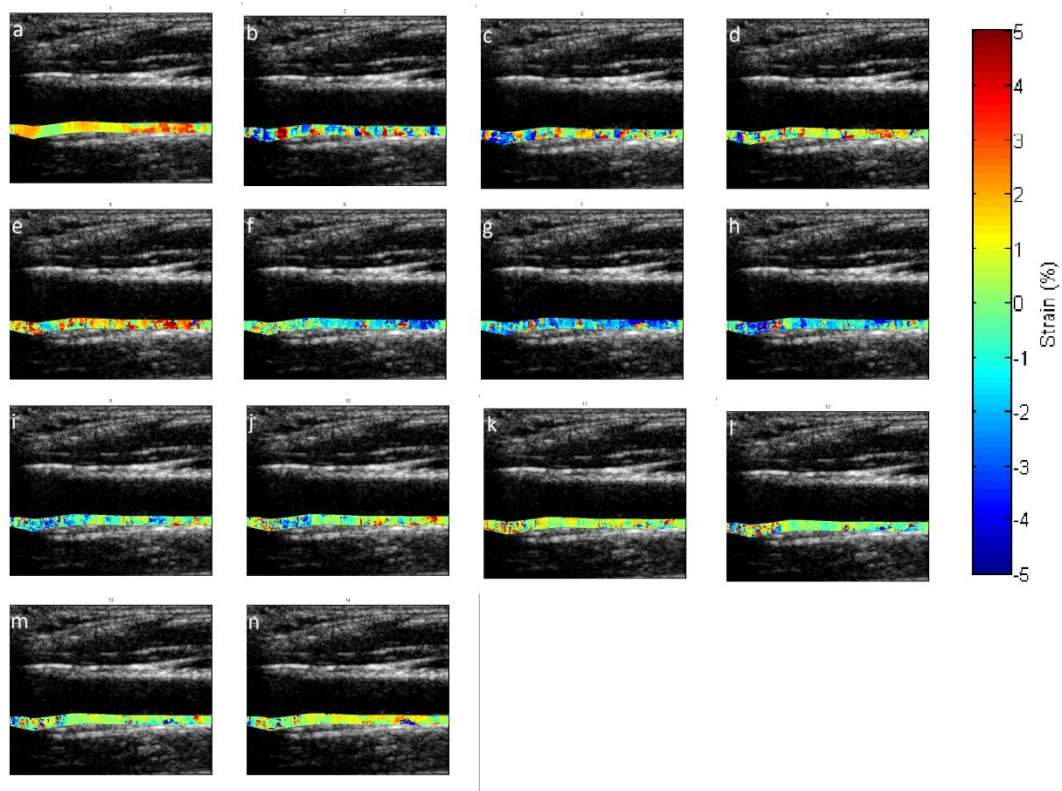
ακτινικής κίνησης ενός χαρακτηριστικού σημείου κοντά στο όριο αλλού – τοιχώματος
(Εικόνα 46):



Εικόνα 46 : (A) Ακτινική και (B) διαμήκης θέση χαρακτηριστικού σημείου τοιχώματος για την ακολουθία εικόνων VVL

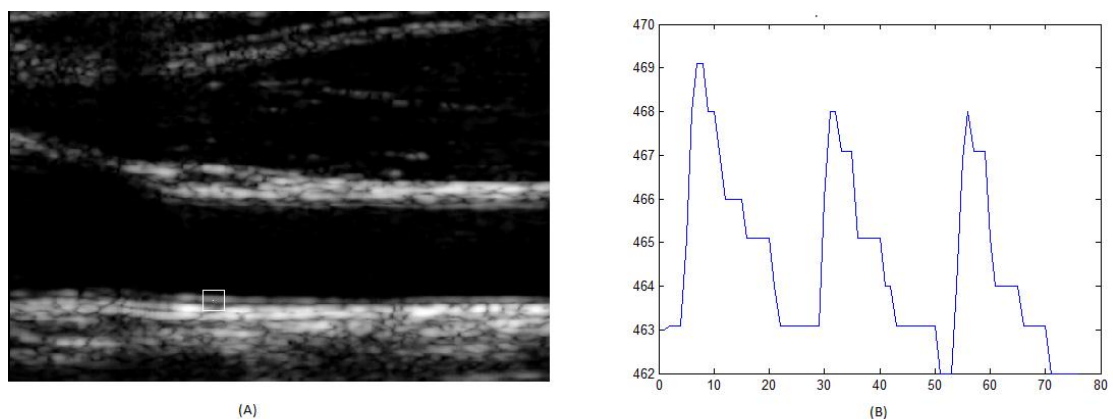


Εικόνα 47 : Ελαστογραφήματα ακτινικής κίνησης για έναν καρδιακό κύκλο για την ακολουθία πραγματικών εικόνων VVL. Τα ελαστογραφήματα (a) έως (d) αντιστοιχούν σε συστολή της καρωτίδας και τα ελαστογραφήματα (e) έως (n) σε διαστολή



Εικόνα 48 : Ελαστογραφήματα διαμήκους κίνησης για έναν καρδιακό κύκλο για την ακολουθία πραγματικών εικόνων VVL. Τα ελαστογραφήματα (a) έως (d) αντιστοιχούν σε συστολή της καρωτίδας και τα ελαστογραφήματα (e) έως (h) σε διαστολή

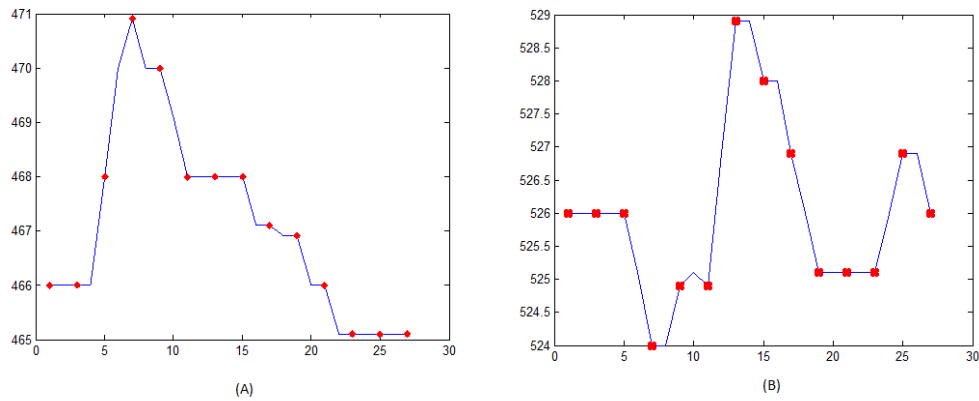
Τέλος επαναλαμβάνουμε την παραπάνω διαδικασία για την πραγματική ακολουθία εικόνων IKL. Η κυματομορφή ακτινικής κίνησης για ένα σημείο στο όριο τοιχώματος-αυλού είναι παρακάτω (Εικόνα 49):



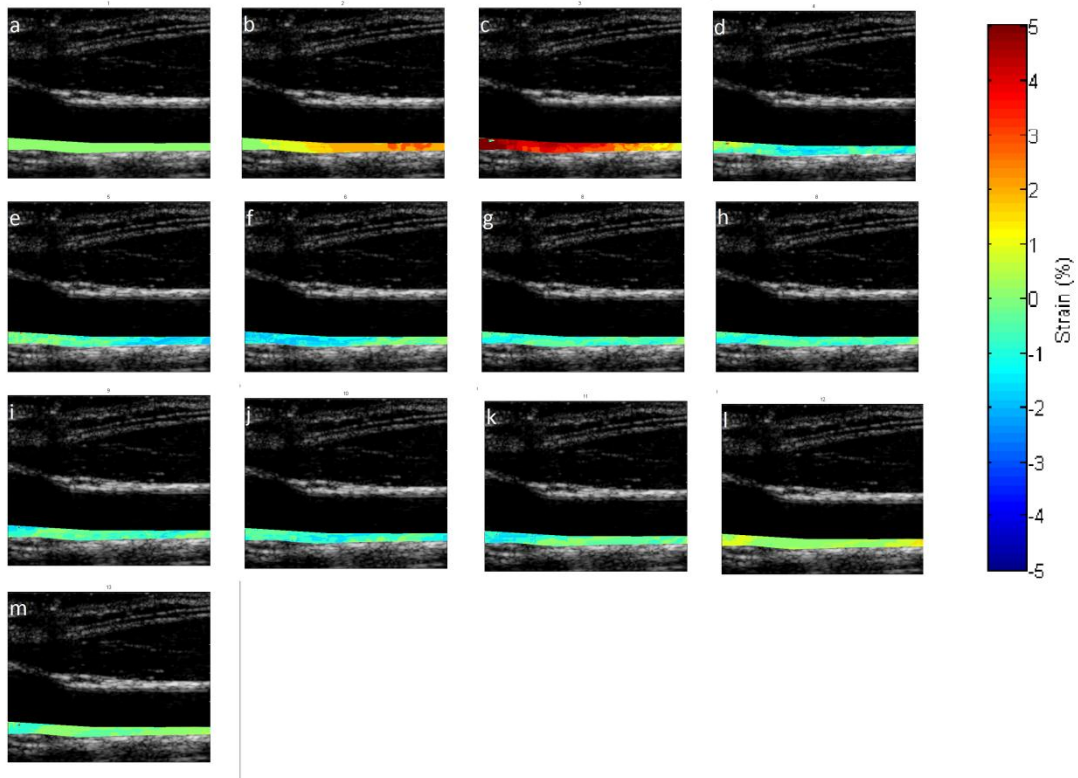
Εικόνα 49 : (A) Σημείο του οποίου η ακτινική κίνηση εξετάστηκε για όλη την ακολουθία εικόνων IKL (B) Ακτινική κίνηση του σημείου στο (A)

Συνεπώς με βάση την παραπάνω εικόνα επιλέχθηκαν οι εικόνες 1 έως περίπου 26. Στη συνέχεια, μελετάται η κίνηση των σημείων του κάτω τοιχώματος για τις παραπάνω εικόνες της ακολουθίας IKL και τελικά εξάγονται τα ελαστογραφήματα (Εικόνα 51 , Εικόνα 52) των

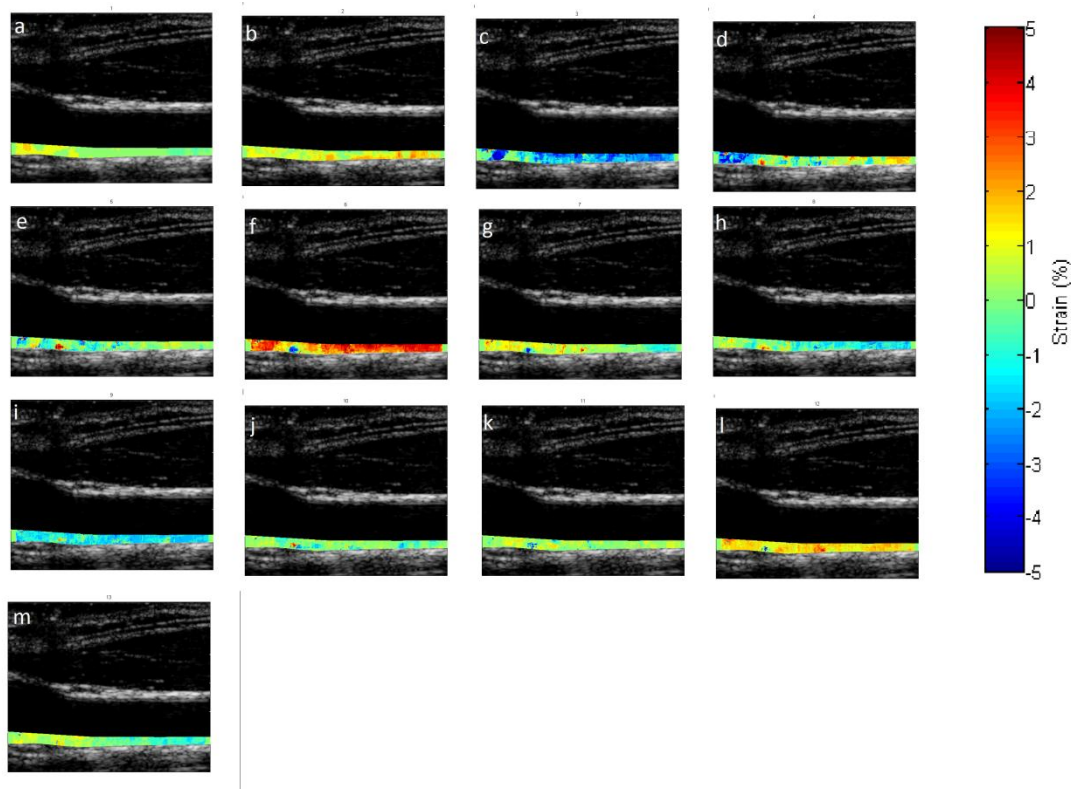
παρακάτω εικόνων για τις εικόνες που έχουν σημειωθεί στην παρακάτω κυματομορφή ακτινικής κίνησης ενός χαρακτηριστικού σημείου κοντά στο όριο αυλού – τοιχώματος (Εικόνα 50):



Εικόνα 50 : (A) Ακτινική και (B) διαμήκης θέση χαρακτηριστικού σημείου τοιχώματος για την ακολουθία εικόνων ΙΚΛ



Εικόνα 51 : Ελαστογραφήματα ακτινικής κίνησης για έναν καρδιακό κύκλο για την ακολουθία πραγματικών εικόνων ΙΚΛ. Τα ελαστογραφήματα (a) έως (c) αντιστοιχούν σε συστολή της καρωτίδας και τα ελαστογραφήματα (d) έως (m) σε διαστολή



Εικόνα 52 : Ελαστογραφήματα διαμήκουσ κίνησης για έναν καρδιακό κύκλο για την ακολουθία πραγματικών εικόνων IKL. Τα ελαστογραφήματα (a) έως (c) αντιστοιχούν σε συστολή της καρωτίδας και τα ελαστογραφήματα (d) έως (m) σε διαστολή

Για όλα τα παραπάνω ελαστογραφήματα όσον αφορά στο πρόσημο των μηχανικών καταπονήσεων ισχύει ό,τι αναφέρθηκε στην ενότητα 4.1. Επομένως, με βάση το χρωματισμό του κάτω τοιχώματος στα ελαστογραφήματα ακτινικής κίνησης είναι δυνατόν να διακριθεί εφόσον η καρωτίδα βρίσκεται σε συστολή ή διαστολή. Πιο συγκεκριμένα στον παρακάτω πίνακα αναγράφεται σε ποιες εικόνες από κάθε ακολουθία η καρωτίδα βρίσκεται σε συστολή και σε ποιες σε διαστολή (Εικόνα 53):

Ακολουθία Εικόνων	Ελαστογραφήματα κατά τη διάρκεια συστολής της καρωτίδας	Ελαστογραφήματα κατά τη διάρκεια διαστολής της καρωτίδας
GPL	(a) – (c)	(d) - (o)
MCL	(a) – (c)	(d) - (k)
VVL	(a) – (d)	(e) - (n)
IKL	(a) – (c)	(d) – (m)

Εικόνα 53 : Διαχωρισμός των ελαστογραφημάτων που αντιστοιχούν σε συστολή από αυτά που αντιστοιχούν σε διαστολή για κάθε ακολουθία εικόνων από υγιείς εξεταζόμενους

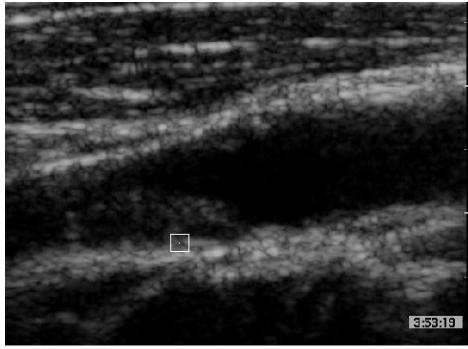
Παρατηρώντας τις ακολουθίες ελαστογραφημάτων ακτινικής κίνησης που παρουσιάστηκαν προηγουμένως καθώς και τον πιο πάνω πίνακα γίνεται αντιληπτό ότι σε όλες τις περιπτώσεις ακολουθιών υπάρχει το ίδιο μοτίβο κίνησης. Συγκεκριμένα, η καρωτίδα στην αρχή του καρδιακού κύκλου βρίσκεται σε μία σύντομη φάση συστολής, όπου τα δύο τοιχώματά της απομακρύνονται το ένα από το άλλο. Συγκεκριμένα το κάτω τοίχωμα κινείται προς τα κάτω, κατά τη φορά του ακτινικού άξονα, όπως υποδηλώνουν οι χρωματισμοί του με χρώματα κοντά στο κόκκινο (θετικές τιμές καταπόνησης). Στη συνέχεια, ακολουθεί μία πιο μακρά φάση διαστολής, η οποία μπορεί να διαρκεί περίπου κατά μέσο όρο το διπλάσιο χρονικό διάστημα σε σχέση με εκείνο που διαρκεί η φάση συστολής. Σε αυτό το χρονικό διάστημα της διαστολής τα τοιχώματα της καρωτίδας επανέρχονται μειώνοντας τη μεταξύ τους απόσταση. Το κάτω τοίχωμα, ειδικότερα, κινείται ανάποδα προς τον ακτινικό άξονα και είναι χρωματισμένο με χρώματα πιο κοντά στο μπλε και το πράσινο (αρνητικές ή και μηδενικές τιμές καταπόνησης).

Όσον αφορά στα ελαστογραφήματα διαμήκους κίνησης παρατηρείται πως είναι πιο δύσκολη η εξαγωγή συμπερασμάτων καθώς η μελέτη της κίνησης των σημείων στον διαμήκη άξονα είναι δυσκολότερη. Το γεγονός αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στην ομοιογένεια που παρουσιάζουν τα τοιχώματα στον διαμήκη άξονα.

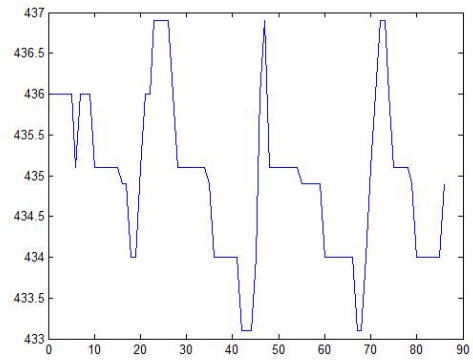
4.4 Ελαστογραφήματα από πραγματική ακολουθία εικόνων

ασθενή με αθηρωμάτωση στην καρωτίδα

Σε αυτήν την ενότητα παρατίθενται ελαστογραφήματα που υπολογίστηκαν με βάση δύο πραγματικές ακολουθίες εικόνων από ασθενείς με αθηρωμάτωση στην καρωτίδα. Η πρώτη ακολουθία αντιστοιχεί σε ασθενή με συμπτωματική αθηρωμάτωση και ονομάζεται ΜΗ, ενώ η δεύτερη ακολουθία αντιστοιχεί σε ασθενή με ασυμπτωματική αθηρωμάτωση και ονομάζεται ΜCΡ. Σε αυτές τις περιπτώσεις η περιοχή ενδιαφέροντος θα είναι η περιοχή της καρωτίδας όπου παρατηρείται η αθηρωματική πλάκα καθώς και ένα τμήμα του κάτω τοιχώματος προσκείμενο σε αυτήν. Συνεπώς, αρχικά λαμβάνεται ένα σημείο της περιοχής αυτής και μελετάται η ακτινική κίνησή του προκειμένου να απομονωθούν οι εικόνες που αντιστοιχούν σε διάρκεια ενός καρδιακού κύκλου (*Εικόνα 54*):



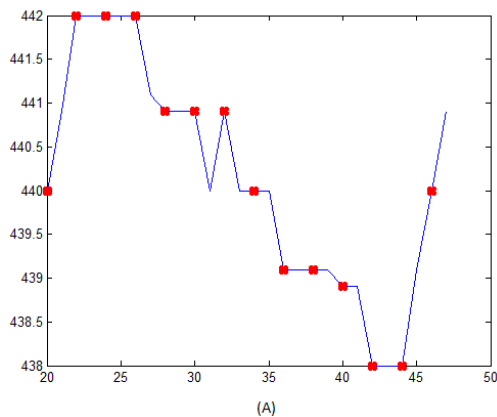
(A)



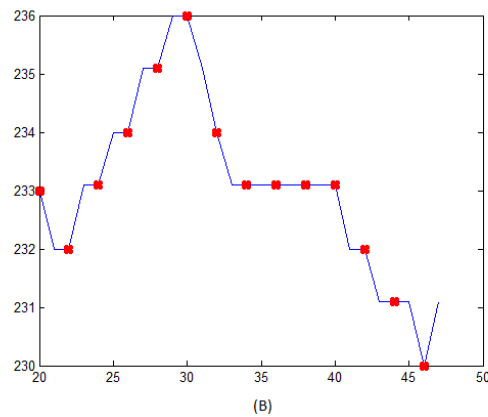
(B)

Εικόνα 54 : (A) Σημείο του οποίου η ακτινική κίνηση εξετάστηκε για όλη την ακολουθία εικόνων MH (B) Ακτινική κίνηση του σημείου στο (A)

Συνεπώς με βάση την παραπάνω εικόνα επιλέχθηκαν οι εικόνες 20 έως περίπου 46. Στη συνέχεια, μελετάται η κίνηση των σημείων του κάτω τοιχώματος για τις παραπάνω εικόνες της ακολουθίας MH και τελικά εξάγονται τα ελαστογραφήματα (Εικόνα 56 , Εικόνα 57) των παρακάτω εικόνων για τις εικόνες που έχουν σημειωθεί στην παρακάτω κυματομορφή ακτινικής κίνησης ενός χαρακτηριστικού σημείου κοντά στο όριο αυλού – τοιχώματος (Εικόνα 55):

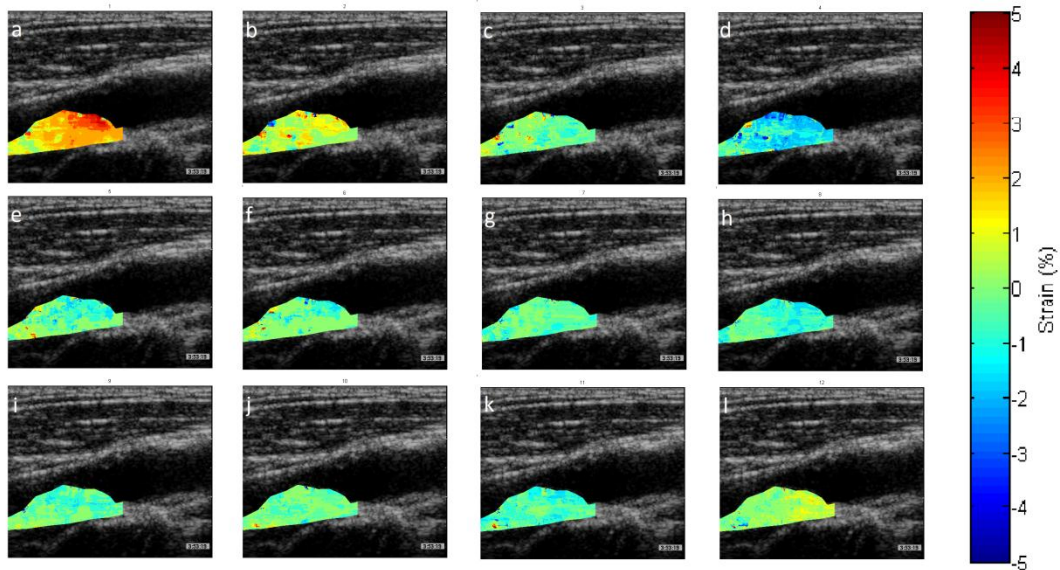


(A)

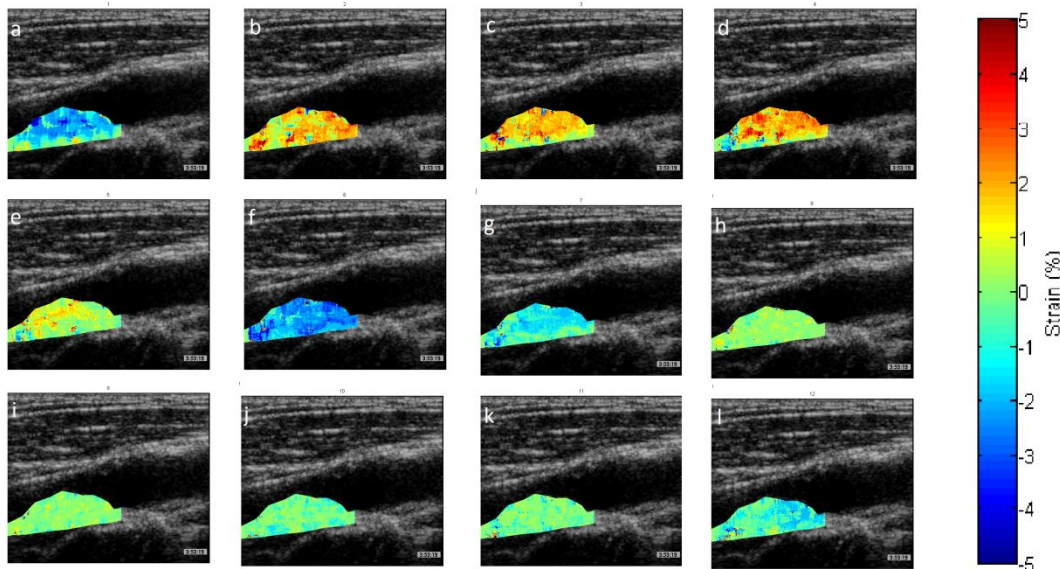


(B)

Εικόνα 55 : Ακτινική κίνηση χαρακτηριστικού σημείου στην οποία έχουν σημειωθεί οι εικόνες μεταξύ των οποίων εξάγονται ελαστογραφήματα



Εικόνα 56 : Ελαστογραφήματα ακτινικής κίνησης για έναν καρδιακό κύκλο για την ακολουθία πραγματικών εικόνων ΜΗ. Τα ελαστογραφήματα (a) έως (c) αντιστοιχούν σε συστολή της καρωτίδας και τα ελαστογραφήματα (d) έως (k) σε διαστολή. Το τελευταίο ελαστογράφημα (l) αντιστοιχεί σε συστολή από επόμενο καρδιακό κύκλο.



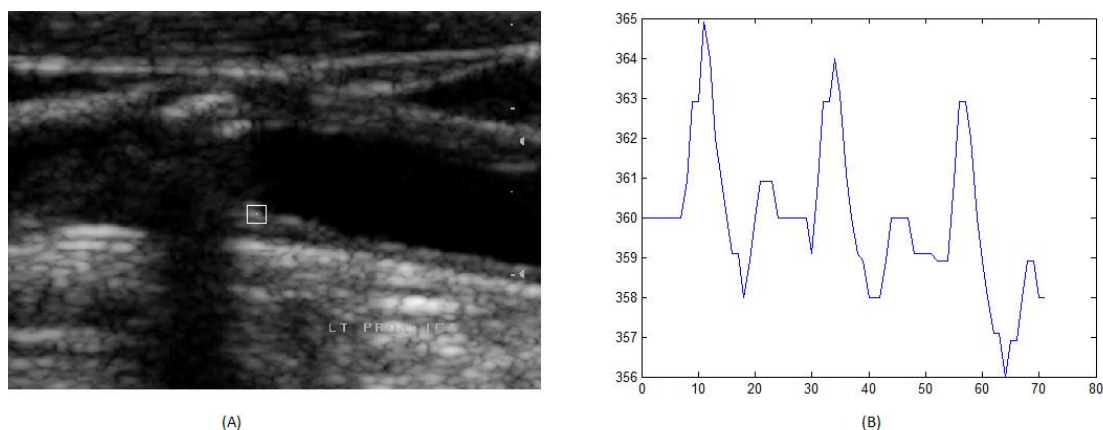
Εικόνα 57 : Ελαστογραφήματα διαμήκουσ κίνησης για έναν καρδιακό κύκλο για την ακολουθία πραγματικών εικόνων ΜΗ. Τα ελαστογραφήματα (a) έως (c) αντιστοιχούν σε συστολή της καρωτίδας και τα ελαστογραφήματα (d) έως (k) σε διαστολή. Το τελευταίο ελαστογράφημα (l) αντιστοιχεί σε συστολή από επόμενο καρδιακό κύκλο.

Στα παραπάνω ελαστογραφήματα παρατηρείται ότι κατά τη διάρκεια της συστολής η αθηρωματική πλάκα συμπιέζεται κατά τη φορά του ακτινικού άξονα και εμφανίζει σχετικά μεγάλες τιμές ακτινικής καταπόνησης. Αντίθετα, κατά τη διάρκεια της διαστολής οι τιμές της ακτινικής καταπόνησης είναι σαφώς μικρότερες σε μέτρο και έχουν αντίθετη κατεύθυνση με εξαίρεση ίσως κάποια μεμονωμένα σημεία στο κάτω αριστερό τμήμα του προσκειμένου αρτηριακού τοιχώματος όπου εμφανίζονται κάποιες υψηλότερες τιμές. Επίσης, σε πολλά

σημεία της πλάκας οι τιμές της ακτινικής καταπόνησης είναι κοντά στο μηδέν, το οποίο γίνεται αντιληπτό από το πράσινο χρώμα με το οποίο έχουν χρωματιστεί τα σημεία αυτά.

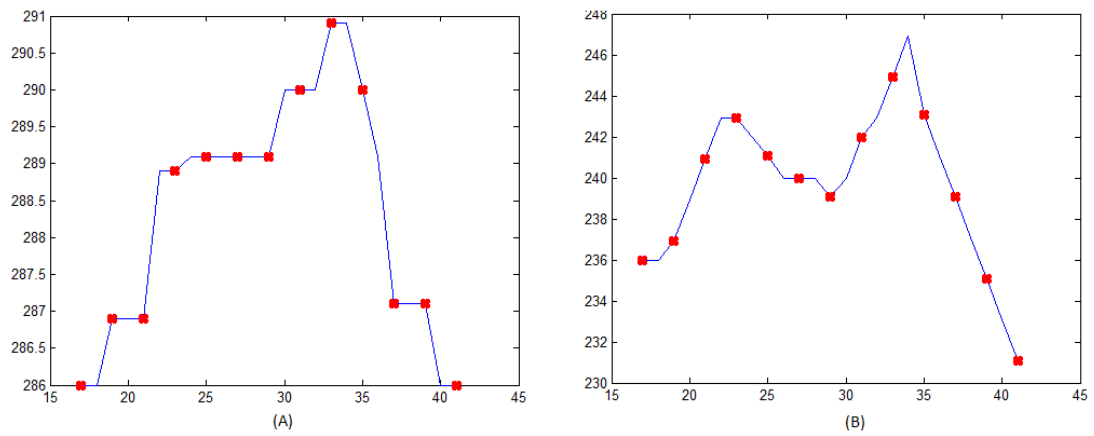
Όσον αφορά στα ελαστογραφήματα διαμήκους κίνησης παρατηρείται ότι κατά τη διάρκεια της συστολής αλλά και στην αρχή της διαστολής εμφανίζονται σχετικά υψηλές κατά μέτρο καταπονήσεις με κατεύθυνση που μεταβάλλεται. Επίσης, φαίνεται ότι κάποιες τιμές υψηλής διαμήκους καταπόνησης εμφανίζονται και στο τμήμα του τοιχώματος που είναι προσκείμενο στην αθηρωματική πλάκα, ειδικά στο κάτω αριστερά άκρο του. Τέλος, παρατηρείται ότι προς το μέσον και το τέλος της διαστολής η αθηρωματική πλάκα εμφανίζει πολύ μικρές έως μηδενικές τιμές διαμήκους καταπόνησης.

Στη συνέχεια, η τεχνική ελαστογραφίας εφαρμόζεται σε μία ακολουθία εικόνων που αντιστοιχεί σε έναν ασυμπτωματικό ασθενή με αθηρωμάτωση. Η ακολουθία αυτή είναι η MCR. Αρχικά παίρνουμε ένα σημείο στο όριο του τοιχώματος αυλού προκειμένου να απομονώσουμε μία χρονική περίοδο που αντιστοιχεί σε έναν καρδιακό παλμό. Η διαδικασία αυτή φαίνεται στην *Εικόνα 58*:

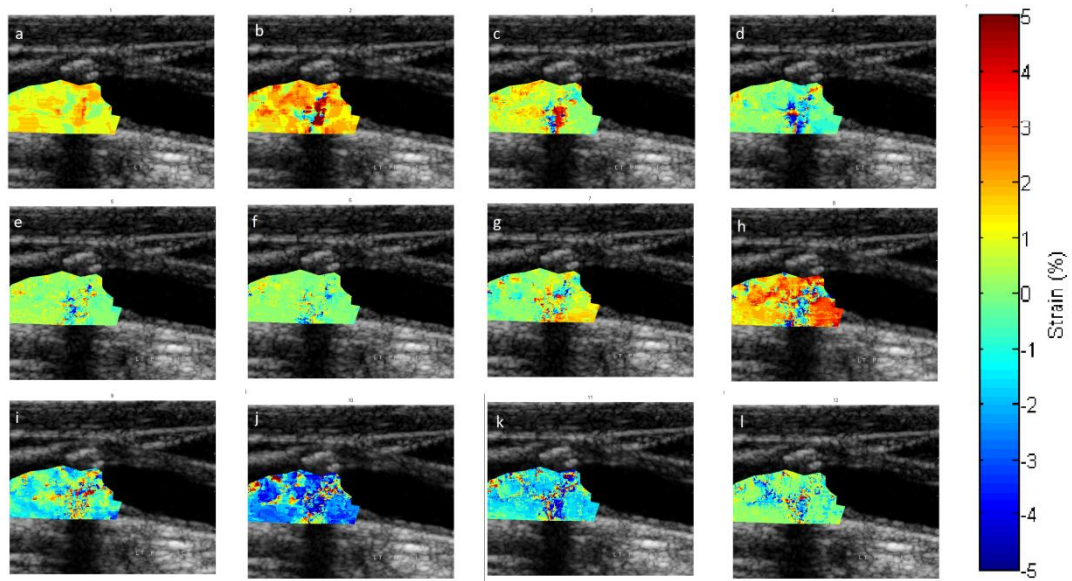


Εικόνα 58 : (A) Σημείο του οποίου η ακτινική κίνηση εξετάστηκε για όλη την ακολουθία εικόνων MCR (B) Ακτινική κίνηση του σημείου στο (A)

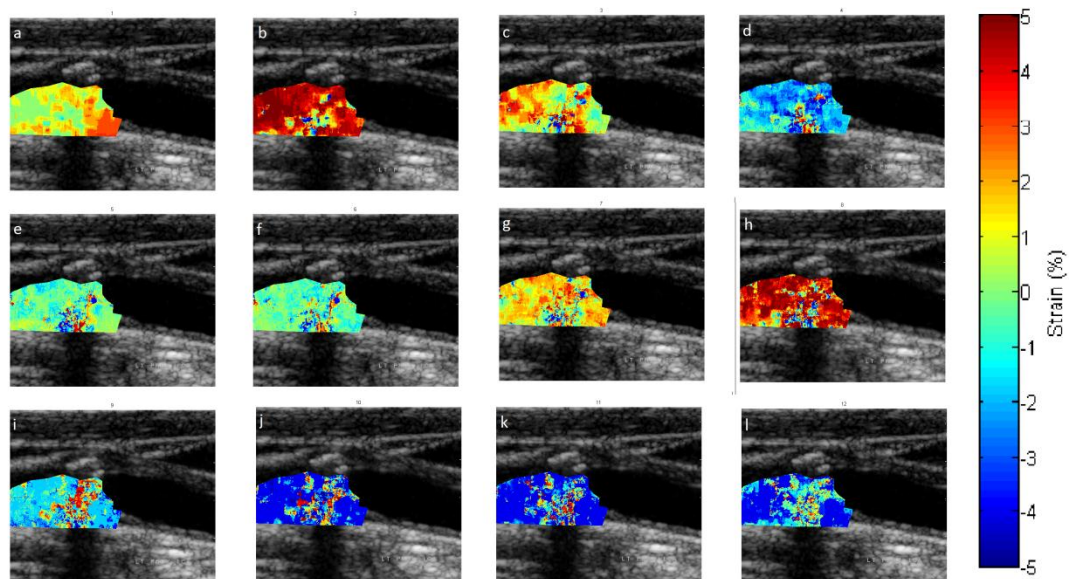
Με βάση την παραπάνω εικόνα επιλέχθηκαν οι εικόνες 20 έως περίπου 46. Στη συνέχεια, μελετάται η κίνηση των σημείων του κάτω τοιχώματος για τις παραπάνω εικόνες της ακολουθίας MCR και τελικά εξάγονται τα ελαστογραφήματα (*Εικόνα 60* , *Εικόνα 61*) των παρακάτω εικόνων για τις εικόνες που έχουν σημειωθεί στην παρακάτω κυματομορφή ακτινικής κίνησης ενός χαρακτηριστικού σημείου κοντά στο όριο αυλού – τοιχώματος (*Εικόνα 59*):



Εικόνα 59 : (A) Ακτινική και (B) διαμήκης θέση χαρακτηριστικού σημείου τοιχώματος για την ακολουθία εικόνων MCR



Εικόνα 60 : Ελαστογραφήματα ακτινικής κίνησης για έναν καρδιακό κύκλο για την ακολουθία πραγματικών εικόνων MCR. Τα ελαστογραφήματα (a) έως (h) αντιστοιχούν σε συστολή της καρωτίδας και τα ελαστογραφήματα (i) έως (l) σε διαστολή



Εικόνα 61 : Ελαστογραφήματα ακτινικής κίνησης για έναν καρδιακό κύκλο για την ακολουθία πραγματικών εικόνων ΜΗ. Τα ελαστογραφήματα (a) έως (h) αντιστοιχούν σε συστολή της καρωτίδας και τα ελαστογραφήματα (i) έως (l) σε διαστολή

Στην περίπτωση των ελαστογραφημάτων ακτινικής κίνησης παρατηρείται ότι κατά τη διάρκεια της συστολής η αθηρωματική πλάκα συμπιέζεται αρχικά έντονα προς τα κάτω. Στη συνέχεια της συστολής, ακολουθεί ένα διάστημα στο οποίο οι τιμές των καταπονήσεων είναι πολύ μικρές με εξαίρεση κάποια σημεία στο όριο της πλάκας με το τοίχωμα της αρτηρίας όπου αναπτύσσονται σχετικά υψηλές καταπονήσεις. Ακολουθεί μια μικρότερη από την αναμενόμενη περίοδος διαστολής στην οποία παρατηρούνται έντονες καταπονήσεις της πλάκας προς την αντίθετη φορά από αυτή του ακτινικού άξονα (προς τα πάνω). Ωστόσο, στην περιοχή στο όριο της πλάκας με το τοίχωμα εμφανίζεται σε κάποια μεμονωμένα σημεία κατά τη διάρκεια της διαστολής έντονη κίνηση προς τα κάτω.

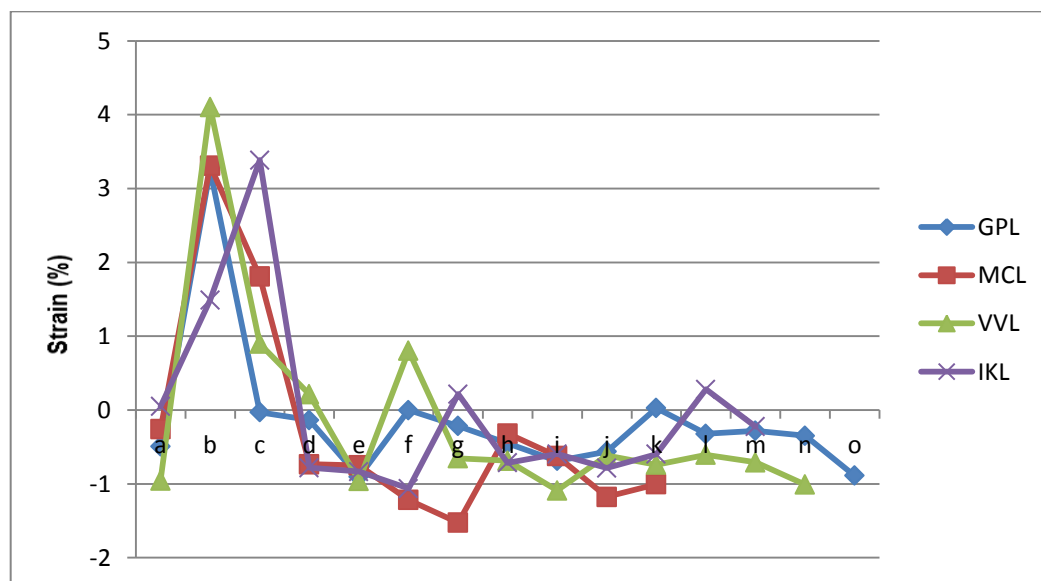
Στην περίπτωση των ελαστογραφημάτων διαμήκους κίνησης, σε όλη τη διάρκεια του καρδιακού κύκλου παρατηρούνται υψηλές τιμές καταπόνησης και προς τις δύο κατευθύνσεις του διαμήκους άξονα. Συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια της συστολής του αγγείου είναι φανερό ότι υπάρχει κίνηση προς τα δεξιά ενώ κατά τη διαστολή παρατηρείται έντονη κίνηση προς τα αριστερά. Επίσης, και στην περίπτωση των διαμηκών ελαστογραφημάτων η περιοχή στο όριο πλάκας – αρτηριακού τοιχώματος που παρατηρήθηκε προηγουμένως παρουσιάζει σχετικά υψηλές καταπονήσεις και μάλιστα σε πολλές περιπτώσεις με κατεύθυνση αντίθετη από αυτή της γενικότερης κίνησης. Στον παρακάτω πίνακα σημειώνεται αντίστοιχα με την περίπτωση των ακολουθιών από υγιείς εξεταζόμενους ποια ελαστογραφήματα αντιστοιχούν σε συστολή και ποια σε διαστολή (Εικόνα 62).

Ακολουθία Εικόνων	Ελαστογραφήματα κατά τη διάρκεια συστολής της καρωτίδας	Ελαστογραφήματα κατά τη διάρκεια διαστολής της καρωτίδας
MH	(a)-(c)	(d)-(k)
MCR	(a)-(h)	(i)-(l)

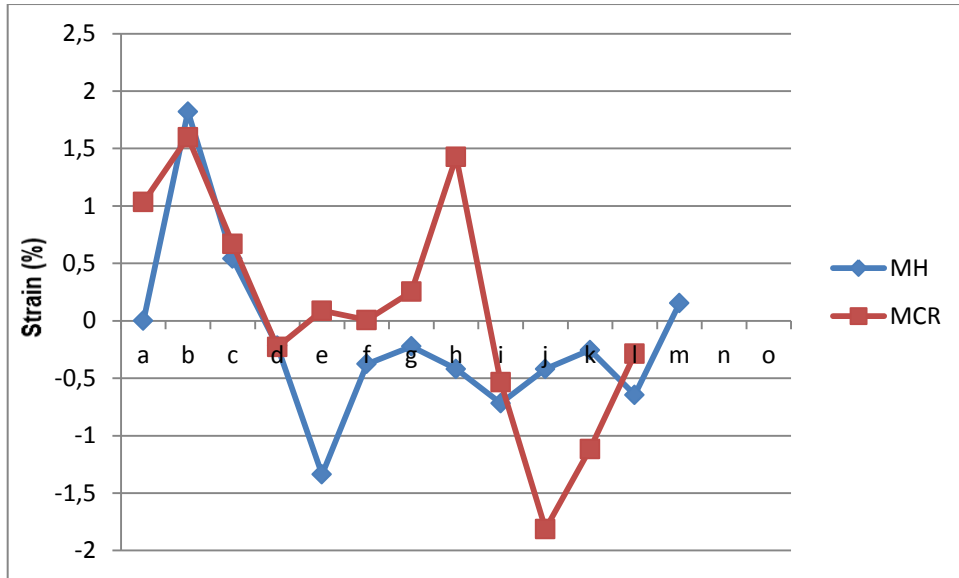
Εικόνα 62 : Διαχωρισμός των ελαστογραφήματων που αντιστοιχούν σε συστολή από αυτά που αντιστοιχούν σε διαστολή για κάθε ακολουθία εικόνων από ασθενείς εξεταζόμενους

4.5 Αριθμητικά αποτελέσματα

Μετά την εξαγωγή των παραπάνω ελαστογραφήματων, ειδικά για την περίπτωση της ακτινικής κίνησης, όπου τα αποτελέσματα ήταν περισσότερο συνεπή, υπολογίσαμε για καθένα από αυτά τη μέση τιμή της καταπόνησης για όλα τα σημεία της περιοχής ενδιαφέροντος. Με αυτόν τον τρόπο λάβαμε τιμές του μέσου όρου της μηχανικής καταπόνησης για ολόκληρες περιοχές ενδιαφέροντος που αντιστοιχούν σε διάρκεια ενός καρδιακού κύκλου. Στη συνέχεια, παρατίθενται τα διαγράμματα με τις μέσες τιμές ακτινικής καταπόνησης που υπολογίστηκαν συναρτήσει του αντίστοιχου ελαστογραφήματος (Εικόνα 63, Εικόνα 64).

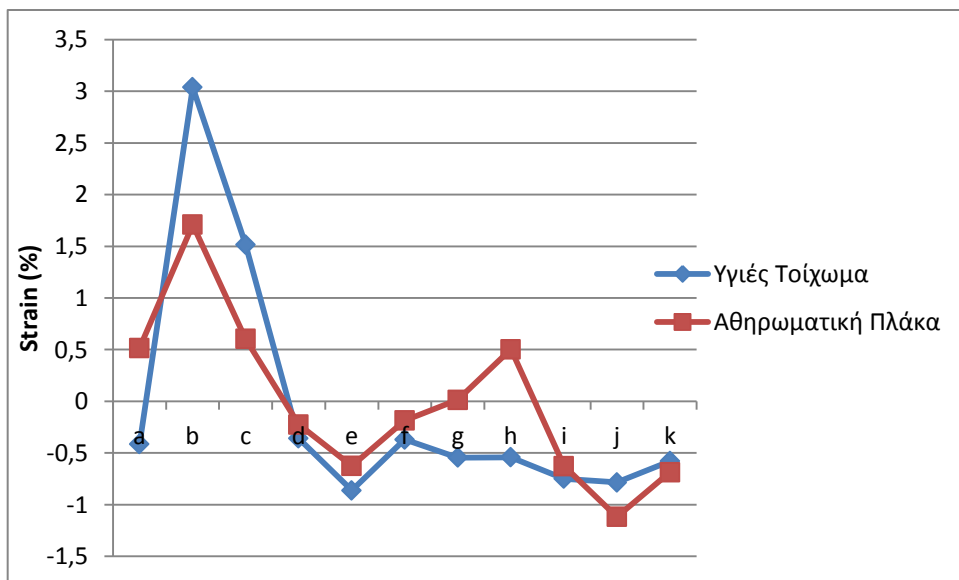


Εικόνα 63 : Μέση τιμή ακτινικής καταπόνησης ανά σημείο της περιοχής ενδιαφέροντος για κάθε έναν από τους υγιείς εξεταζόμενους. Στον οριζόντιο άξονα βρίσκονται τα αντίστοιχα ελαστογραφήματα



Εικόνα 64 : Μέση τιμή ακτινικής καταπόνησης ανά σημείο της περιοχής ενδιαφέροντος για κάθε έναν από τους ασθενείς εξεταζόμενους. Στον οριζόντιο άξονα βρίσκονται τα αντίστοιχα ελαστογραφήματα

Για να μπορέσουμε να συγκρίνουμε τα παραπάνω αποτελέσματα υγιών ιστών και αθηρωματικών πλακών βρήκαμε το μέσο όρο των καταπονήσεων που αντιστοιχούν ανά σημείο για όλους τους παραπάνω υγιείς εξεταζόμενους και τον αντίστοιχο μέσο όρο για τοίχωμα που παρουσιάζει αθηρωματική πλάκα. Το τελικό αποτέλεσμα παρουσιάζεται στην *Εικόνα 65*.



Εικόνα 65 : Μέσος όρος που λήφθηκε για την καταπόνηση ανά σημείο της περιοχής ενδιαφέροντος σε όλους τους υγιείς εξεταζόμενους και σε όλους τους ασθενείς σε κάθε ελαστογράφημα

5

Συζήτηση - Συμπεράσματα

Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας υλοποιήθηκε μια τεχνική μη παρεμβατικής ελαστογραφίας της καρωτίδας η οποία εφαρμόστηκε σε συνθετικές και πραγματικές ακολουθίες εικόνων. Συγκεκριμένα, εφαρμόστηκε σε 4 συνθετικές ακολουθίες εικόνων και 6 πραγματικές εκ των οποίων οι 4 αντιστοιχούσαν σε υγιείς εξεταζόμενους ενώ οι υπόλοιπες 2 αντιστοιχούσαν σε ασθενείς με αθηρωμάτωση. Στο τελευταίο αυτό κεφάλαιο σχολιάζονται τα αποτελέσματα του προηγούμενου κεφαλαίου. Στη συνέχεια, γίνεται μια προσπάθεια εκτίμησης των μελλοντικών προοπτικών της εργασίας και διατυπώνονται προτάσεις για την αξιοποίηση και την επέκτασή της. Τέλος, εξάγεται ένα γενικό συμπέρασμα που προκύπτει από το σύνολο της εργασίας.

5.1 Γενικά σχόλια

Η τεχνική ελαστογραφίας όπως παρουσιάστηκε στη διπλωματική εργασία περιλαμβάνει δύο στάδια. Αρχικά μελετάται η κίνηση των σημείων μιας περιοχής ενδιαφέροντος σε μία ακολουθία εικόνων υπερήχων Β-σάρωσης με τη χρήση ενός αλγορίθμου εκτίμησης κίνησης πολυκλιμακωτής ταύτισης περιοχών. Στη συνέχεια, οι κυματομορφές κίνησης των σημείων αυτών αξιοποιούνται προκειμένου να υπολογιστούν οι αντίστοιχες μηχανικές καταπονήσεις για τα ζεύγη εικόνων που έχουν επιλεγεί και να αποδοθεί το μέτρο και το πρόσημό τους στο αντίστοιχο σημείο της εικόνας με βάση έναν χρωματικό χάρτη. Τέλος, το κατάλληλα χρωματισμένο τμήμα υπερτίθεται πάνω στο αντίστοιχο τμήμα της αρχικής εικόνας . Η

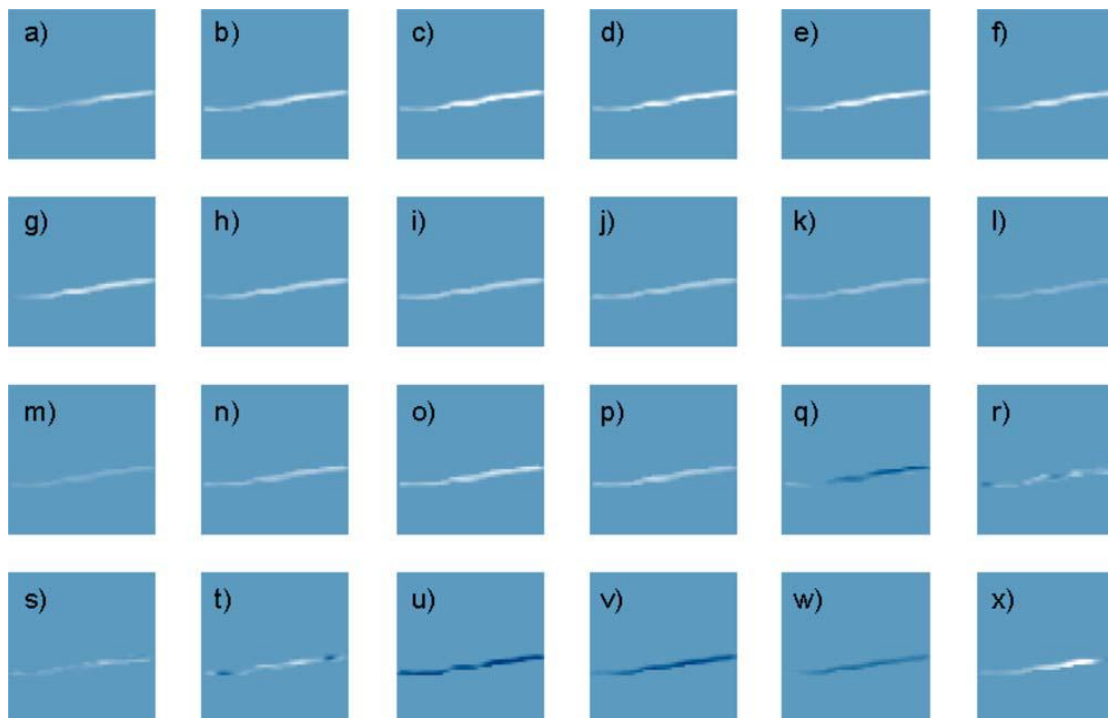
μέθοδος αυτή εφαρμόστηκε σε συνθετικές και πραγματικές ακολουθίες εικόνων υπερήχων της κοινής καρωτίδας. Τα ελαστογραφήματα που προέκυψαν μελετήθηκαν προκειμένου να ελεγχθεί η χρησιμότητά της στο χαρακτηρισμό του αρτηριακού τοιχώματος της καρωτίδας.

Με βάση τα αποτελέσματα, διαπιστώθηκαν τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η ελαστογραφία ως συμπληρωματικό εργαλείο ελέγχου της κίνησης του αρτηριακού τοιχώματος. Συγκεκριμένα, αποτελεί μια περισσότερο εποπτική και εύκολη στο να κατανοηθεί παρουσίαση της κίνησης του αρτηριακού τοιχώματος. Επίσης, προσφέρει πληροφορίες και λεπτομέρειες που αφορούν στην κίνηση και στη μηχανική συμπεριφορά του τοιχώματος, οι οποίες θα ήταν πολύ δύσκολο να εξαχθούν με γυμνό μάτι. Τέλος, λειτουργεί επικουρικά, στον χαρακτηρισμό του αρτηριακού τοιχώματος καθώς και στον εντοπισμό αθηρωματικών πλακών.

Ωστόσο, η μέθοδος αυτή παρουσιάζει και κάποια μειονεκτήματα, με κυριότερο αυτό των απαιτήσεών της σε μνήμη και σε χρόνο. Συγκεκριμένα, όπως παρατηρήθηκε και στο κεφάλαιο 4 η μελέτη της κίνησης πολλών σημείων σε ένα μεγάλο αριθμό εικόνων απαιτεί μεγάλη υπολογιστική ισχύ, έχει υψηλές ανάγκες σε μνήμη και απαιτεί σημαντικό χρόνο για τον υπολογισμό των αποτελεσμάτων. Επίσης, ένα άλλο μειονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι ότι λόγω του θορύβου και των ειδώλων που παρατηρούνται στις εικόνες υπερήχων, ειδικά στην περίπτωση τοιχωμάτων που δεν είναι ομογενή και παρουσιάζουν αθηρωματικές πλάκες σε κάποια σημεία, παρατηρούνται διακυμάνσεις και θόρυβος στα αποτελέσματα της ελαστογραφίας.

Σε αυτή τη διπλωματική εργασία, αρχικά κατασκευάστηκαν ελαστογραφήματα για συνθετικές ακολουθίες εικόνων. Ειδικότερα κατασκευάστηκε ένα ελαστογράφημα ακτινικής κίνησης και ένα διαμήκους κίνησης μεταξύ μίας εικόνας στην αρχή της διαστολής και μίας εικόνας στο μέσον της διαστολής καθώς και μεταξύ της εικόνας στο μέσον της διαστολής και μιας εικόνας στο τέλος της διαστολής. Από τα ελαστογραφήματα αυτά παρατηρείται ότι η αύξηση του θορύβου προκαλεί διακυμάνσεις στο χρώμα της περιοχής ενδιαφέροντος. Πιο συγκεκριμένα στα ελαστογραφήματα ακτινικής κίνησης η προσθήκη θορύβου προκαλεί κάποιες μικρές διακυμάνσεις στην εκτίμηση κίνησης του τοιχώματος. Ωστόσο, τα αποτελέσματα της προσθήκης αυξανόμενου θορύβου στην ακολουθία εικόνων είναι πολύ περισσότερο αισθητά στα ελαστογραφήματα διαμήκους κίνησης, όπου εισέρχονται σημαντικός θόρυβος και μεγαλύτερες διακυμάνσεις στο χρωματισμό της περιοχής ενδιαφέροντος δυσχεραίνοντας την ερμηνεία των αποτελεσμάτων της ελαστογραφίας. Συνεπώς, επαληθεύεται και μέσω της ελαστογραφίας το γεγονός ότι αύξηση του θορύβου συνεπάγεται μεγαλύτερα σφάλματα στην εκτίμηση κίνησης των σημείων του αρτηριακού τοιχώματος, ακριβώς όπως έχει παρατηρηθεί και στις εργασίες [Gas09], [Gas10], [Gas11].

Στη συνέχεια, η τεχνική ελαστογραφίας εφαρμόστηκε σε ακολουθίες εικόνων καρωτίδας από υγιείς εξεταζόμενους. Σε αυτήν την περίπτωση λήφθηκε μία σειρά από ισαπέχουσες χρονικά εικόνες κατά τη διάρκεια ενός καρδιακού κύκλου και για κάθε διαδοχικό ζεύγος των εικόνων αυτών κατασκευάστηκαν τα αντίστοιχα ελαστογραφήματα. Τα αποτελέσματα μπορούν να συγκριθούν με αντίστοιχα αποτελέσματα άλλων εργασιών [Mau08] (Εικόνα 66):



Εικόνα 66 : Διαδοχικά ελαστογραφήματα ακτινικής κίνησης στη διάρκεια ενός καρδιακού κύκλου όπου μία χρονική περίοδο διαστολής (a) έως (p) (λευκοί χρωματισμοί) ακολουθείται από μία περίοδο συστολής (q) έως (x) (σκούροι χρωματισμοί) [Mau08]

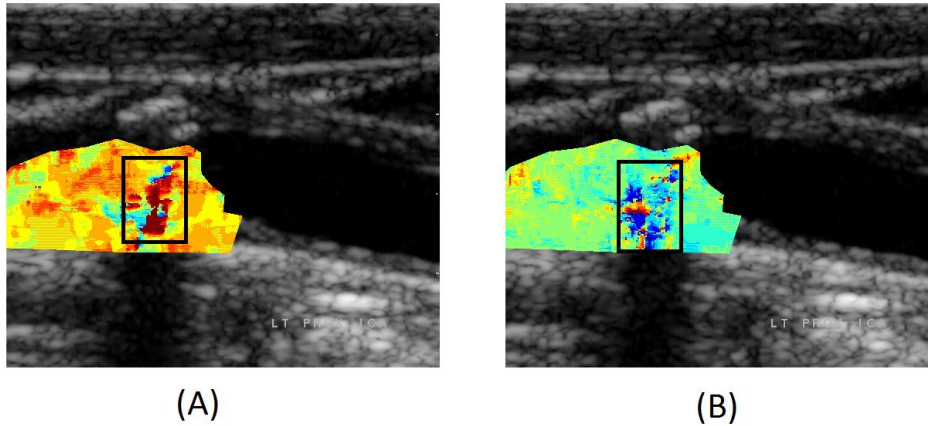
Στα παραπάνω αποτελέσματα παρατηρούνται όπως και στα αποτελέσματα της διπλωματικής εργασίας μία μικρή διακύμανση στο χρωματισμό κατά τη συστολή και τη διαστολή της καρωτίδας. Ωστόσο, σε κάθε περίπτωση το μεγαλύτερο μέρος της καρωτίδας χρωματίζεται κατάλληλα σύμφωνα με τη φάση στην οποία βρίσκεται (συστολή ή διαστολή) δίνοντας έτσι μια εποπτική εικόνα της μηχανικής συμπεριφοράς και της κίνησης του τοιχώματος.

Με βάση τα ελαστογραφήματα ακτινικής κίνησης που κατασκευάστηκαν για τους υγιείς εξεταζόμενους παρατηρήθηκε ότι το στάδιο συστολής της καρωτίδας είναι πολύ πιο σύντομο σε σχέση με το στάδιο της διαστολής, φτάνοντας κοντά στην αναμενόμενη αναλογία, όπου η διαστολή καταλαμβάνει τα 2/3 του καρδιακού κύκλου και η συστολή το υπόλοιπο [Mau08]. Επιπλέον, παρατηρώντας τα ίδια ελαστογραφήματα διαπιστώθηκε ότι στην κατά τη διάρκεια της συστολής, η συστολή του τοιχώματος συμβαίνει με μία χρονική καθυστέρηση κατά την κατεύθυνση της ροής του αίματος (από τα δεξιά προς τα αριστερά στην εικόνα).

Στην περίπτωση των ελαστογραφημάτων διαμήκους κίνησης, εμφανίζεται μεγαλύτερος θόρυβος στην χρωματική απεικόνιση της κίνησης του τοιχώματος καθώς παρατηρούνται μεγαλύτερες διακυμάνσεις στο χρωματισμό των σημείων της περιοχής ενδιαφέροντος. Αυτό συμβαίνει διότι στον διαμήκη άξονα υπάρχει μεγαλύτερη ομοιογένεια του τοιχώματος γεγονός που δεν επιτρέπει μεγάλη ακρίβεια στην εκτίμηση της διαμήκους κίνησης των σημείων. Ωστόσο, και σε αυτήν την περίπτωση παρατηρείται ένα γενικό μοτίβο κίνησης σύμφωνα με το χρωματισμό της περιοχής ενδιαφέροντος, ειδικά στα σημεία κοντά στο όριο αυλού-τοιχώματος. Συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι αρχικά ξεκινώντας από τη συστολή του αγγείου, το κάτω τοίχωμα κινείται ανάποδα προς τη φορά της ροής του αίματος ενώ στη συνέχεια, προς το τέλος της συστολής και την αρχή της διαστολής, παρατηρείται διαμήκης κίνηση με ίδια κατεύθυνση με τη ροή του αίματος. Αργότερα, προς το τέλος της διαστολής παρατηρείται πάλι κίνηση προς την αντίθετη κατεύθυνση σχετικά με τη ροή του αίματος. Ανάλογα αποτελέσματα υπήρξαν και στην εργασία [Gol07].

Και στις δύο περιπτώσεις ελαστογραφημάτων (ακτινικής και διαμήκους κίνησης) τα αποτελέσματα που ελήφθησαν παρουσίασαν περίπου τα ίδια χαρακτηριστικά και περίπου παρόμοιες τιμές όπως υποδηλώνει η χρωματική κλίμακα του καθενός. Συνεπώς, φαίνεται ότι μπορεί τα αποτελέσματά της να αναπαραχθούν για διαφορετικούς υγείς εξεταζόμενους, όπως έχει διατυπωθεί στην εργασία [Mau08].

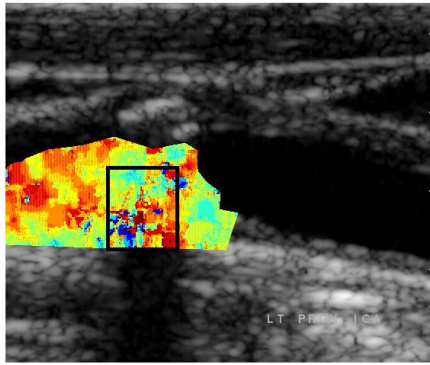
Στη συνέχεια, εξετάστηκαν πραγματικές ακολουθίες εικόνων από ασθενείς με αθηρωμάτωση. Η μία περίπτωση αθηρωμάτωσης ήταν συμπτωματική και η άλλη ασυμπτωματική. Από τα ελαστογραφήματα ακτινικής κίνησης, παρατηρήθηκε ότι αρχικά στην περίπτωση της συμπτωματικής πλάκας ότι κατά τη συστολή του αγγείου συμπιέζεται προς τη φορά του ακτινικού άξονα. Ωστόσο, στη συνέχεια, κατά τη διάρκεια της διαστολής δεν αναπτύσσονται σημαντικές μηχανικές καταπονήσεις. Επίσης, στην περίπτωση της ασυμπτωματικής πλάκας παρατηρήθηκε ότι η συμπίεση της κατά τη διάρκεια της συστολής αν και μικρότερη σε μέτρο, κάτι το οποίο υποδηλώνουν οι λιγότεροι έντονοι χρωματισμοί της, διήρκεσε μεγαλύτερο χρονικό διάστημα και κατέλαβε μεγαλύτερο μέρος του καρδιακού κύκλου. Επιπλέον, στην ίδια περίπτωση παρατηρήθηκε ότι σε κάποια σημεία όπου διαχωρίζεται η αθηρωματική πλάκα από το τοίχωμα οι τιμές της μηχανικής καταπόνησης στην ακτινική διεύθυνση ήταν πολύ μεγαλύτερες σε σχέση με τα υπόλοιπα σημεία της πλάκας και του τοιχώματος (Εικόνα 67).



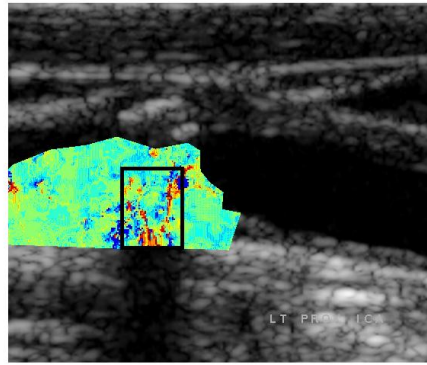
Εικόνα 67 : Ελαστογραφήματα ακτινικής κίνησης της ασυμπτωματικής αθηρωματικής πλάκας (A) κατά τη συστολή και (B) κατά τη συστολή του αγγείου με σημειωμένα τα σημεία όπου παρατηρείται μεγαλύτερη μηχανική καταπόνηση κατά μέτρο

Το γεγονός αυτό μπορεί να οφείλεται στο ότι η σκληρή πλάκα κατά την συμπίεσή της μεταφέρει ένα τμήμα της μηχανικής καταπόνησης που υφίσταται στο περιβάλλον τοίχωμα [Sch07].

Αντίστοιχα για την περίπτωση των ελαστογραφημάτων διαμήκους κίνησης και στις δύο περιπτώσεις παρατηρείται ότι οι μεγαλύτερες κατά μέτρο διαμήκεις καταπονήσεις εμφανίζονται σε σημεία κοντά στη διαχωριστική επιφάνεια πλάκας-αυλού καθώς και στα σημεία όπου η πλάκα ενώνεται με το υπόλοιπο αρτηριακό τοίχωμα. Αυτό έρχεται σε πλήρη συμφωνία με τα συμπεράσματα της εργασίας [Sto07], όπου δηλώνεται ότι οι μεγαλύτερες διαμήκεις καταπονήσεις εμφανίζονται στις διαχωριστικές επιφάνειες αυλού και περιβάλλοντος ιστού καθώς και μεταξύ σκληρών και μαλακών ιστών. Επιπλέον, σημειώνεται ότι και στην περίπτωση της ασυμπτωματικής πλάκας παρατηρούμε υψηλές μηχανικές καταπονήσεις και στη διαμήκη διεύθυνση στην περιοχή σημείων που σημειώσαμε πιο πάνω (Εικόνα 68).



(A)

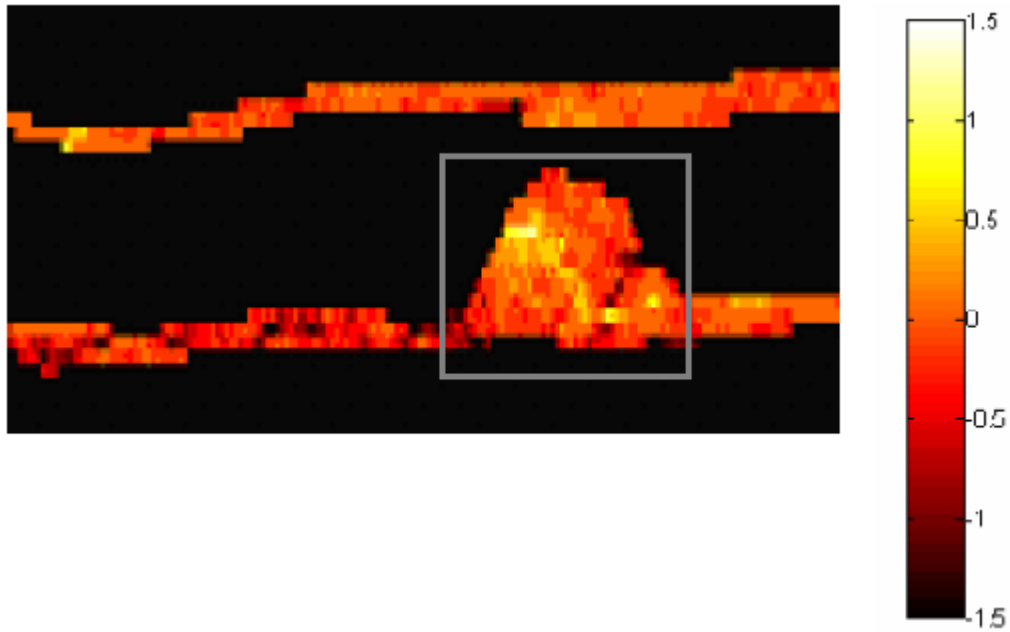


(B)

Εικόνα 68 : Ελαστογραφήματα διαμήκους κίνησης της ασυμπτωματικής αθηρωματικής πλάκας (A) κατά τη συστολή και (B) κατά τη συστολή του αγγείου με σημειωμένα τα σημεία όπου παρατηρείται μεγαλύτερη μηχανική καταπόνηση κατά μέτρο

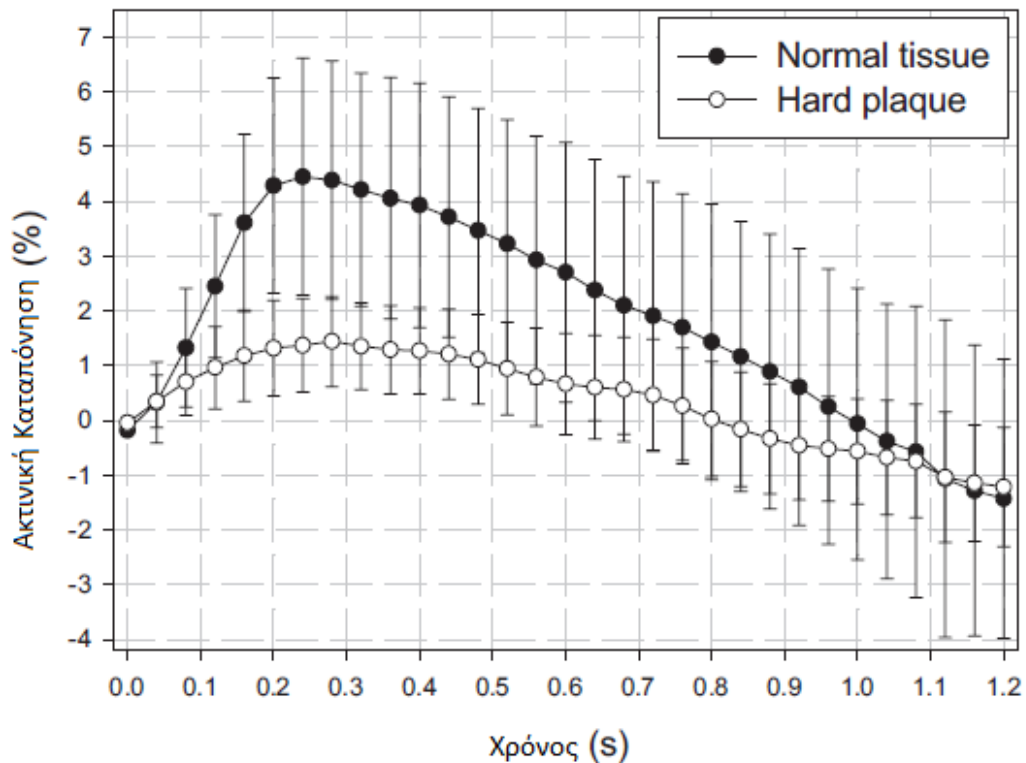
Συνεπώς, και στις δύο περιπτώσεις ελαστογραφημάτων της ασυμπτωματικής αθηρωματικής πλάκας εμφανίζονται στη συγκεκριμένη περιοχή υψηλές μηχανικές καταπονήσεις με αντίθετες κατευθύνσεις και σημαντικές ασυνέχειες στην ακτινική και τη διαμήκη κίνηση με αποτέλεσμα αυτό ίσως να υποδηλώνει πιθανή ρήξη στην ίδια την αθηρωματική πλάκα [Bon00]. Επίσης, λόγω των σχετικά υψηλών καταπονήσεων στην αθηρωματική πλάκα χρειάζεται προσοχή διότι ο κίνδυνος εμφάνισης φλεγμονής είναι αυξημένος, με αποτέλεσμα τη μειωμένη σταθερότητα της [Sch07].

Επιπλέον, όπως παρατηρήθηκε στις αθηρωματικές πλάκες που μελετήθηκαν και ειδικά στην ασυμπτωτική, στο ίδιο ελαστογράφημα εμφανίζονταν υψηλές αλλά και χαμηλές κατά μέτρο τιμές καταπόνησης (βλ. Εικόνα 68B). Το γεγονός αυτό έχει διαπιστωθεί και από την εργασία [Rib05], στην οποία υπάρχει το αντίστοιχο ελαστογράφημα (Εικόνα 69) και στο οποίο παρατηρούνται περιοχές με υψηλή καταπόνηση αλλά και περιοχές με χαμηλή καταπόνηση στην αθηρωματική πλάκα.



Εικόνα 69 : Ελαστογράφημα καρωτίδας με αθηρωματική πλάκα, η οποία έχει σημειωθεί στο σχήμα [Rib05]

Στη συνέχεια, εξαγάγαμε διαγράμματα με τη μέση τιμή της ακτινικής καταπόνησης υπολογισμένη για όλα τα σημεία της περιοχής ενδιαφέροντος. Παρατηρήθηκε ότι οι αριθμητικές τιμές είναι πολύ κοντινές για όλους τους υγιείς εξεταζόμενους επιβεβαιώνοντας έτσι την αναπαραξιμότητα των ελαστογραφημάτων για διαφορετικούς υγιείς εξεταζόμενους [Mau08]. Επίσης, στην περίπτωση των δύο ασθενών εμφανίστηκε μία ασυμφωνία στις μέσες τιμές της καταπόνησης κατά τη διάρκεια ενός καρδιακού κύκλου. Ωστόσο, και πάλι οι ακραίες τιμές καταπόνησης είναι πολύ κοντά μεταξύ τους. Τέλος, στην περίπτωση που λήφθηκε ο μέσος όρος των καταπονήσεων για όλους τους εξεταζόμενους κάθε τύπου (υγιείς και ασθενείς) παρατηρήθηκε ότι γενικά το μέτρο των καταπονήσεων στην περίπτωση του υγιούς τοιχώματος είναι μεγαλύτερο συγκριτικά με το μέτρο των καταπονήσεων στην περίπτωση της σκληρής αθηρωματικής πλάκας, ειδικά στη διάρκεια της συστολής όπως έχει διαπιστωθεί και στην εργασία [Sch07] (βλ. Εικόνα 11 και Εικόνα 70).



Εικόνα 70 : Μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις ακτινικής καταπόνησης που υπολογίστηκαν στη χρονική διάρκεια 4 καρδιακών κύκλων σε όλη τη διάρκεια ενός καρδιακού κύκλου [Sch07]

Σε γενικές γραμμές με βάση όλα τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι η ελαστογραφία λειτουργεί συμπληρωματικά προς τις τεχνικές ανάλυσης κίνησης που έχουν αναπτυχθεί για την εξέταση των μηχανικών ιδιοτήτων του τοιχώματος της καρωτίδας. Αυτό συμβαίνει διότι ενώ οι τεχνικές ανάλυσης κίνησης εφαρμόζονται για ένα σημείο του τοιχώματος σε όλη τη διάρκεια της καταγραφής δεδομένων, το ελαστογράφημα παρέχει πληροφορίες για μία εκτεταμένη περιοχή ανάμεσα σε δύο χρονικές στιγμές στο σύνολο της καταγραφής. Ωστόσο, το ελαστογράφημα έχει τη δυνατότητα επέκτασης στο χρόνο εάν υπολογιστεί για διαδοχικά ζεύγη εικόνων στη διάρκεια της καταγραφής, κάτι το οποίο όμως απαιτεί σημαντική αύξηση των απαιτήσεων σε υπολογιστικούς πόρους και σε χρόνο.

5.2 Μελλοντικές προοπτικές

Το ελαστογράφημα παρουσιάστηκε ως ένα εργαλείο εποπτικής παρουσίασης των μηχανικών ιδιοτήτων του τοιχώματος της καρωτίδας ενώ έγινε μία δοκιμή της χρήσης του σε περιπτώσεις ασθενών με αθηρωμάτωση, προκειμένου να ελεγχθεί η χρησιμότητά του στο χαρακτηρισμό του αρτηριακού τοιχώματος. Στην κατεύθυνση αυτή επόμενα βήματα που μπορούν να γίνουν είναι καταρχάς η χρήση δεδομένων πίεσης του ασθενή προκειμένου να

υπολογιστεί το μέτρο της ελαστικότητας (elastic modulus) και να απεικονιστεί αυτό στη θέση της μηχανικής καταπόνησης κάθε σημείου.

Επίσης, θα ήταν δυνατό να γίνει πειραματισμός με διαφορετικές παραμέτρους του αλγορίθμου κίνησης που χρησιμοποιεί η τεχνική ελαστογραφίας που αναπτύχθηκε καθώς και με διάφορους αλγορίθμους εκτίμησης κίνησης και υπολογισμού της μηχανικής καταπόνησης που χρησιμοποιούνται στον τομέα της ελαστογραφίας προκειμένου να βελτιωθεί η ποιότητα των αποτελεσμάτων ή και να μειωθεί ο χρόνος υπολογισμού του ελαστογραφήματος για μεγάλες ακολουθίες εικόνων.

Εν συνεχεία, η παραπάνω τεχνική που υλοποιήθηκε θα μπορούσε να εφαρμοστεί και σε άλλα τμήματα της ευρύτερης καρωτίδας, ανάμεσα σε αυτά το σημείο διχασμού της καρωτίδας και η έσω καρωτίδα. Παράλληλα, η εφαρμογή της τεχνικής σε περισσότερες πραγματικές ακολουθίες εικόνων υγιών και ασθενών ατόμων θα μπορούσε να προσφέρει περισσότερα στοιχεία, τα οποία θα συνέβαλαν στον εγκυρότερο χαρακτηρισμό του αρτηριακού τοιχώματος και στην καλύτερη κατανόηση των αποτελεσμάτων της ελαστογραφίας.

Τέλος, με την έρευνα των παραπάνω ζητημάτων θα μπορούσε να αναπτυχθεί μία τεχνική ελαστογραφίας η οποία θα ενσωματωθεί σε ένα φιλικό προς το χρήστη υπολογιστικό εργαλείο. Το εργαλείο αυτό θα επιτρέπει στο χρήστη να επιλέγει τις ακολουθίες εικόνων καθώς και τα ζεύγη μεταξύ των οποίων θα εφαρμοστεί η τεχνική. Στη συνέχεια, θα του παρουσιάζει την πρώτη εικόνα της ακολουθίας προκειμένου ο χρήστης να επιλέγει την περιοχή ή τις περιοχές ενδιαφέροντος, Επόμενο και τελευταίο βήμα θα είναι η παραγωγή των αντίστοιχων ελαστογραφήματων. Επίσης, στο συγκεκριμένο υπολογιστικό εργαλείο θα μπορούσε να ενσωματωθεί η δυνατότητα να παρέχει μέσες τιμές μηχανικής καταπόνησης από διαφορετικούς καρδιακούς παλμούς, από επιλεγμένες περιοχές ενδιαφέροντος του τοιχώματος, σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα προκειμένου να ελέγχεται καλύτερα η μηχανική συμπεριφορά τους.

5.3 Συμπεράσματα

Με βάση τα αποτελέσματα της εργασίας, συμπεραίνεται ότι το ελαστογράφημα μπορεί να δώσει μια παραστατική εικόνα της μηχανικής συμπεριφοράς και της κίνησης του αρτηριακού τοιχώματος της καρωτίδας. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως συμπληρωματικό εργαλείο για τον χαρακτηρισμό του αρτηριακού τοιχώματος, και ειδικότερα για το χαρακτηρισμό των αθηρωματικών πλακών στην καρωτίδα και την αξιολόγηση του κινδύνου που παρουσιάζουν. Συστηματική εφαρμογή της ελαστογραφίας σε πραγματικές ακολουθίες εικόνων της καρωτίδας από υγιείς εξεταζόμενους αλλά και ασθενείς με αθηρωμάτωση στην καρωτίδα αναμένεται να προσφέρει πλήθος δεδομένων σχετικά με τη μηχανική συμπεριφορά και την ελαστικότητα των τοιχωμάτων και των αθηρωματικών πλακών.

6

Βιβλιογραφία

- [Ame99] A. C. o. physicians, *Complete home medical guide*. 1999.
- [Bar98] H. J. M. Barnett, D. W. Taylor, M. Eliasziw, A. J. Fox, G. G. Ferguson, R. B. Haynes, R. N. Rankin, G. P. Clagett, V. C. Hachinski, D. L. Sackett, K. E. Thorpe, M. Math, and H. E. Meldrum, "Benefit of carotid endarterectomy in patients with symptomatic moderate or severe stenosis," *N Engl J Med*, no. 339, pp. 1415-1425, 1998.
- [Bon00] O. Bonnefous, F. Luizy, and S. Kownator, "Arterial wall motion imaging: a new ultrasound approach to vascular characterization," *Medica Mundi*, vol. 44, no. 2, pp. 37-43, 2000.
- [Car09] C. G. Caro, "Discovery of the role of wall shear in atherosclerosis," *Artioscler Thromb Vasc Biol*, no. 29, pp. 158-161, 2009.
- [Ces97] E. I. Cespedes, J. Ophir, H. Ponnekanti, and N. F. Maklad, "Elastography: elasticity imaging using ultrasound with application to muscle and breast in vivo," *Ultrason. Imag.*, vol. 15, no. 2, pp. 73-88, 1997.
- [deK02] C. L. de Korte and A. F. W. van der Steen, "Intravascular ultrasound elastography: an overview," *Ultrasonics*, no. 40, pp. 859-865, 2002.
- [deK03] C. L. de Korte, J. A. Schaar, F. Mastik, P. W. Serruys, and A. F. W. van der Steen, "Intravascular Elastography: From Bench to Bedside," *Journ of Interv Cardio*, vol. 16, no. 3, pp. 253-259, 2003.
- [Eri02] A. Eriksson, E. Greiff, T. Loupas, M. Persson, and P. Pesque, "Arterial pulse wave velocity with tissue Doppler imaging.," *Ultrasound Med Biol*, no. 28, pp. 571-580, 2002.
- [Exe95] Executive committee for the Asymptomatic Carotid Atherosclerosis Study,

- "Endarterectomy for asymptomatic carotid artery stenosis.," *JAM*, no. 273, pp. 1421-1428, 1995.
- [Fal92] E. Falk, "Why do plaques rupture?," *Circulation*, no. 86(Suppl III), pp. III-30-III-42, 1992.
- [Gar97] B. S. Garra, E. I. Cespedes, J. Ophir, S. R. Spratt, R. A. Zuurbier, C. M. Magnani, and M. F. Pennanen, "Elastography of breast lesions : initial clinical results," *Radiology*, vol. 202, no. 1, pp. 79-86, 1997.
- [Gas10] A. Gastouniotti, S. Golemati, S. J., and K. S. Nikita, "Kalman-filter-based block matching for arterial wall motion estimation from b-mode ultrasound," in *imaging systems and techniques, 2010 IEEE intern conf*, Thessaloniki, 2010.
- [Gas11] A. Gastouniotti, N. N. Tsiaparas, S. Golemati, and K. S. Nikita, "Multiscale block matching for carotid artery wall motion estimation from B-mode ultrasound," in , Athens, 2011.
- [Gol00] J. Golledge, R. M. Greenhalgh, and A. H. Davies, "The symptomatic carotid plaque," *Stroke*, no. 31, pp. 774-781, 2000.
- [Gol03] S. Golemati, A. Sassanoni, J. M. Lever, A. A. Bharath, S. Dhanjil, and A. N. Nicolaidis, "Carotid artery wall motion estimated from B-Mode ultrasound using region tracking and block matching," *Ultrasound in Med.*, no. 29, pp. 387-399, 2003.
- [Gol07] S. Golemati, J. Stoitsis, and K. S. Nikita, "Motion analysis of the carotid artery wall and plaque using B-mode ultrasound," *Vascular Disease Prevention*, no. 4, pp. 0001-0007, 2007.
- [Gol09] S. Golemati, S. J.S., D. A. Perakis, E. Varela, A. Alexandridi, C. H. Davos, and K. S. Nikita, "Carotid artery motion estimation from sequences of B-mode ultrasound images – effect of scanner settings and image normalization," *IEEE Trans Instr Meas* , no. 58(7), pp. 2102-2112, 2009.
- [Hay03] K. Hayashi, "Mechanical properties of soft tissues and arterial walls," in *Biomechanics of soft tissue in cardiovascular systems*. Udine: Springer Wien New York, 2003, pp. 15-64.
- [Hum03] J. Humphrey and A. McCulloch, "The cardiovascular system - anatomy, physiology and cell biology," in *Biomechanics of soft tissue in cardiovascular systems*. Udine: Springer Wien New York, 2003, pp. 7-9.
- [Jun03] L. C. Junqueira and J. Carneiro, *Βασική ιστολογία*, 5η έκδοση ηθ ed. Rio de Janeiro, Brazil: Π.Χ. Πασχαλίδης, 2003.
- [Kan02] H. Kanai, H. Hasegawa, M. Ichiki, F. Tezuka, and Y. Koiwa, "Elasticity imaging of atheroma with transcutaneous ultrasound-preliminary study.," *Circulation*, no. 107, pp. 3018-3021, 2002.
- [Lor99] A. Lorenz, H. J. Sommerfeld, M. Garcia-Schurmann, S. Philippou, T. Senge, and H. Ermert, "A new system for the acquisition of ultrasonic multicompressionstrain images of the human prostate in vivo," *IEEE trans. Ultrason., Ferroelect. Freq. Contr.*, no. 46, pp. 1147-1154, May 1999.
- [Mao00] F. Mao, J. Gill, D. Downey, and A. Fenster, "Segmentation of carotid artery in ultrasound images: method development and evaluation technique," *Med Phys*, no. 27, pp. 1-10, 2000.
- [Mau04] R. L. Maurice, J. Ohayon, Y. Frétiigny, M. Bertrand, G. Soulez, and G. Cloutier, "Noninvasive Vascular Elastography: Theoretical Framework,"

- IEEE Transactions on Medical Imaging*, no. 23, pp. 164-180, 2004.
- [Mau07] R. L. Maurice, J. Fromageau, E. Brusseau, G. Rioufol, G. Finet, and G. Cloutier, "On the potential of the lagrangian estimator for endovascular ultrasound elastography: in vivo human coronary artery study," *Ultrasound in Med. & Biol.*, Vol. 33, No. 8, pp. 1199-1205, vol. Vol 33, No. 8, pp. 1199-1205, 2007.
- [Mau08] R. L. Maurice, G. Soulez, M. F. Giroux, and G. Cloutier, "Noninvasive vascular elastography for carotid artery characterization on subjects without previous history of atherosclerosis," *Med Phys*, no. 35, pp. 3436-3443, 2008.
- [Mau99] R. L. Maurice and M. Bertrand, "Lagrangian speckle model and tissue-motion estimation - theory," *IEEE Trans on Med Imag*, vol. 18, no. 7, pp. 593-603, 1999.
- [Mea99] S. Meairs and M. Hennerici, "Four-dimensional ultrasonographic characterization of plaque surface motion in patients with symptomatic and asymptomatic artery stenosis," *Stroke*, no. 30, pp. 1807-1813, 1999.
- [Mer08] M. E., C. G., C. Schmitt, and M. R.L., "Performance evaluation of different implementations of the lagrangian speckle model estimator for non-invasive vascular elastography," *Med.Phys.*, vol. 35, no. 7, pp. 3116-3126, 2008.
- [Nor91] North American Symptomatic Carotid Endarterectomy Trial collaborators., "Beneficial effect of carotid endarterectomy in symptomatic patients with high – grade carotid stenosis.," *N Engl J Med*, no. 325, pp. 445-453, 1991.
- [Oph] J. Ophir, B. Garra, F. Kallel, E. E. Konofagou, R. Righetti, and T. Varghese, "Elastography : imaging of tissue elastic properties in vitro and in vivo," Παρουσίαση.
- [Oph02] J. Ophir, S. K. Alam, B. S. Garra, F. Kallel, E. E. Konofagou, T. Krouskop, C. R. B. Merritt, R. Righetti, R. Souchon, S. Srinivasan, and T. Varghese, "Elastography : imaging the elastic properties of soft tissue with ultrasound," *J. Med. Ultras.*, no. 29, pp. 155-171, 2002.
- [Oph91] J. Ophir, E. I. Céspedes, H. Ponnekanti, Y. Yazdi, and X. Li, "Elastography: A quantitative method for imaging the elasticity in biological tissues," *Ultrasound Imaging*, pp. 111-134, 1991.
- [Pes00] A. Pesavento, A. Lorenz, S. Siebers, and H. Ermert, "New real-time strain imaging concepts using diagnostic ultrasound," *Phys. Med. Biol.*, vol. 45, no. 6, pp. 1423-1435, 2000.
- [Pol98] J. F. Polak, L. Shemanski, and D. H. O’Leary, "Hypoechoic plaque at US of the carotid artery: an independent risk factor for incident stroke in adults aged 65 years or older.Cardiovascular health study.," *Radiology*, no. 208, pp. 649-654, 1998.
- [Pri06] J. L. Prince and J. M. Links, *Medical imaging signals and systems*. PEARSON Prentice hall, 2006.
- [Rib05] H. Ribbers, L. R. G.P., H. S., B. J. D., and d. K. C.L., "Non-invasive two dimensional elastography of the carotid artery," in *IEEE Ultrasonics Symposium*, 2005, pp. 1113-1116.
- [Sch03] J. A. Schaar, C. L. de Korte, F. Mastik, R. Baldewsing, E. Regar, P. de Feyter, C. J. Slager, A. F. W. van der Steen, and P. W. Serruys,

- "Intravascular Palpography for High-Risk Vulnerable Plaque Assessment," *Herz*, no. 28, pp. 488-495, 2003.
- [Sch05] Schmitt C., M. R.L., L. S., G. M.F., and G. S., "Development of non-invasive vascular elastography for carotid artery plaque assessment," in *IEEE Ultrasonics Symposium*, 2005, pp. 389-392.
- [Sch07] C. Schmitt, G. Soulez, R. Maurice, M. Giroux, and G. Cloutier, "Noninvasive vascular elastography: toward a complementary characterization tool of atherosclerosis in carotid arteries," *Ultrasound in Med.*, no. 33, pp. 1841-1858, 2007.
- [Sto07] J. Stoitsis, S. Golemati, E. Bastouni, and K. S. Nikita, "A mathematical model of the mechanical deformation of the carotid artery wall and its application to clinical data," in *Proceedings of the 29th Annual International Conference of the IEEE EMBS*, Lyon, France, 2007, pp. 2163-2166.
- [Tan11] M. Tanabe, *Ultrasound Imaging*. Rijeka, Croatia: InTech, 2011.
- [Thu95] M. Thubrikar and F. Robicsec, "Pressure-induced arterial wall stress and atherosclerosis.," *Ann Thorac Surg*, pp. 1594-1603, 1995.
- [Tsi10] N. Tsiaparass, S. Golemati, I. Andreadis, J. Stoitsis, and K. S. Nikita, "Multiscale geometric texture analysis of ultrasound images of carotid atherosclerosis," *Information Technology and Applications in Biomedicine*, pp. 1-4, 2010.
- [Wel01] G. Welch and G. Bishop. (2001) "An Introduction to the Kalman Filter". [Online]. http://www.cs.unc.edu/~tracker/media/pdf/SIGGRAPH2001_CoursePack_08.pdf
- [Wen91] I. Wendelhag, T. Gustavsson, M. Suurkula, G. Berglund, and J. Wikstrand, "Ultrasound measurement of wall thickness in the carotid artery: fundamental principles and description of a computerized analysing system," *Clinic. Phys.*, vol. 11, no. 6, pp. 567-577, Nov. 1991.
- [Woo89] J. P. Woodcock, "Characterization of the atheromatous plaque in the carotid arteries," *Clin Phys Physiol Meas*, no. 10(Suppl. A), pp. 45-49, 1989.
- [Γασ09] Α. Γαστουνιώτη, "Ανάλυση της κίνησης του αρτηριακού τοιχώματος από εικόνες υπερήχων με χρήση μεθόδων προσαρμοστικής ταύτισης περιοχών," Διπλωματική Εργασία, 2009.
- [Κου04] Δ. Κουτσούρης, Κ. Νικήτα, and Σ. Παυλόπουλος, *Ιατρικά Απεικονιστικά Συστήματα*. Αθήνα: ΤΖΙΟΛΑ, 2004.
- [Στο07] Γ. Σ. Στοίτσης, "Υπολογιστική επεξεργασία και ανάλυση ακολουθιών εικόνων υπερήχων της καρωτίδας: συσχέτιση με τη μηχανική συμπεριφορά του αρτηριακού τοιχώματος," Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο ΣΗΜΜΥ - Πανεπιστήμιο Πατρών Τμήμα Ιατρικής Διδακτορική Διατριβή, 2007.