



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**Εκτίμηση της επικινδυνότητας αθηρωματικής πλάκας της
καρωτίδας: Προσδιορισμός του δείκτη Juxtaluminal Black
Area - JBA σε εικόνες υπερήχου Β-σάρωσης.**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Λέκκας Κ. Κωνσταντίνος

Επιβλέπουσα : Κωνσταντίνα Σ. Νικήτα
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π

Αθήνα, Ιούλιος 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**Εκτίμηση της επικινδυνότητας αθηρωματικής πλάκας της
καρωτίδας: Προσδιορισμός του δείκτη Juxtaluminal Black
Area - JBA σε εικόνες υπερήχου Β-σάρωσης.**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Λέκκας Κ. Κωνσταντίνος

Επιβλέπουσα : Κωνσταντίνα Σ. Νικήτα
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 14^η Ιουλίου 2016.

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

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

.....
Ανδρέας-Γεώργιος
Σταφυλοπάτης
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Ιούλιος 2016

.....
Λέκκας Κ. Κωνσταντίνος

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

Copyright © Λέκκας Κ. Κωνσταντίνος

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περιεχόμενα

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	7
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	8
ABSTRACT.....	9
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	10
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	12
1.1. Στοιχεία ανατομίας καρωτιδικών αρτηριών.....	12
1.2. Η ανατομία του αρτηριακού τοιχώματος.....	13
1.3 Μηχανισμοί αθηρογένεσης.....	14
1.3.1 Κυτταρικοί μηχανισμοί.....	14
1.3.2 Ενασβεστίωση και λιπίδια.....	15
1.3.3 Ρήξη και στένωση.....	16
1.3.4 Ταχεία ανάπτυξη των πλακών.....	17
1.4 Συμπτώματα.....	18
1.5 Κόστος.....	18
1.6 Θεραπεία.....	18
1.7 Υπερηχογράφημα.....	19
1.7.1 Από τον ήχο στην εικόνα.....	21
1.7.2 Παραγωγή του ηχητικού κύματος.....	21
1.7.3 Λήψη των ηχητικών κυμάτων.....	22
1.7.4 Δημιουργία της εικόνας.....	23
1.7.5 Ελαστογραφία.....	23
1.8 Η υφή στην εικόνα.....	24
1.9 Σκοπός και δομή της εργασίας.....	25
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 Η ΥΦΗ ΚΑΙ ΔΕΙΚΤΕΣ ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΝΤΟΣ.....	26
2.1 Η υφή στην εικόνα.....	26
2.1.1 Εύρεση χαρακτηριστικών της εικόνας.....	26
2.1.2 Ο τόνος και η υφή.....	26
2.1.3 Η ανάλυση της υφής.....	28
2.1.4 Τεχνικές εξαγωγής χαρακτηριστικών υφής.....	31
2.2 Εκτίμηση της κίνησης σε εικόνα.....	36
2.3 Οι δείκτες ελαστικότητας.....	36
2.4 Ο δείκτης ενδιάμεσης τιμής φωτεινότητας (Grey Scale Median- GSM).....	37
2.5 Ο τύπος της πλάκας.....	38
2.6 Το ολικό εμβαδόν της πλάκας.....	40

2.7 Ο δείκτης Juxtaluminal Black Area - JBA	40
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	
ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ JBA	44
3.1 Εισαγωγή	44
3.2 Σύνολα δεδομένων.....	44
3.3 Γενική μεθοδολογία.....	46
3.4 Δημιουργία πινάκα εικόνων	47
3.5 Εύρεση εικόνων συστολής - διαστολής.....	47
3.6 Κανονικοποίηση εικόνων	48
3.7 Αποκοπή της πλάκας από την εικόνα.....	49
3.8 Εύρεση του εμβαδού της πλάκας	49
3.9 Εύρεση του τύπου της πλάκας	49
3.10 Εύρεση των χαρακτηριστικών υφής της πλάκας	49
3.11 Εύρεση του JBA της πλάκας	50
3.12 Εύρεση στατιστικής συσχέτισης μεταξύ των χαρακτηριστικών της πλάκας	53
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	56
4.1 Συσχέτιση των JBA, GSM με τους υπόλοιπους δείκτες ενδιαφέροντος.....	56
4.2 Μελέτη για τα τρία σύνολα δεδομένων	63
4.2.1 Αποτελέσματα για το πρώτο σύνολο δεδομένων	63
4.2.2 Αποτελέσματα για το δεύτερο σύνολο δεδομένων.....	64
4.2.3 Αποτελέσματα για το τρίτο σύνολο δεδομένων	67
4.2.4 Συμπεράσματα για τους δείκτες JBA - GSM	69
4.3 Μελέτη εικόνων συστολής - διαστολής.....	70
4.4 Μελέτη σε επίπεδο βίντεο – περιστατικών	71
4.5 Συγκριτική μελέτη συνόλων δεδομένων.....	72
4.6 Αξιολόγηση του αυτοματοποιημένου δείκτη JBA.....	73
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ	74
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	76

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την καθηγήτρια Κωνσταντίνα Νικήτα για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, καθώς και για τη δυνατότητα που μου έδωσε να εκπονήσω την παρούσα διπλωματική εργασία κάτω από την καθοδήγηση της στο Εργαστήριο Βιοϊατρικών Προσομοιώσεων και Απεικονιστικής Τεχνολογίας.

Επιπροσθέτως, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στην υποψήφια διδάκτορα Μόνικα Ξενικού για τη διάθεση που επέδειξε, το χρόνο που αφιέρωσε και τις γνώσεις που μου μετέδωσε κατά την προσπάθεια μου.

Ευχαριστώ πολύ, επίσης, την Δρ. Αιμιλία Γαστουνιώτη για την παροχή των αλγορίθμων κίνησης, τον ιατρό Γιώργο Χαραλαμπόπουλο για την παροχή των επισημασμένων ιατρικών δεδομένων, καθώς και την καθηγήτρια Σπυρέττα Γολεμάτη για τις επιστημονικές συμβουλές της.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου και κυρίως την οικογένεια μου για την αμέριστη στήριξη τους σε κάθε μου βήμα.

Κωνσταντίνος Λέκκας

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η καρωτιδική αθηρωμάτωση αποτελεί τη συχνότερη γενεσιουργό αιτία αγγειακών εγκεφαλικών επεισοδίων, γεγονός που δημιουργεί την ανάγκη έγκαιρης και έγκυρης διάγνωσης της νόσου. Δεδομένου ωστόσο της δυσκολίας αξιολόγησης της σοβαρότητάς της μέσω των κλασικών ιατρικών πρακτικών, η ανεύρεση, η αξιολόγηση και η εφαρμογή δεικτών ικανών να συνδράμουν υποστηρικτικά στη διάγνωση και στη λήψη ιατρικής απόφασης σχετικά με την αντιμετώπισή της είναι ιδιαίτερης σημασίας.

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η υλοποίηση, η μελέτη και ο έλεγχος της καταλληλότητας για κλινική διάγνωση της καρωτιδικής αθηρωμάτωσης, του δείκτη JBA (Juxtaluminal Black Area), ο οποίος εκφράζει το εμβαδόν της μεγαλύτερης περιοχής της αθηρωματικής πλάκας που βρίσκεται κοντά στον αυλό και έχει χαμηλή φωτεινότητα (<25). Ο συγκεκριμένος δείκτης έχει προταθεί στην διεθνή βιβλιογραφία ως ικανός να ποσοτικοποιήσει τον κίνδυνο ρήξης της αθηρωματικής πλάκας με συνέπεια την πρόκληση σοβαρών συμπτωμάτων, όπως εγκεφαλικά επεισόδια, αμαύρωση κ.α. και ο υπολογισμός του γίνεται ημιαυτόματα, με επισήμανση της περιοχής ενδιαφέροντος από εξειδικευμένους ιατρούς.

Στην παρούσα εργασία, επιχειρείται η ανάπτυξη μιας αυτοματοποιημένης μεθόδου εντοπισμού των περιοχών JBA χωρίς τη μεσολάβηση του ανθρώπου. Αρχικά, στην περιοχή της αθηρωματικής πλάκας εφαρμόζεται κατώφλι χαμηλής έντασης φωτεινότητας. Στην δυαδική εικόνα που δημιουργείται διατηρούνται οι άσπρες περιοχές που ικανοποιούν το κριτήριο ελαχίστου εμβαδού. Στις εναπομένουσες περιοχές διατηρούνται αυτές που ικανοποιούν το κριτήριο ελάχιστης απόστασης. Για τις περιοχές αυτές υπολογίζεται το εμβαδόν και επιλέγεται ως εμβαδόν του JBA το μέγιστο εμβαδόν. Ο αλγόριθμος υπολογισμού του δείκτη JBA εφαρμόστηκε σε τρεις βάσεις δεδομένων με αλληλουχίες εικόνων υπερήχων B-Mode (B-Mode videos) ασθενών που έπασχαν από καρωτιδική αθηρωμάτωση. Σε αυτές ανιχνεύθηκαν οι εικόνες που ανήκουν σε χρονικές φάσεις συστολής και διαστολής με χρήση αλγορίθμου ανάλυσης κίνησης. Για τις χρονικές φάσεις συστολής και διαστολής, για τις αθηρωματικές πλάκες των ασθενών, υπολογίστηκαν πλέον του JBA και δείκτες υφής, ενώ ήταν διαθέσιμη και πληροφορία σχετικά με τον βαθμό στένωσης και τους δείκτες ελαστικότητας. Για τα παραπάνω χαρακτηριστικά υπολογίστηκε η στατιστική συσχέτισή τους με τον δείκτη JBA τόσο στις χρονικές περιόδους συστολής όσο και διαστολής. Τα αποτελέσματα δείχνουν έντονη συσχέτιση του δείκτη JBA με ήδη αποδεκτούς δείκτες επικινδυνότητας της αθηρωματικής πλάκας.

Η μελέτη που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αναδεικνύει την καταλληλότητα του αυτόματα υπολογιζόμενου δείκτη JBA ως επικουρικού δείκτη για την υποβοήθηση της διάγνωσης της επικινδυνότητας της αθηρωματικής πλάκας.

Λέξεις Κλειδιά

Καρωτιδική αθηρωμάτωση, Επικινδυνότητα αθηρωματικής πλάκας, Δείκτες υφής, Σκοτεινή περιοχή κοντά στον αυλό, JBA.

ABSTRACT

The fact that carotid atherosclerosis is the most common cause of stroke, highlights the need for reliable and early detection of the disease. Taking into consideration the difficulty of risk stratification of the disease through the classic medical practice, the design, development and application of computerized tools capable of assisting medical decision are of utmost importance.

The aim of the current diploma thesis is to evaluate the potential of the JBA (Juxtaluminal Black Area) index in clinical diagnosis. JBA defines the largest area of atheromatic plaque, which is adjacent to the lumen and has low intensity levels (<25). JBA has been proposed as a suitable index for risk analysis of atheromatic plaque stability, as the detachment of a part of the plaque may cause irreversible health damage to patient. Until today this index is calculated semi-automatically as the boundaries of the JBA area are defined manually by experienced physicians.

In this thesis, an automatic algorithm of tracking JBAs without human intervention is developed. First, in the region of the atheromatic plaque a threshold of low intensity is applied. In the binary image which is created the white regions, with size more than the minimum accepted surface, are kept. From the regions that remained, only the regions that are located closer to the lumen than the minimum accepted distance are kept. The area of these regions is calculated and the maximum area is chosen as JBA index. The JBA calculation algorithm has been applied on three databases which consist of B-Mode ultrasound videos of patients suffering from carotid atherosclerosis. A motion analysis algorithm was used to detect from the videos the time of systole and diastole. Moreover texture indices along with the degree of stenosis and elasticity indices were calculated. The statistical correlation of texture features with the JBA index was calculated for systolic and diastolic frames separately. The results show that there is significant correlation between JBA and already established indices, which characterize the risk of an atheromatic plaque.

This study shows that the automatically estimated JBA index can provide a valuable tool for calculating risk stratification.

Key Words

Carotid atherosclerosis, Plaque risk factors, Texture indices, Juxtaluminal Black Area, JBA.

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Ανατομία Καρωτίδας.	12
Εικόνα 2: Δομή αρτηρίας.	13
Εικόνα 3: Σωματίδια λιποπρωτεϊνών.	15
Εικόνα 4: Σενάρια εξέλιξη της αθηρωματικής πλάκας.	17
Εικόνα 5: Τρέχουσα κλινική μέθοδος λήψης απόφασης για την επιλογή θεραπείας αντιμετώπισης της καρωτιδικής αθηρωμάτωσης.	19
Εικόνα 6: Εικόνα B-mode υπερήχου.	20
Εικόνα 7: Τυπική μονάδα ιατρικού υπερήχου.	21
Εικόνα 8: Εστίαση μετατροπέα μέσω παλμών ελέγχου.	22
Εικόνα 9: Πιθανά σενάρια κατάληξης εκπεμπόμενων ηχητικών κυμάτων. ...	23
Εικόνα 10: Εικόνα ελαστογραφίας υπερήχου.	24
Εικόνα 11: Δείγματα εικόνων υφής.	27
Εικόνα 12: Παράδειγμα εικόνων στις οποίες κυριαρχεί ο τόνος.	28
Εικόνα 13: Παράδειγμα ιστογράμματος εικόνας.	32
Εικόνα 14: Παράδειγμα πίνακα συνύπαρξης.	35
Εικόνα 15: Παράδειγμα τιμών GSM σε αθηρωματική πλάκα.	38
Εικόνα 16: Παραδείγματα τύπων πλακών.	39
Εικόνα 17: Παράδειγμα πλάκας με JBA.	43
Εικόνα 18: Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στην παρούσα εργασία.	46
Εικόνα 19: Εικόνα που προέκυψε μετά από κανονικοποίηση.	48
Εικόνα 20: Περιοχή της αθηρωματικής πλάκας μετά την αποκοπή.	49
Εικόνα 21: Βήματα αυτοματοποιημένου αλγορίθμου εύρεσης του δείκτη JBA.	50
Εικόνα 22: Περιοχή της αθηρωματικής πλάκας μετά την κατωφλίωση.	51
Εικόνα 23: Περιοχή αθηρωματικής πλάκας μετά την εφαρμογή του κριτηρίου εμβαδού.	51
Εικόνα 24: Περιοχή αθηρωματικής πλάκας μετά την εφαρμογή του κριτηρίου ελάχιστης απόστασης.	52
Εικόνα 25: Τελική περιοχή JBA.	53
Εικόνα 26: Παραδείγματα μεταβλητών με μονότονη συσχέτιση και οι αντίστοιχοι συντελεστές συσχέτισης rho.	54
Εικόνα 27: Παράδειγμα εύρεσης της τιμής p σε κατανομή πιθανοτήτων. ...	55
Εικόνα 28: Συσχέτιση του JBA με τους υπόλοιπους δείκτες ενδιαφέροντος του πρώτου συνόλου δεδομένων, σε επίπεδο περιστατικών, για εικόνες συστολών και διαστολών.	70
Εικόνα 29: Συσχέτιση του JBA με τους υπόλοιπους δείκτες ενδιαφέροντος του δεύτερου συνόλου δεδομένων, για εικόνες διαστολών, σε επίπεδο βίντεο και περιστατικών.	71
Εικόνα 30: Συσχέτιση του JBA με τους υπόλοιπους δείκτες ενδιαφέροντος για τα 3 σύνολα, για εικόνες διαστολών, σε επίπεδο περιστατικών.	72

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Βιβλιογραφική ανασκόπηση για τον Δείκτη GSM.....	37
Πίνακας 2: Βιβλιογραφική ανασκόπηση για τον Δείκτη JBA.....	43
Πίνακας 3: Συνοπτική παρουσίαση των 3 συνόλων.	45
Πίνακας 4: Συσχέτιση των χαρακτηριστικών της πλάκας με τους δείκτες JBA και GSM σε επίπεδο περιστατικών και βίντεο για τις εικόνες συστολής (Σύνολο 1).....	57
Πίνακας 5: Συσχέτιση των χαρακτηριστικών της πλάκας με τους δείκτες JBA και GSM σε επίπεδο περιστατικών και βίντεο για τις εικόνες διαστολής (Σύνολο 1).....	58
Πίνακας 6: Συσχέτιση των χαρακτηριστικών της πλάκας με τους δείκτες JBA και GSM σε επίπεδο περιστατικών και βίντεο για τις εικόνες συστολής (Σύνολο 2).....	59
Πίνακας 7: Συσχέτιση των χαρακτηριστικών της πλάκας με τους δείκτες JBA και GSM σε επίπεδο περιστατικών και βίντεο για τις εικόνες διαστολής (Σύνολο 2).....	60
Πίνακας 8: Συσχέτιση των χαρακτηριστικών της πλάκας με τους δείκτες JBA και GSM σε επίπεδο περιστατικών και βίντεο για τις εικόνες συστολής (Σύνολο 3).....	61
Πίνακας 9: Συσχέτιση των χαρακτηριστικών της πλάκας με τους δείκτες JBA και GSM σε επίπεδο περιστατικών και βίντεο για τις εικόνες διαστολής (Σύνολο 3).....	62
Πίνακας 10: Οι στατιστικά σημαντικές συσχετίσεις του JBA με τους υπόλοιπους δείκτες, για εικόνες συστολής (Σύνολο 1).	63
Πίνακας 11: Οι στατιστικά σημαντικές συσχετίσεις του GSM με τους υπόλοιπους δείκτες, για εικόνες συστολής (Σύνολο 1).	63
Πίνακας 12: Οι στατιστικά σημαντικές συσχετίσεις του JBA με τους υπόλοιπους δείκτες, για εικόνες διαστολής (Σύνολο 1).	64
Πίνακας 13: Οι στατιστικά σημαντικές συσχετίσεις του GSM με τους υπόλοιπους δείκτες, για εικόνες διαστολής (Σύνολο 1).	64
Πίνακας 14: Οι στατιστικά σημαντικές συσχετίσεις του JBA με τους υπόλοιπους δείκτες, για εικόνες συστολής (Σύνολο 2).	65
Πίνακας 15: Οι στατιστικά σημαντικές συσχετίσεις του GSM με τους υπόλοιπους δείκτες, για εικόνες συστολής (Σύνολο 2).	65
Πίνακας 16: Οι στατιστικά σημαντικές συσχετίσεις του JBA με τους υπόλοιπους δείκτες, για εικόνες διαστολής (Σύνολο 2).	66
Πίνακας 17: Οι στατιστικά σημαντικές συσχετίσεις του GSM με τους υπόλοιπους δείκτες, για εικόνες διαστολής (Σύνολο 2).	66
Πίνακας 18: Οι στατιστικά σημαντικές συσχετίσεις του JBA με τους υπόλοιπους δείκτες, για εικόνες συστολής (Σύνολο 3).	67
Πίνακας 19: Οι στατιστικά σημαντικές συσχετίσεις του GSM με τους υπόλοιπους δείκτες, για εικόνες συστολής (Σύνολο 3)..	67
Πίνακας 20: Οι στατιστικά σημαντικές συσχετίσεις του JBA με τους υπόλοιπους δείκτες, για εικόνες διαστολής (Σύνολο 3).	68
Πίνακας 21: Οι στατιστικά σημαντικές συσχετίσεις του GSM με τους υπόλοιπους δείκτες, για εικόνες διαστολής (Σύνολο 3).	68

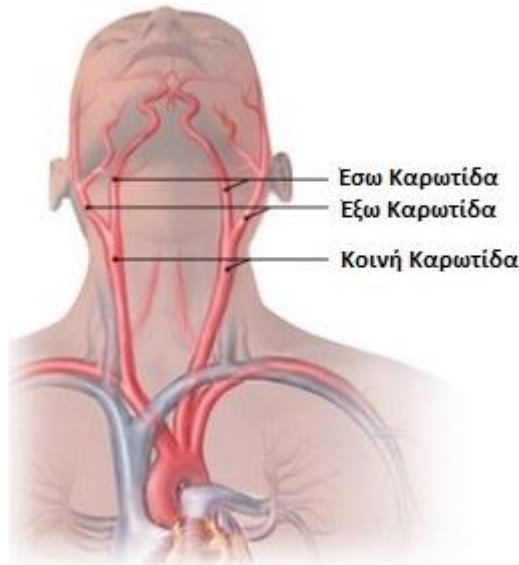
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Στοιχεία ανατομίας καρωτιδικών αρτηριών

Η αριστερή και η δεξιά κοινή καρωτιδική αρτηρία είναι οι αρτηρίες που τροφοδοτούν τη κεφαλή και τον τράχηλο με οξυγονωμένο αίμα. Διχάζονται στο ύψος του τράχηλου για να σχηματίσουν τις έξω και έσω καρωτιδικές αρτηρίες [1], [2].

Η κοινή καρωτίδα βρίσκεται αμφοτερόπλευρα στο ανθρώπινο σώμα. Η αριστερή κοινή καρωτίδα πηγάζει από την ανώνυμη, ενώ η δεξιά κατευθύνεται από το αορτικό τόξο. Οι δύο κοινές καρωτίδες στο άνω χείλος του θυρεοειδούς χόνδρου διαιρούνται στους δύο τελικούς τους κλάδους (έξω καρωτίδα, έσω καρωτίδα), όπως φαίνεται στην **Εικόνα 1** [3]. Δεν χορηγούν άλλους κλάδους. Η έξω καρωτίδα διανέμεται στον τράχηλο και στα μέρη της κεφαλής που βρίσκονται έξω από το κύτος του κρανίου, και τον οφθαλμικό κόγχο. Η έξω καρωτίδα χορηγεί τέσσερις κλάδους (πρόσθιο, έσω, οπίσθιο και τελικό). Η έσω καρωτίδα δεν έχει κλάδους. Πορεύεται στο γναθοφαρυγγικό διάστημα και αποτελεί μαζί με την έσω σφαγίτιδα φλέβα και το πνευμονογαστρικό νεύρο, το αγγειονευρώδες δεμάτιο του τραχήλου [4], [5].

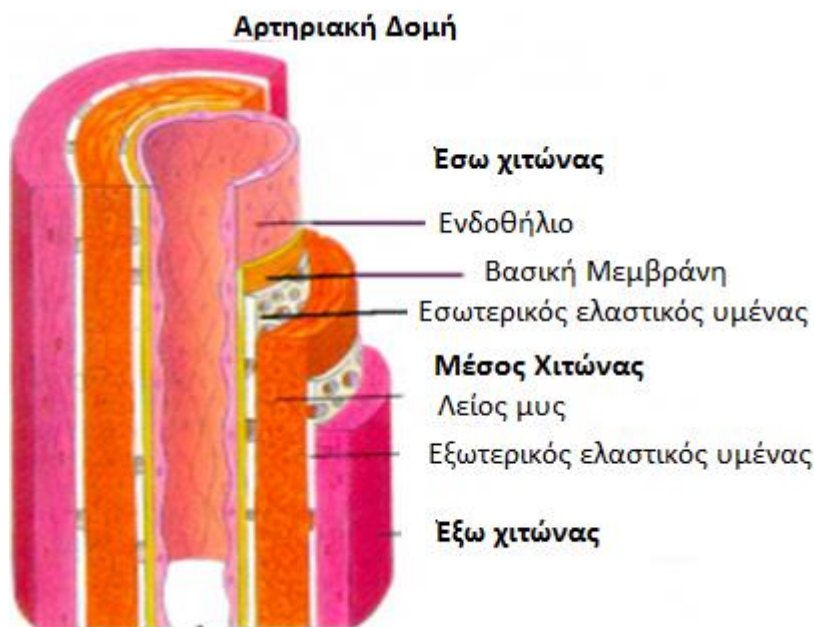


Εικόνα 1: Ανατομία Καρωτίδας.

Υπάρχουν μελέτες στη βιβλιογραφία της εμβιομηχανικής που έχουν εξετάσει τη γεωμετρική δομή της κοινής καρωτίδας τόσο από ποιοτική όσο και από ποσοτική σκοπιά [2]. Η μέση διάμετρος των κοινών καρωτίδων ενός υγιούς αρσενικού και θηλυκού ενήλικα είναι 6,5 mm και 6,1 mm, αντίστοιχα [4], [6].

1.2. Η ανατομία του αρτηριακού τοιχώματος

Απαραίτητη στην κατανόηση της παθοφυσιολογίας της καρωτιδικής αθηροσκλήρωσης είναι η γνώση της ανατομικής δομής ενός φυσιολογικού αρτηριακού τοιχώματος. Ο κύριος σκοπός του καρωτιδικού αρτηριακού δικτύου είναι να δρα ως αγωγός της ροής του αίματος στον εγκέφαλο και είναι αδιαμφισβήτητα ένα ιδιαίτερα προσαρμοστικό και ευαίσθητο όργανο.



Εικόνα 2: Δομή αρτηρίας.

Η καρωτιδική αρτηρία αποτελείται από τρία στρώματα: τον έσω χιτώνα, τον μέσο χιτώνα και τον έξω χιτώνα, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 2** [7]. Κάθε στρώμα έχει συγκεκριμένο και χρήσιμο ρόλο στην λειτουργία της αρτηρίας.

Ο έσω χιτώνας, ή η εσωτερική επένδυση του αγγείου που έρχεται σε άμεση επαφή με την ροή του αίματος, είναι ένα εξαιρετικά δυναμικό στρώμα που αποτελείται από μία μόνο στοιβάδα ενδοθηλιακών κυττάρων. Τα ενδοθηλιακά κύτταρα έχουν υποδοχείς στις επιφάνειές τους που αλληλεπιδρούν με πρωτεΐνες του αίματος και με μόρια που ρυθμίζουν την αγγειακή διαπερατότητα, όπως επίσης, παίζουν καθοριστικό ρόλο στην συγκέντρωση των αιμοπεταλίων και στην πρόληψη της θρόμβωσης. Η ικανότητα του ενδοθηλίου για την αποκατάστασή του και τη διατήρηση της λειτουργίας του έχει σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη της αθηρωματικής πλάκας. Κάτω από τον έσω χιτώνα βρίσκεται μια μονή στρώση ελαστικών ινών που σχηματίζουν μια δομή που ονομάζεται έσω ελαστικός υμένας.

Ο μέσος χιτώνας, αποτελείται από ένα εσωτερικό περιφερειακό στρώμα και ένα εξωτερικό διάμηκες στρώμα από κύτταρα λείων μυϊκών ινών που περιβάλλονται από ελασίνη, κολλαγόνο, και πρωτεογλυκάνες [8]. Η καρωτιδική αρτηρία θεωρείται «μυϊκή» αρτηρία, καθώς έχει μεγαλύτερη περιεκτικότητα λείων μυϊκών κυττάρων από άλλες κεντρικές αρτηρίες. Οι αιμοδυναμικές τάσεις που εφαρμόζονται στο τοίχωμα της αρτηρίας καθώς και τα συστηματικά φλεγμαίνοντα μόρια επηρεάζουν τον μέσο χιτώνα με τρόπο που μεταβάλλεται η σύνθεσή του. Αξίζει να σημειωθεί ότι,

παθολογικές αλλαγές που συμβαίνουν στην σύνθεση και την αρχιτεκτονική του μέσου χιτώνα είναι σε μεγάλο βαθμό δευτερεύουσες επιδράσεις τραυματισμών και αποκατάστασης του έσω χιτώνα. Όταν ο μέσος χιτώνας λειτουργεί σωστά, παρέχει στήριξη αλλά είναι επίσης σημαντικός για τη διατήρηση του αγγειακού τόνου. Σε απόκριση της μεταβολής της λειτουργίας του έσω, ο μέσος χιτώνας αντιδρά με πολλαπλασιασμό των λείων μυϊκών κυττάρων, καθώς και στην περαιτέρω προώθηση της μετανάστευσης λευκοκυττάρων και μονοκυττάρων σε αυτό το στρώμα. Εσωτερικά του μέσου χιτώνα, οι διαταραχές των κυττάρων και των εξωκυττάρων δομών ξεκινούν τον σχηματισμό της αθηρωματικής πλάκας [9].

Κάτω από τον μέσο χιτώνα βρίσκεται ένα άλλο πλέγμα από ελαστικές ίνες, το έξω ελαστικό έλασμα, το οποίο αποτελεί τη βάση του έξω χιτώνα και το εξωτερικό στρώμα της αρτηρίας. Αυτό το στρώμα είναι εξαιρετικά δυνατό, αποτελείται κυρίως από κολλαγόνο και διαθέτει αυτόνομες νευρικές ίνες που εκτείνονται εντός του μέσου χιτώνα. Ενώ ο έσω χιτώνας εξαρτάται από τη διάχυση του οξυγόνου του αίματος εντός του αυλού, ο μέσος χιτώνας λαμβάνει το οξυγόνο που είναι αναγκαίο για τη λειτουργία του με διάχυση από τον αρτηριακό αυλό μέσω της παροχής αίματος από τον έσω χιτώνα, καθώς και μέσω πλέγματος μικρών αγγείων που επικοινωνούν με τον έξω χιτώνα [9].

1.3 Μηχανισμοί αθηρογένεσης

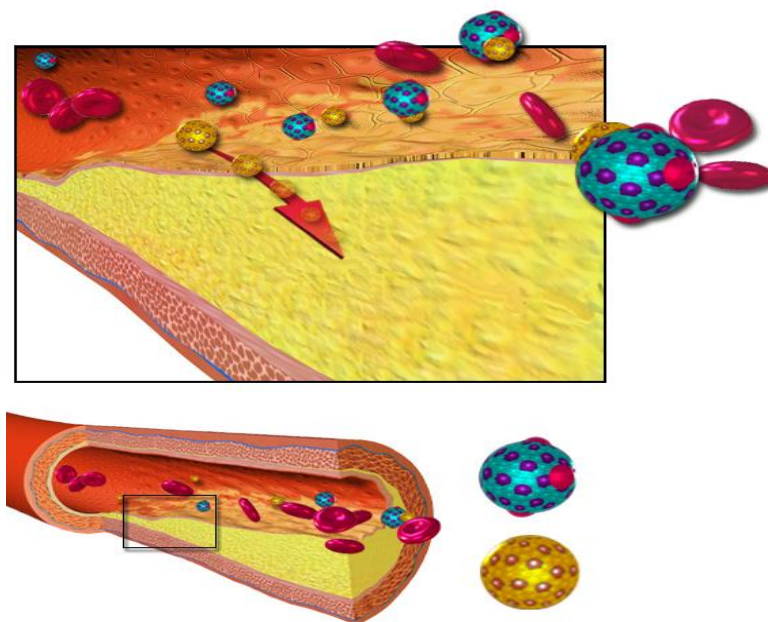
Η αθηρογένεση είναι η αναπτυξιακή διαδικασία των αθηρωματικών πλακών. Χαρακτηρίζεται από μια αναδιαμόρφωση των αρτηριών που οδηγεί σε υποενδοθηλιακή συσσώρευση των λιπαρών ουσιών, που ονομάζονται πλάκες. Η συσσώρευση μιας αθηρωματικής πλάκας είναι μια αργή διαδικασία, που αναπτύσσεται συνήθως σε περίοδο πολλών ετών μέσα από πολύπλοκη σειρά κυτταρικών γεγονότων που συμβαίνουν επί του αρτηριακού τοιχώματος και σε απόκριση σε μία ποικιλία τοπικών αγγειακών κυκλοφορικών παραγόντων. Το μεγαλύτερο μέρος αυτών των εναποθέσεων αποτελείται από περίσσεια λίπους, κολλαγόνου και ελαστίνης. Αρχικά, καθώς οι πλάκες μεγαλώνουν, πραγματοποιείται μόνο πάχυνση του τοιχώματος χωρίς καμία στένωση. Η στένωση είναι ένα γεγονός που εμφανίζεται με καθυστέρηση, το οποίο μπορεί και να μην συμβεί και είναι συχνά το αποτέλεσμα επαναλαμβανόμενων ρήξεων της αθηρωματικής πλάκας και επουλωτικών αποκρίσεων και όχι μόνο αποτέλεσμα της αθηροσκληρωτικής διαδικασίας [10].

1.3.1 Κυτταρικοί μηχανισμοί

Η πρώιμη αθηρογένεση χαρακτηρίζεται από προσκόλληση των μονοκυττάρων (τύπος λευκών αιμοσφαιρίων) που κυκλοφορούν στο αίμα στην επένδυση του αγγειακού ενδοθηλίου, έπειτα από τη μετανάστευση τους στο υποενδοθηλιακό διάστημα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3 [11] και περαιτέρω ενεργοποίηση μακροφάγων που προέρχονται από μονοκύτταρα [12]. Ο αρχικός μηχανισμός αυτής της διαδικασίας είναι τα οξειδωμένα

σωματίδια λιποπρωτεϊνών εντός του τοιχώματος, κάτω από τα ενδοθηλιακά κύτταρα, αν και οι ανώτερες του φυσιολογικού ή αυξημένες συγκεντρώσεις της γλυκόζης του αίματος παίζουν επίσης σημαντικό ρόλο και δεν είναι όλοι οι παράγοντες πλήρως κατανοητοί.

Τα χαμηλής πυκνότητας σωματίδια λιποπρωτεϊνών (LDL) στο πλάσμα του αίματος εναποτίθενται στο ενδοθήλιο και οξειδώνονται, δημιουργώντας κίνδυνο καρδιαγγειακής νόσου. Ένα πολύπλοκο σύνολο βιοχημικών αντιδράσεων ρυθμίζει την οξείδωση της LDL, που περιλαμβάνει ένζυμα (όπως Lp-LpA2) και ελεύθερες ρίζες στο ενδοθήλιο.



Εικόνα 3: Σωματίδια λιποπρωτεϊνών.

Η αρχική βλάβη στο ενδοθήλιο οδηγεί σε φλεγμονώδη αντίδραση. Τα μονοκύτταρα κυκλοφορούν εντός της αρτηρίας μέσω της κυκλοφορίας του αίματος, με τα αιμοπετάλια να προσκολλώνται στην περιοχή της φλεγμονής. Τα μονοκύτταρα διαφοροποιούνται σε μακροφάγα, τα οποία από την κατανάλωση οξειδωμένης LDL, σιγά-σιγά μετατρέπονται σε ευμεγέθη αφρώδη κύτταρα που αποτελούνται από πολυάριθμα εσωτερικά κυτταροπλασματικά κυστίδια και εμφανίζουν υψηλή περιεκτικότητα σε λιπίδια. Τα αφρώδη κύτταρα τελικά πεθαίνουν, και μεταδίδουν περαιτέρω την φλεγμονή. Υπάρχει επίσης πολλαπλασιασμός λείων μυϊκών κυττάρων και μετανάστευσή τους από το μέσο χιτώνα στον έσω χιτώνα. Αυτό προκαλεί το σχηματισμό μιας ινώδους κάψας που καλύπτει την περιοχή με τα λιπίδια. Το άθικτο ενδοθήλιο θα μπορούσε να αποτρέψει τον πολλαπλασιασμό με την απελευθέρωση νιτρικού οξέος.

1.3.2 Ενασβεστίωση και λιπίδια

Η ενασβεστίωση πραγματοποιείται κυρίως στα μυϊκά κύτταρα που γειτνιάζουν με τις επιφάνειες των αθηρωματικών πλακών και των κοντινών τους ιστών [13]. Κάποια στιγμή, καθώς τα κύτταρα πεθαίνουν, προκαλούνται εξωκυτταρικές αποθέσεις ασβεστίου μεταξύ του μυϊκού

τοιχώματος και του εξωτερικού τμήματος των αθηρωματικών πλακών. Ενόσω η αθηρωματική πλάκα εμπλέκεται στην ρύθμιση της εναπόθεσης ασβεστίου, η πλάκα συσσωρεύεται και κρυσταλλώνεται.

Η χοληστερόλη μεταφέρεται στο τοίχωμα του αγγείου από σωματίδια χαμηλής πυκνότητας λιποπρωτεϊνών (LDL) που περιέχουν χοληστερόλη. Για να προσελκύσουν και να ενεργοποιήσουν τα μακροφάγα, η χοληστερόλη πρέπει να απελευθερωθεί από τα σωματίδια LDL και να οξειδωθεί, το οποίο αποτελεί ένα βασικό βήμα για τη φλεγμονώδη διαδικασία. Η διαδικασία επιδεινώνεται εάν υπάρχει ανεπαρκής ποσότητα λιποπρωτεΐνης υψηλής πυκνότητας (HDL), το σωματίδιο λιποπρωτεΐνης που απομακρύνει τη χοληστερόλη από τους ιστούς και το μεταφέρει πίσω στο συκώτι.

Τα αφρώδη κύτταρα και τα αιμοπετάλια προάγουν τη μετανάστευση και τον πολλαπλασιασμό των λείων μυϊκών κυττάρων, τα οποία με τη σειρά τους καταναλώνουν τα λιπίδια, τα οποία αντικαθίστανται από κολλαγόνο και μετατρέπονται σε αφρώδη κύτταρα. Ένα προστατευτικό ινώδες κάλυμμα σχηματίζεται μεταξύ των λιπαρών εναποθέσεων και της διαστρωμάτωσης της αρτηρίας (του χιτώνα).

Αυτές οι αυξημένες ποσότητες λιπαρών εναποθέσεων (αθηρώματα) παράγουν ένζυμα που αναγκάζουν την αρτηρία να μεγαλώσει με την πάροδο του χρόνου. Όταν η αρτηρία μεγαλώσει επαρκώς για να αντισταθμίσει το επιπλέον πάχος του αθηρώματος, τότε δεν συμβαίνει στένωση του αυλού. Η αρτηρία διατείνεται με μια εγκάρσια ωόδη τομή με ένα κυκλικό άνοιγμα. Εάν αυτή η διάταση μεγαλώσει πέραν του πάχους του αθηρώματος, τότε δημιουργείται ανεύρυσμα [14].

1.3.3 Ρήξη και στένωση

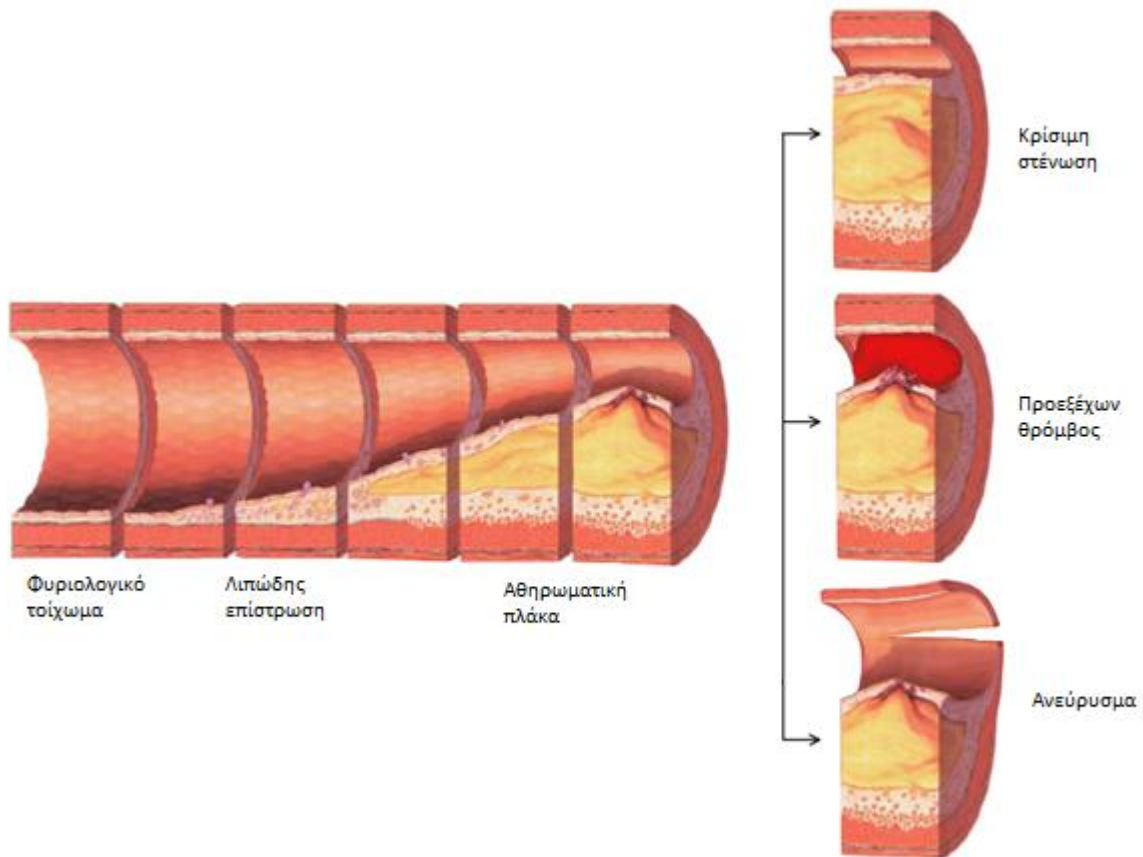
Αν και η διαδικασία της νόσου τείνει να είναι βραδέως εξελισσόμενη με το πέρασμα των δεκαετιών, συνήθως παραμένει ασυμπτωματική μέχρι ένα αθήρωμα να δημιουργήσει έλκος, το οποίο οδηγεί σε άμεση πήξη του αίματος στο σημείο του έλκους. Αυτό πυροδοτεί μια σειρά γεγονότων που οδηγούν σε άμεση πήξη, η οποία μπορεί να εμποδίσει γρήγορα τη ροή του αίματος. Μια πλήρης απόφραξη οδηγεί σε ισχαιμικά επεισόδια [10].

Οι στενώσεις μπορεί να εξελίσσονται αργά, ενώ το έλκος στην πλάκα είναι ένα ξαφνικό γεγονός που συμβαίνει ειδικά σε αθηρώματα με ασθενέστερο ινώδες περίβλημα που έχει γίνει «ασταθές».

Επαναλαμβανόμενα ρήγματα στην πλάκα, από αυτά που δεν καταλήγουν σε ολική απόφραξη του αυλού, τείνουν να σταθεροποιήσουν τον θρόμβο και είναι η διαδικασία που επιφέρει την μεγαλύτερη στένωση με την πάροδο του χρόνου. Οι στενοτικές περιοχές τείνουν να γίνουν πιο σταθερές παρά την αύξηση των ταχυτήτων ροής σε αυτές. Τα πιο σημαντικά γεγονότα παρεμπόδισης της ροής αίματος συμβαίνουν σε μεγάλες πλάκες, οι οποίες, πριν από την ρήξη τους, δημιουργούν πολύ μικρή έως καθόλου στένωση.

Εάν το ινώδες περίβλημα που χωρίζει ένα μαλακό αθήρωμα από την κυκλοφορία του αίματος μέσα στην αρτηρία διαρραγεί, θραύσματα ιστού

εκτίθενται και απελευθερώνονται. Αυτά τα θραύσματα ιστών παράγουν πολύ εύκολα θρόμβους, που περιέχουν κολλαγόνο και παράγοντες του ιστού. Αυτά ενεργοποιούν τα αιμοπετάλια και το σύστημα πήξης. Το αποτέλεσμα είναι ο σχηματισμός ενός θρόμβου (θρόμβος αίματος) που υπέρκειται του αθηρώματος, ο οποίος φράζει έντονα τη ροή του αίματος. Με την απόφραξη της ροής του αίματος, οι ακολουθούντες ιστοί στερούνται οξυγόνου και θρεπτικών ουσιών [10]. Τα πιθανά σενάρια εξέλιξης της αθηρωματικής πλάκας φαίνονται στην Εικόνα 4 [15].



Εικόνα 4: Σενάρια εξέλιξη της αθηρωματικής πλάκας.

1.3.4 Ταχεία ανάπτυξη των πλακών

Η κατανομή των αθηρωματικών πλακών σε ένα μέρος του αρτηριακού ενδοθηλίου είναι ανομοιογενής. Η πολλαπλή και εστιασμένη ανάπτυξη των αθηροσκληρωτικών αλλαγών είναι παρόμοια με εκείνη της ανάπτυξης των αμυλοειδών πλακών στον εγκέφαλο και των κηλίδων ηλικίας στο δέρμα. Η θεωρία της ελαττωματικής επισκευής-συσσώρευσης της γήρανσης προτείνει ότι οι μηχανισμοί ελαττωματικής αποκατάστασης [16], [17] διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην εστιακή ανάπτυξη αθηροσκλήρωσης [18]. Η ανάπτυξη της πλάκας είναι αποτέλεσμα της αποκατάστασης του τραυματισμένου ενδοθηλίου. Λόγω της έγχυσης των λιπιδίων υποενδοθηλιακά, το αποκατεστημένο ενδοθήλιο έχει διαφορετική δομή από αυτή του τοπικού φυσιολογικού. Αυτή είναι η εκδήλωση μιας ελαττωματικής αποκατάστασης. Σημαντικό είναι το γεγονός ότι η αλλαγμένη αναδιαμόρφωση κάνει το τοπικό ενδοθήλιο να έχει αυξημένη ευθραυστότητα και μειωμένη αποδοτικότητα αποκατάστασης. Κατά συνέπεια, αυτό το μέρος του

ενδοθηλίου έχει αυξημένο κίνδυνο να τραυματιστεί. Έτσι, η συσσώρευση των ελαττωματικών αποκαταστάσεων του ενδοθηλίου είναι εστιασμένη και αυτοεπιταχυνόμενη. Με τον τρόπο αυτό, η αύξηση του μεγέθους μιας πλάκας είναι επίσης αυτοεπιταχυνόμενη. Μέσα σε ένα τμήμα του αρτηριακού τοιχώματος, η παλαιότερη πλάκα είναι πάντοτε η μεγαλύτερη, και είναι η πιο επικίνδυνη για να προκαλέσει απόφραξη της τοπικής αρτηρίας.

1.4 Συμπτώματα

Οι καρωτίδες τροφοδοτούν με αίμα τον εγκέφαλο και τον τράχηλο [19]. Σημαντική στένωση των καρωτιδικών αρτηριών μπορεί να συνοδεύει με συμπτώματα όπως αίσθημα αδυναμίας, δυσκολία στην ομιλία, ζάλη και δυσκολία στη βάρδιση, θολή όραση, αιμωδία στο πρόσωπο, στα χέρια και στα πόδια, σοβαρή κεφαλαλγία και απώλεια συνείδησης. Αυτά τα συμπτώματα επίσης σχετίζονται με εγκεφαλικό επεισόδιο. Το εγκεφαλικό επεισόδιο προκαλείται από μεγάλη μείωση της παροχής ή απόφραξης των αρτηριών που αιματώνουν τον εγκέφαλο, με την έλλειψη επαρκούς παροχής αίματος να οδηγεί στο θάνατο των κυττάρων του προσβεβλημένου ιστού [20].

1.5 Κόστος

Η αθηρωμάτωση θεωρείται η κυριότερη αιτία ανάπτυξης καρδιαγγειακών παθήσεων, πολλές από τις οποίες εκδηλώνονται υπό τη μορφή θανατηφόρων ασθενειών του κυκλοφορικού συστήματος, όπως το έμφραγμα και το εγκεφαλικό ή αποτελούν αιτία σημαντικής μόνιμης αναπηρίας. Κάθε χρόνο οι καρδιαγγειακές ασθένειες προκαλούν πάνω από 1.9 εκατομμύρια θανάτους στην Ευρωπαϊκή Ένωση και κοστίζουν 196 δισεκατομμύρια ευρώ στα συστήματα υγείας των χωρών-μελών της [21]. Παρόμοιες στατιστικές αναφέρονται και στις ΗΠΑ [22], [23].

1.6 Θεραπεία

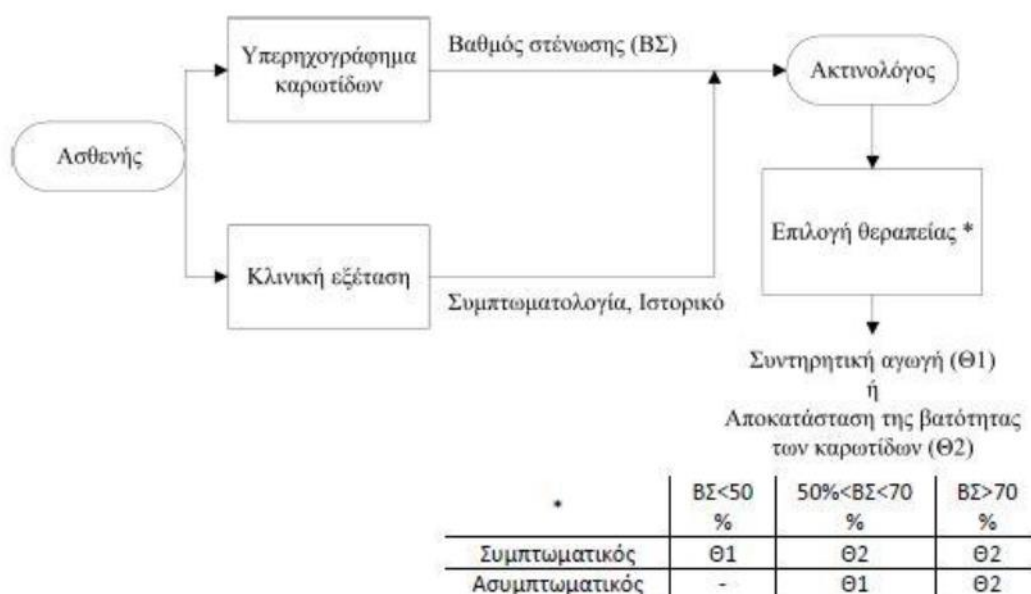
Στην σύγχρονη κλινική πρακτική οι ασθενείς με αθηροσκλήρωση υπόκεινται είτε σε επεμβατικές θεραπείες, όπως η αποκατάσταση της αρτηρίας (με ενδαρτηρεκτομή ή με αγγειοπλαστική, με τοποθέτηση stent) και η χειρουργική επέμβαση bypass, ή πιο συντηρητική θεραπεία με φάρμακα, σωματική άσκηση και δίαιτα [23], [24], [25].

Η τρέχουσα κλινική πρακτική για τη λήψη απόφασης σχετικά με τη μέθοδο θεραπείας αποτελεί συνάρτηση δύο κριτηρίων: του βαθμού στένωσης, δηλαδή του ποσοστού της επιφάνειας του αγγείου που καλύπτεται από την πλάκα, καθώς και της πρότερης εκδήλωσης συμπτωμάτων (συνήθως σε διάστημα έξι μηνών), δηλαδή εάν ο ασθενής είναι συμπτωματικός ή ασυμπτωματικός [26]. Αναλυτικά:

- ασυμπτωματικοί ασθενείς με βαθμό στένωσης μεγαλύτερο του 70% χειρουργούνται.

- ασυμπτωματικοί ασθενείς με βαθμό στένωσης μεγαλύτερο από 50% αλλά μικρότερο από 70% ακολουθούν συντηρητική αγωγή.
- συμπτωματικοί ασθενείς με βαθμό στένωσης μεγαλύτερο από 50%, χειρουργούνται [26], [27].

Ενδεικτικό της ακολουθούμενης κλινικής πρακτικής είναι το σχήμα της **Εικόνα 5** [28]. Ο βαθμός στένωσης υπολογίζεται από το υπερηχογράφημα της καρωτίδας ενώ ο χαρακτηρισμός του ασθενούς ως συμπτωματικός ή ασυμπτωματικός πραγματοποιείται με βάση το ιστορικό του.



Εικόνα 5: Τρέχουσα κλινική μέθοδος λήψης απόφασης για την επιλογή θεραπείας αντιμετώπισης της καρωτιδικής αθηρωμάτωσης.

Δεδομένου του υψηλού κόστους της κλινικής αντιμετώπισης της αθηροσκλήρωσης, της ψυχικής και σωματικής καταπόνησης του ασθενή, αλλά και του μικρού ποσοστού διάκρισης μεταξύ επικίνδυνων και μη αθηρωματικών πλακών όταν επιλέγεται ως μοναδικό κριτήριο ο βαθμός στένωσης (61%) [29], νέες πιο βελτιωμένες μέθοδοι λήψης απόφασης σχετικά με την επεμβατική ή μη αντιμετώπιση της νόσου πρέπει να ανακαλυφθούν.

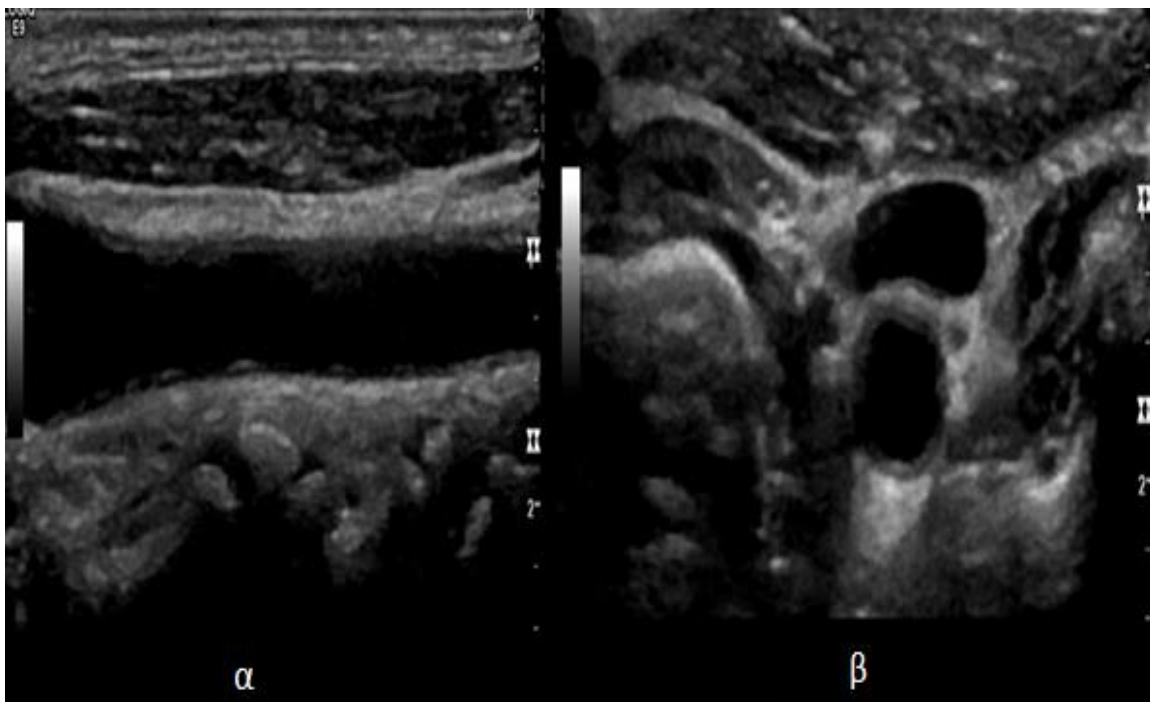
1.7 Υπερηχογράφημα

Το υπερηχογράφημα είναι μια διαγνωστική τεχνική απεικόνισης με χρήση υπερήχων. Χρησιμοποιείται για να απεικονιστούν οι εσωτερικές δομές του σώματος, όπως οι τένοντες, οι μύες, οι αρθρώσεις, τα αγγεία και τα εσωτερικά όργανα. Συχνά στόχος του είναι να βρεθεί η πηγή μιας ασθένειας ή να αποκλειστεί κάποια παθολογία. Οι υπέρηχοι είναι ηχητικά κύματα με συχνότητες υψηλότερες από εκείνες που μπορούν να γίνουν ηχητικά αντιληπτές από τον άνθρωπο (> 20.000 Hz). Οι εικόνες υπερήχων προκύπτουν από την μετάδοση παλμών υπερήχων στον ιστό

χρησιμοποιώντας έναν πομπό υπερήχων. Ο ήχος απορροφάται, διαπερνά, ή ανακλάται στον ιστό ανάλογα με το πάχος, την πυκνότητα και την ηχογένεια του κάθε ιστού. Αυτές ανακλάσεις καταγράφονται από έναν ανιχνευτή υπερήχων και εμφανίζονται ως εικόνα στο χειριστή [30].

Πολλά διαφορετικά είδη εικόνων μπορούν να σχηματιστούν με τη χρήση υπερήχων. Το πιο γνωστό είδος είναι η τεχνική B-mode, με την οποία δημιουργείται μία εικόνα η οποία αναπαριστά την ακουστική σύνθετη αντίσταση μιας δισδιάστατης εγκάρσιας ή διαμήκουσ τομής του ιστού, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 6** [31]. Άλλοι τύποι εικόνας μπορεί να εμφανίζουν τη ροή του αίματος, την κίνηση του ιστού, την παρουσία ειδικών μορίων, την ακαμψία του ιστού, ή την ανατομία μιας τρισδιάστατης περιοχής.

Σε σύγκριση με άλλες εξέχουσες μεθόδους ιατρικής απεικόνισης, οι υπέρηχοι έχουν αρκετά πλεονεκτήματα. Παρέχουν εικόνες σε πραγματικό χρόνο, παρέχουν φορητότητα, έχουν σημαντικά χαμηλότερο κόστος και είναι μια εξέταση άνετη και ασφαλής για τον ασθενή καθώς δεν χρησιμοποιείται επιβλαβής ιοντίζουσα ακτινοβολία. Τα μειονεκτήματα των υπερήχων περιλαμβάνουν τα περιορισμένα όρια του οπτικού τους πεδίου, της αναγκαίας συνεργασίας του ασθενούς κατά την εξέταση, και της εξαρτήσεως από την ικανότητα του χειριστή ιατρού. Τυπική μονάδα ιατρικού υπέρηχου φαίνεται στην **Εικόνα 7** [32].



Εικόνα 6: Εικόνα B-mode υπερήχου.
(α) Απεικόνιση διαμήκουσ τομής αρτηρίας.
(β) Απεικόνιση εγκάρσιας τομής αρτηρίας.



Εικόνα 7: Τυπική μονάδα ιατρικού υπερήχου.

Στη εξέταση του καρδιαγγειακού συστήματος οι υπέρηχοι χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της βαρύτητας μιας πιθανής απόφραξης των αρτηριών, την διάγνωση μιας βαθέως φλεβικής θρόμβωσης και την αξιολόγηση της έκτασης και της σοβαρότητας μιας φλεβικής ανεπάρκειας.

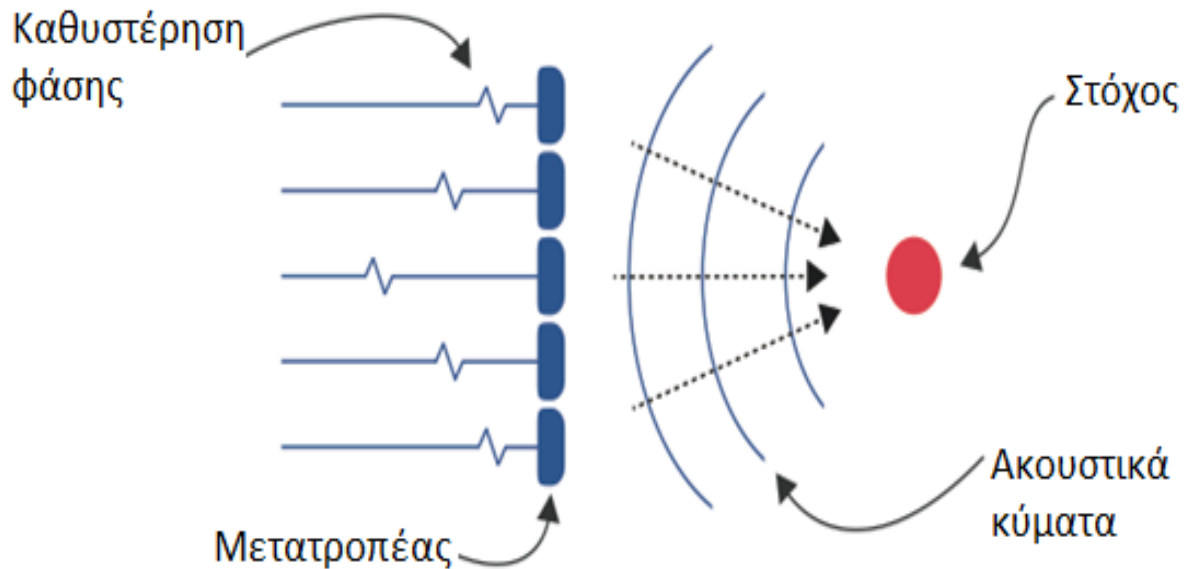
1.7.1 Από τον ήχο στην εικόνα

Η δημιουργία μιας εικόνας από ήχο γίνεται σε τρία βήματα - την παραγωγή ενός ηχητικού κύματος, τη λήψη του ηχητικού κύματος, και την ερμηνεία του ληφθέντος ηχητικού κύματος.

1.7.2 Παραγωγή του ηχητικού κύματος

Ένα ηχητικό κύμα τυπικά παράγεται από έναν πιεζοηλεκτρικό μετατροπέα ο οποίος περικλείεται σε ένα πλαστικό περίβλημα. Ισχυροί, βραχείς ηλεκτρικοί παλμοί από το μηχάνημα υπερήχων οδηγούν τον μετατροπέα στην επιθυμητή συχνότητα. Οι συχνότητες κυμαίνονται μεταξύ 1 και 18 MHz. Παλαιότερες τεχνολογίες μετατροπέων εστίαζαν τη δέσμη των ακτινών με τη χρήση κατόπτρων. Οι μετατροπείς νεότερης τεχνολογίας χρησιμοποιούν τεχνικές φάσης ώστε το μηχάνημα υπερήχων να αλλάζει την κατεύθυνση και το βάθος εστίασης της δέσμης.

Ο ήχος εστιάζεται είτε από το σχήμα του μετατροπέα, με τη χρήση ενός κατόπτρου μπροστά από το μετατροπέα, ή με ένα περίπλοκο σύνολο παλμών ελέγχου από τον σαρωτή υπερήχων, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 8** [33]. Αυτή η εστίαση παράγει ένα ηχητικό κύμα με σχήμα τόξου. Το κύμα ταξιδεύει μέσα στο σώμα και φτάνει με τη κατάλληλη εστίαση σε ένα επιθυμητό βάθος.



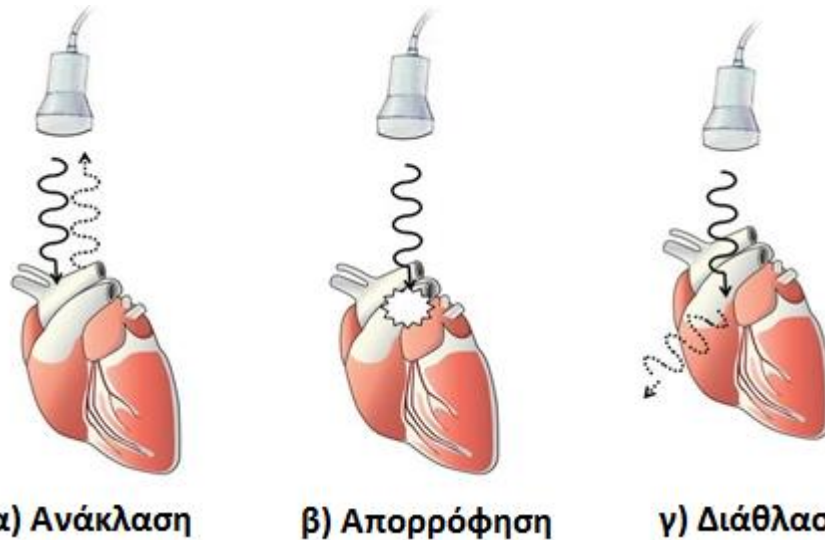
Εικόνα 8: Εστίαση μετατροπέα μέσω παλμών ελέγχου.

Τα υλικά στο μπροστινό τμήμα του αισθητηρίου (συνήα ελαστικής επικάλυψης) επιτρέπουν στον ήχο να μεταδοθεί αποτελεσματικά στο σώμα. Επιπλέον, μια γέλη τοποθετείται μεταξύ του δέρματος του ασθενούς και του ανιχνευτή για να μειωθεί η αντίσταση του αέρα και του δέρματος και να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή ακουστική σύζευξη.

Το ηχητικό κύμα αντανακλάται εν μέρει από τα στρώματα μεταξύ διαφορετικών ιστών ή σκεδάζεται από μικρότερες δομές ή απορροφάται από τον ιστό όπως φαίνεται στην **Εικόνα 9** [34]. Συγκεκριμένα, ο ήχος αντανακλάται οπουδήποτε υπάρχουν αλλαγές της ακουστικής αντίστασης στο σώμα (αιμοσφαίρια στο πλάσμα του αίματος, μικρές δομές σε όργανα κ.α.). Ορισμένες από τις ανακλάσεις επιστρέφουν στο μετατροπέα.

1.7.3 Λήψη των ηχητικών κυμάτων

Η επιστροφή του ηχητικού κύματος στον αισθητήρα ακολουθεί την ίδια λογική με την αποστολή του ηχητικού κύματος. Το ηχητικό κύμα που επιστρέφει δονεί τον μετατροπέα και ο μετατροπέας μετατρέπει τις δονήσεις σε ηλεκτρικούς παλμούς που οδηγούνται στον σαρωτή υπερήχων, όπου υποβάλλονται σε επεξεργασία και μετατρέπονται σε ψηφιακή εικόνα.



Εικόνα 9: Πιθανά σενάρια κατάληξης εκπεμπόμενων ηχητικών κυμάτων.
(α) ανάκλαση, (β) απορρόφηση, (γ) διάθλαση

1.7.4 Δημιουργία της εικόνας

Για να δημιουργηθεί μια εικόνα, ο σαρωτής υπερήχων πρέπει να καθορίσει δύο πράγματα από την κάθε ηχώ που έλαβε:

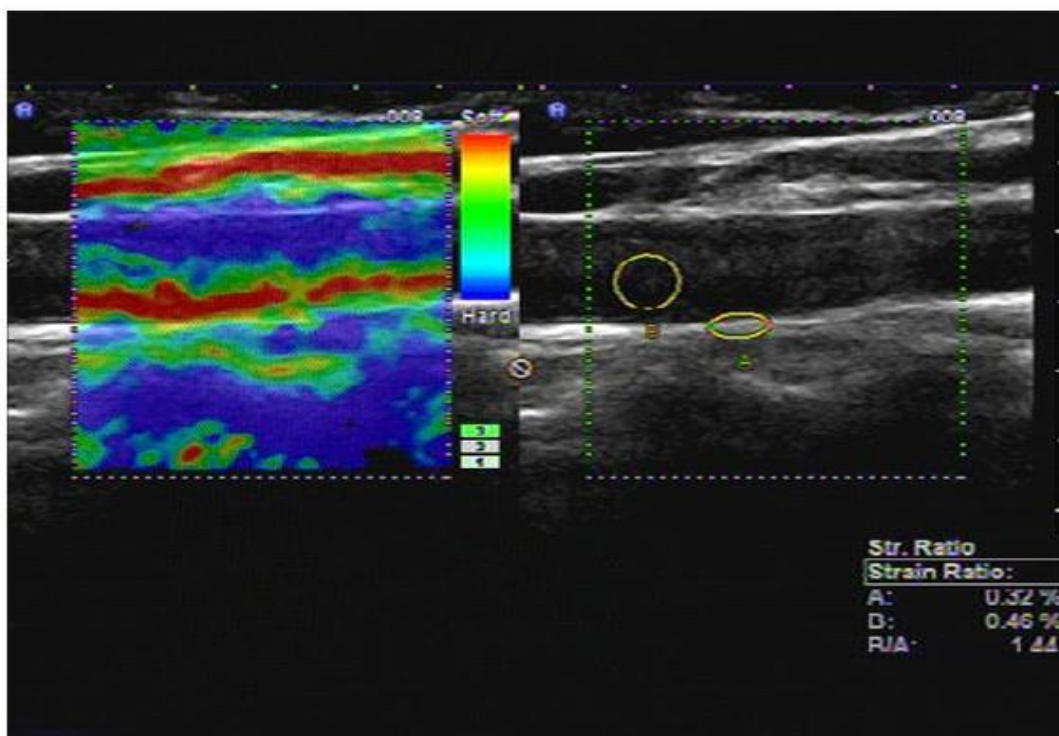
- Πόσο χρόνο έκανε η ηχώ να επιστρέψει από τη στιγμή που μεταδόθηκε ο ήχος.
- Πόσο ισχυρή είναι η ηχώ σε σχέση με την ισχύ του αρχικά εκπεμπόμενου υπερηχητικού σήματος.

Μόλις ο σαρωτής υπερήχων προσδιορίσει το χρόνο επιστροφής του υπερηχητικού σήματος και το λόγο της λαμβανόμενης προς την εκπεμπόμενη ισχύ, μπορεί να αντιστοιχίσει σε κάθε εικονοστοιχείο της δημιουργούμενης εικόνας σε ορισμένη ένταση. Όταν όλα τα ηχητικά κύματα καταγραφούν, έχουμε μια εικόνα γκριζας κλίμακας (gray scale).

Οι εικόνες από τον σαρωτή υπερήχων μεταφέρονται και προβάλλονται με τη χρήση του προτύπου DICOM.

1.7.5 Ελαστογραφία

Η υπερηχοτομογραφία χρησιμοποιείται επίσης και για τη δημιουργία ελαστογραφιών, η οποία είναι μια σχετικά νέα μέθοδος απεικόνισης που χαρτογραφεί τις ελαστικές ιδιότητες των μαλακών ιστών [35], [36]. Αυτή η τεχνική αναπτύχθηκε κατά τις τελευταίες δύο δεκαετίες. Η ελαστογραφία είναι χρήσιμη σε ιατρικές διαγνώσεις, καθώς μπορεί να διακρίνει τους υγιείς από τους μη υγιείς ιστούς. Για παράδειγμα, οι καρκινικοί όγκοι είναι συχνά πιο άκαμπτοι από τους περιβάλλοντες ιστούς και το προσβεβλημένο ήπαρ είναι πιο άκαμπτο από το υγιές [35], [36], [37], [38]. Παράδειγμα εικόνας ελαστογραφίας φαίνεται στην **Εικόνα 10** [39].



Εικόνα 10: Εικόνα ελαστογραφίας υπερήχου.

1.8 Η υφή στην εικόνα

Η υφή είναι ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά στην επεξεργασία εικόνας και ιδιαίτερα στην ανάλυση ιατρικής εικόνας. Παρά το γεγονός ότι, αντιλαμβανόμαστε την υφή διαισθητικά, μέχρι στιγμής μια ενιαία ενοποίηση για διαφορετικά είδη υφής, η οποία θα μπορούσε να εξάγει έναν περιεκτικό ορισμό για αυτές, δεν έχει προταθεί. Ως εκ τούτου, οι ερευνητές προτείνουν διάφορες μεθόδους για την εξαγωγή χαρακτηριστικών υφής, όπου κάθε ομάδα χαρακτηριστικών έχει θετικές και αρνητικές ιδιότητες. Η υφή έχει προσελκύσει πολλή προσοχή ως ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των ιατρικών εικόνων, που περιέχει σημαντική ιατρική πληροφορία και μπορεί να χρησιμοποιηθεί στα συστήματα υποβοήθησης της ιατρικής απόφασης (CAD) [40], [41], [42].

Η επιστημονική κοινότητα με τους ήδη υπάρχοντες δείκτες υφής έχει σημειώσει σημαντική πρόοδο στην σωστή κατηγοριοποίηση των αθηρωματικών πλακών ως προς την συμπτωματικότητά τους [43], [44], [45], [46]. Όμως η έρευνα δεν σταματάει σε αυτό το σημείο, με όλο και πιο καινοτόμους δείκτες να προτείνονται για την ταξινόμηση των αθηρωματικών πλακών [47], [48], [49].

Ένας πολλά υποσχόμενος δείκτης υφής είναι το εμβαδόν της μαύρης περιοχής της αθηρωματικής πλάκας κοντά στον αυλό (Juxtaluminal Black Area, JBA). Ο συγκεκριμένος δείκτης έχει συσχετιστεί με αυξημένη επικινδυνότητα αποκόλλησης μέρους της αθηρωματικής πλάκας [50].

1.9 Σκοπός και δομή της εργασίας

Η ανεύρεση και χρήση καινοτόμων δεικτών στη σύγχρονη ιατρική πρακτική συνιστά μείζονος σημασίας σκοπό για την επιστημονική κοινότητα. Επειδή, όμως, αυτοί οι δείκτες πρόκειται να χρησιμοποιηθούν στην αξιολόγηση και την επιλογή των πρακτικών αντιμετώπισης παθολογικών καταστάσεων ασθενών η πολλαπλή μελέτη και αξιολόγηση της καταλληλότητάς τους είναι κρίσιμη και επιβεβλημένη.

Στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής, δημιουργήθηκε ένας αυτοματοποιημένος αλγόριθμος υπολογισμού του δείκτη JBA, ο οποίος στη συνέχεια συσχετίστηκε με άλλους υπάρχοντες δείκτες και χαρακτηριστικά υφής των αθηρωματικών πλακών ώστε να εξετασθεί η καταλληλότητά του για διαγνωστική χρήση.

Για τον εν λόγω σκοπό χρησιμοποιήθηκαν τρία σύνολα αλληλουχιών εικόνων υπερήχων B-Mode, στα οποία με χρήση αλγορίθμου ανάλυσης της κίνησης της πλάκας ευρέθησαν οι εικόνες (frames) συστολής και διαστολής. Για τα frames συστολής και διαστολής χωριστά υπολογίστηκαν οι επιθυμητοί δείκτες και συσχετίστηκαν με τον υπολογιζόμενο δείκτη JBA καθώς και με τον δείκτη υφής GSM.

Η δομή της εργασίας είναι η εξής:

- Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται εκτενής παρουσίαση των δεικτών υφής και της χρήσης τους σε εικόνες. Επίσης παρουσιάζονται αναλυτικά οι δείκτες ελαστικότητας (elasticity score) και σχετικής ελαστικότητας (elasticity ratio), καθώς και ο τρόπος κατηγοριοποίησης της αθηρωματικής πλάκας σε συγκεκριμένο τύπο. Τέλος αναλύεται εμπειριστικώς ο δείκτης υφής JBA.
- Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται εκτενώς τα τρία σύνολα δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και οι δυο μεθοδολογίες (ανά ασθενή και ανά εξέταση) που χρησιμοποιήθηκαν για την εύρεση στατιστικής συσχέτισης του δείκτη JBA με άλλους δείκτες υφής. Τέλος, πραγματοποιείται αναλυτική παρουσίαση του αλγορίθμου για την εύρεση του δείκτη JBA που υλοποιήθηκε.
- Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την συσχέτιση των δεικτών JBA και GSM με όλα τα υπόλοιπα μεγέθη ενδιαφέροντος τόσο για εικόνες συστολών όσο και διαστολών ανά ασθενή και ανά εξέταση.
- Στο πέμπτο κεφάλαιο παρατίθενται τα συμπεράσματα που εξάγονται από τα αποτελέσματα που προέκυψαν.
- Στο τελευταίο κεφάλαιο προτείνονται θέματα περαιτέρω μελέτης που σχετίζονται με την εν λόγω διπλωματική εργασία, όμως ξεπερνούν τα πλαίσιά της.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Η ΥΦΗ ΚΑΙ ΔΕΙΚΤΕΣ ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΝΤΟΣ

2.1 Η υφή στην εικόνα

2.1.1 Εύρεση χαρακτηριστικών της εικόνας

Με την έλευση των ψηφιακών υπολογιστών υψηλής επεξεργαστικής ισχύος παρέχεται η δυνατότητα να υλοποιηθούν μαθηματικές και αλγοριθμικές τεχνικές επεξεργασίας απεικονιστικών δεδομένα σε ποιότητα ισάξια με αυτή μιας φωτογραφίας. Στις περισσότερες από αυτές τις διεργασίες η απεικονιστική πληροφορία αναπαρίσταται σαν συνάρτηση δυο μεταβλητών (x, y) . Η εικόνα στην ψηφιακή της μορφή συνήθως αποθηκεύεται στον υπολογιστή ως ένας δισδιάστατος πίνακας. Αν $L_x = \{1, 2, \dots, N_x\}$ και $L_y = \{1, 2, \dots, N_y\}$ είναι οι X, Y χωρικές περιοχές, τότε το $L_x * L_y$ είναι το σύνολο των περιοχών ανάλυσης και η ψηφιακή εικόνα I είναι μια συνάρτηση που αναθέτει μια τιμή της κλίμακας του γκρι $G = \{1, 2, \dots, N_g\}$ σε κάθε μια περιοχή ανάλυσης ($I: L_x * L_y \rightarrow G$). Δισδιάστατες τεχνικές εφαρμόζονται στην εικόνα I για να επιτευχθούν συγκεκριμένες διεργασίες επεξεργασίας όπως είναι η κωδικοποίηση της εικόνας, η αποκατάστασή της, η ενίσχυση συγκεκριμένων χαρακτηριστικών της και η ταξινόμησή της [51], [52].

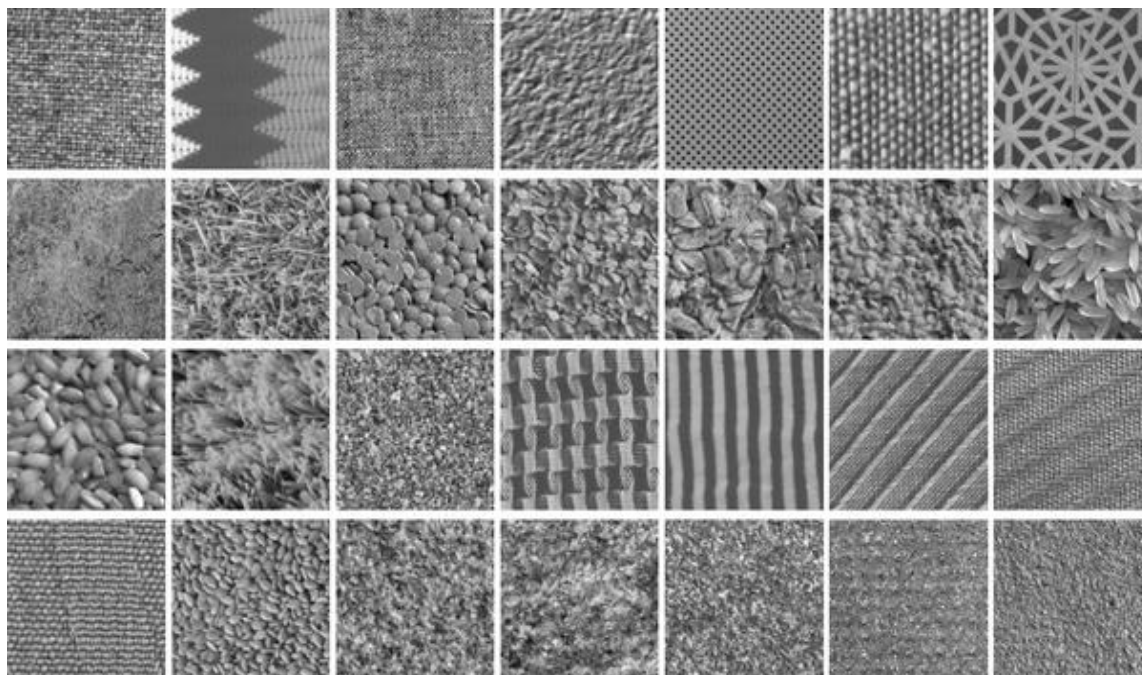
Στην αναζήτηση κατάλληλων χαρακτηριστικών που θα περιέχουν απεικονιστική πληροφορία, είναι φυσικό να αναζητηθούν κατηγορίες χαρακτηριστικών που οι άνθρωποι χρησιμοποιούν για την εξόρυξη απεικονιστικών πληροφοριών. Τα φασματικά χαρακτηριστικά, τα χαρακτηριστικά υφής και τα χαρακτηριστικά συσχέτισης είναι τα τρία θεμελιώδη στοιχεία για την εύρεση μοτίβων από τον άνθρωπο κατά την επεξεργασία έγχρωμων εικόνων. Τα φασματικά χαρακτηριστικά περιγράφουν μέσες τονικές εναλλαγές σε ευρείες μπάντες του ορατού και του υπέρυθρου φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, ενώ τα χαρακτηριστικά υφής περιέχουν πληροφορία σχετικά με την χωρική κατανομή των τονικών εναλλαγών μέσα στην επιθυμητή μπάντα συχνοτήτων. Τα χαρακτηριστικά συσχέτισης περιέχουν πληροφορία από περιοχές απεικονιστικών δεδομένων οι οποίες βρίσκονται κοντά στην περιοχή, στην οποία πραγματοποιείται ανάλυση. Όταν αναλύονται μικρές περιοχές εικόνας από ασπρόμαυρες εικόνες, τότε η υφή και τόνος θεωρούνται τα περισσότερο σημαντικά χαρακτηριστικά.

2.1.2 Ο τόνος και η υφή

Η ιδέα του τόνου βασίζεται στις εναλλασσόμενες αποχρώσεις του γκρι των περιοχών ανάλυσης σε μια εικόνα, ενώ η υφή θεωρείται ως η χωρική (στατιστική) κατανομή των γκριζών τόνων. Η υφή και ο τόνος δεν είναι ανεξάρτητα χαρακτηριστικά παρ' όλο που έχουν μια σχέση που μοιάζει με αυτή ενός σωματιδίου και ενός κύματος. Η υφή και ο τόνος είναι πάντα

παρόντα χαρακτηριστικά σε μια εικόνα, παρ' όλο που μερικές φορές το ένα χαρακτηριστικό υπερκαλύπτει τα υπόλοιπα.

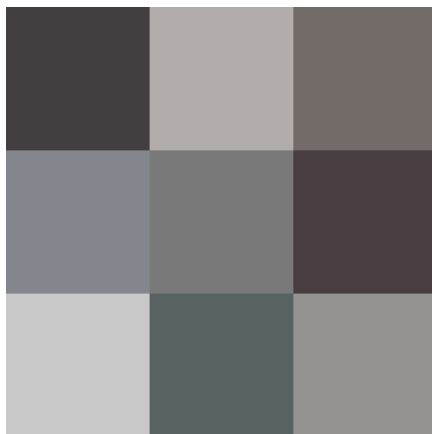
Η υφή μπορεί να χαρακτηριστεί ως λεία, τραχιά, ή ομαλή, όπως και με αυλακώσεις, με γραμμές, ή ακανόνιστη. Για παράδειγμα σε υγρές τροπικές περιοχές η λεία υφή σε μια εικόνα ραντάρ μπορεί να αντιπροσωπεύει ιζηματογενή πετρώματα με λείες πτυχώσεις, ενώ μια τραχιά υφή μπορεί να υποδηλώνει ιζηματογενή πετρώματα με τραχιές πτυχώσεις. Μια μεγάλη επιφάνεια με υψηλής αντίθεσης συστατικά στοιχεία μπορεί να υποδηλώνει πυρογενή πετρώματα. Επίσης μια λοφώδης υφή μπορεί να υποδηλώνει διαβρωμένα πυρογενή πετρώματα. Δείγματα εικόνων υφής φαίνονται στην **Εικόνα 11** [53].



Εικόνα 11: Δείγματα εικόνων υφής.

Όπως προαναφέρθηκε η υφή και ο τόνος έχουν μια αλληλένδετη σχέση. Ο τόνος και η υφή είναι πάντοτε παρούσες ιδιότητες σε μια εικόνα, ωστόσο μια από τις δυο ιδιότητες μπορεί να υπερισχύει κάποιες φορές, όπως στην αλληλουχία εικόνων της **Εικόνα 12** [54], όπου κυριαρχεί ο τόνος. Η βασική ενστικτώδης αντίληψη αναφορικά με τις σχέσεις μεταξύ τόνου και υφής είναι οι παρακάτω [55]:

- Όταν ένα κομμάτι μικρής περιοχής έχει μικρές εναλλαγές (παραδείγματος χάριν μικρή εναλλαγή στα χαρακτηριστικά ενός διακριτού γκριζου τόνου) η κυριαρχούσα ιδιότητα είναι ο τόνος.
- Όταν ένα κομμάτι μικρής περιοχής έχει μεγάλες εναλλαγές στα χαρακτηριστικά μιας διακριτής γκριζας εικόνας, τότε η κυριαρχούσα ιδιότητα αυτής της περιοχής είναι η υφή.



Εικόνα 12: Παράδειγμα εικόνων στις οποίες κυριαρχεί ο τόνος.

Ζωτικής σημασίας για αυτήν την διάκριση είναι το μέγεθος του κομματιού της μικρής περιοχής, τα σχετικά μεγέθη των διακριτών στοιχείων και ο αριθμός των διαχωρίσιμων διακριτών στοιχείων. Καθώς ο αριθμός των διαχωρίσιμων τονικών διακριτών στοιχείων μειώνεται, οι τονικές ιδιότητες θα κυριαρχήσουν. Για την ακρίβεια, όταν ένα κομμάτι μικρής περιοχής είναι το μοναδικό μέγεθος μιας περιοχής ανάλυσης, έτσι ώστε να υπάρχει μόνο ένα διακριτό στοιχείο, η μόνη ιδιότητα που είναι παρούσα είναι ο τόνος. Καθώς ο αριθμός των διαχωρίσιμων στοιχείων μιας διακριτής εικόνας γκρίζας κλίμακας αυξάνεται μέσα στο μικρό κομμάτι περιοχής, η ιδιότητα της υφής θα υπερισχύσει.

Μια σημαντική ιδιότητα του τόνου και της υφής είναι το χωρικό μοτίβο των περιοχών ανάλυσης που συνθέτει κάθε διακριτό τονικό στοιχείο. Όταν δεν υπάρχει χωρικό μοτίβο και οι εναλλαγές μεταξύ των χαρακτηριστικών γκρίζας κλίμακας είναι μεγάλη, προκύπτει μια λεία επιφάνεια. Όταν τα τοπικά χαρακτηριστικά γίνουν πιο διακριτά και περιλαμβάνουν όλο και περισσότερες περιοχές ανάλυσης προκύπτει μια πιο τραχιά επιφάνεια.

Η παραπάνω περιγραφή της υφής είναι φυσικά μια μεγάλη απλούστευση και εξιδανίκευση της πραγματικότητας. Τα διακριτά τονικά χαρακτηριστικά είναι αρκετά ασαφή με τέτοιο τρόπο ώστε να μην στέκονται απαραίτητα ως ανεξάρτητες οντότητες. Για το λόγο αυτό η συνιστώμενη ανάλυση της υφής πραγματοποιείται με πιο γενικές ή μακροσκοπικές ιδέες παρά με διακριτά τονικά χαρακτηριστικά [55].

2.1.3 Η ανάλυση της υφής

Η υφή είναι μια εγγενής ιδιότητα σε όλες τις επιφάνειες (στις αυλακώσεις του ξύλου, στην ύφανση ενός υφάσματος, στο μοτίβο των καλλιιεργειών σε ένα χωράφι κ.α.). Η υφή περιέχει σημαντικές πληροφορίες σχετικά με τον δομικό διακανονισμό των επιφανειών και την σχέση τους με το γύρω περιβάλλον. Αν και είναι εύκολο για τους ανθρώπους ως παρατηρητές να αναγνωρίζουν και να περιγράφουν με εμπειρικούς όρους την υφή, είναι εξαιρετικά δύσκολο να δοθεί ακριβής ορισμός της υφής και να πραγματοποιηθεί ανάλυσή της από έναν ψηφιακό υπολογιστή. Από τη στιγμή που οι ιδιότητες της υφής περιέχουν χρήσιμες πληροφορίες για διαχωρισμό μεταξύ επιφανειών, είναι σημαντικό να αναπτυχθούν δείκτες υφής.

Η προτεινόμενη μέθοδος για απόκτηση χαρακτηριστικών υφής από μια εικόνα βασίζεται στην υπόθεση πως η πληροφορία της υφής σε μια εικόνα I περιέχεται στην ολική ή μέση χωρική συσχέτιση μεταξύ των γκρίζων τόνων που υπάρχουν στην εικόνα. Πιο συγκεκριμένα υποτίθεται πως η πληροφορία της υφής είναι κατάλληλα καθορισμένη από ένα σύνολο χωρικά συσχετισμένων πινάκων γκρίζων τόνων οι οποίοι υπολογίζονται για διάφορες γωνιακές σχέσεις και αποστάσεις μεταξύ των γειτονικών περιοχών ανάλυσης της εικόνας [55].

Υπάρχουν τέσσερα σημαντικά ζητήματα στην ανάλυση υφής:

- Η εξαγωγή χαρακτηριστικών, ώστε να υπολογισθεί ένα χαρακτηριστικό της ψηφιακής εικόνας ικανό να περιγράψει αριθμητικά τις ιδιότητες της υφής της.
- Η διάκριση της υφής, ώστε να διαχωριστεί μια ανάγλυφη εικόνα σε περιοχές, κάθε μία από τις οποίες αντιστοιχεί σε μια αντιληπτά ομοιογενή υφή (διαδικασία που οδηγεί σε κατάτμηση της εικόνας).
- Η ταξινόμηση της υφής, ώστε να προσδιοριστεί σε ποια, από έναν πεπερασμένο αριθμό καθορισμένων κατηγοριών (όπως σε φυσιολογικό ή παθολογικό ιστό) ανήκει μια ομοιογενής περιοχή υφής.
- Η εξαγωγή σχημάτων από την υφή, ώστε να ανακατασκευασθεί η τρισδιάστατη γεωμετρία της επιφάνειας της εικόνας από τις πληροφορίες της υφής.

Η εξαγωγή χαρακτηριστικών είναι το πρώτο στάδιο της ανάλυσης υφής της εικόνας. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από αυτό το στάδιο χρησιμοποιούνται για τη διάκριση της υφής, τη ταξινόμηση της εικόνας, ή για το προσδιορισμό του σχήματος του αντικειμένου που περιέχει η εικόνα.

Οι προσεγγίσεις για την ανάλυση της υφής συνήθως κατηγοριοποιούνται σε:

- Δομικές
- Στατιστικές
- Βασισμένες σε μοντέλα
- Μετασχηματισμούς

Δομική προσέγγιση

Οι δομικές προσεγγίσεις [56], [57] αναπαριστούν την υφή από καλώς ορισμένα πρωτεύοντα στοιχεία (μικροϋφές) και μια ιεραρχία χωρικών τοποθετήσεων (μακροϋφές) αυτών των πρωτευόντων στοιχείων. Για να περιγραφεί η υφή, κάποιος πρέπει να καθορίσει τα πρωτεύοντα στοιχεία και τους κανόνες τοποθέτησης. Η επιλογή ενός πρωτεύοντος στοιχείου (από ένα σύνολο πρωτευόντων στοιχείων) και η πιθανότητα το επιλεγθέν πρωτεύον

στοιχείο να τοποθετηθεί σε μια συγκεκριμένη θέση μπορεί να είναι μια συνάρτηση θέσης ή των πρωτογενών χαρακτηριστικών κοντά στην θέση. Το πλεονέκτημα της δομικής προσέγγισης είναι ότι παρέχει μια καλή συμβολική περιγραφή της εικόνας. Ωστόσο, αυτό το χαρακτηριστικό είναι πιο χρήσιμο για εργασίες σύνθεσης παρά ανάλυσης. Οι αφηρημένες περιγραφές μπορούν να οριστούν ασθενώς για τη φυσική υφή, λόγω της μεταβλητότητας των μικρο- και μακροδομών και χωρίς σαφή διάκριση μεταξύ τους.

Στατιστική προσέγγιση

Σε αντίθεση με τις δομικές μεθόδους, οι στατιστικές προσεγγίσεις δεν επιχειρούν να κατανοήσουν ρητά την ιεραρχική δομή της υφής. Αντί αυτού, αντιπροσωπεύουν την υφή έμμεσα από τις μη ντετερμινιστικές ιδιότητες που διέπουν τις κατανομές και τις σχέσεις μεταξύ των γκριζών επιπέδων μίας εικόνας. Αυτές οι μέθοδοι βασίζονται σε δεύτερης τάξης στατιστικές (δηλαδή στατιστικά δοσμένα σε ζεύγη εικονοστοιχείων) και έχουν φανεί να επιτυγχάνουν υψηλότερα ποσοστά διάκρισης από το φάσμα ισχύος (βασισμένο σε μετασχηματισμούς) και των δομικών μεθόδων [58]. Έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές έρευνες ως προς την ανθρώπινη ικανότητα διαχωρισμού εικόνων ανάλογα με την ομοιότητά τους σε διάφορα στατιστικά μεγέθη [59]. Η υφή σε εικόνες γκριζας-κλίμακας διακρίνεται ικανοποιητικά μόνο αν διαφέρουν οι ροπές δεύτερης τάξης. Ίσες ροπές δεύτερης τάξης, αλλά διαφορετικές ροπές τρίτης τάξης απαιτούν επιπλέον νοητική προσπάθεια. Αυτό μπορεί να αποτελεί επίσης ένδειξη ότι για αυτόματη επεξεργασία, οι στατιστικές μέχρι δεύτερης τάξης μπορεί να είναι πιο σημαντικές [60]. Τα πιο δημοφιλή στατιστικά χαρακτηριστικά δεύτερης τάξης για την ανάλυση υφής που προέρχονται από τον πίνακα συνύπαρξης (co-occurrence matrix) [56]. [56] Η χρήση του συγκεκριμένου πίνακα έχει αποδειχθεί ότι διαθέτει τη δυναμική για την αποτελεσματική διάκριση της υφής σε βιοϊατρικές εικόνες [61], [62]. Η προσέγγιση που βασίζεται σε πολυδιάστατους πίνακες συνύπαρξης έχει αποδειχθεί πως ξεπερνά την τεχνική των πακέτων κυματιδίων (wavelet transform), όταν εφαρμόζεται για κατάταξη υφής [63].

Προσέγγιση βασισμένη σε μοντέλα

Η ανάλυση της υφής βασισμένη σε μοντέλα [64], [65], [66], [67], [68], [69], [70] χρησιμοποιώντας φράκταλ και στοχαστικά μοντέλα, αποπειράθηκε να ερμηνεύσει την υφή μιας εικόνας με τη χρήση παραγωγικών μοντέλων και στοχαστικών μοντέλων αντίστοιχα. Οι παράμετροι του μοντέλου εκτιμούνται και στη συνέχεια χρησιμοποιούνται για την ανάλυση της εικόνας. Στην πράξη, η υπολογιστική πολυπλοκότητα που προκύπτει κατά την εκτίμηση των παραμέτρων του στοχαστικού μοντέλου είναι το κυρίως πρόβλημα. Το μοντέλο των φράκταλς έχει φανεί ότι είναι χρήσιμο για τη μοντελοποίηση φυσικής υφής. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί επίσης για την ανάλυση υφής και για διαχωρισμό υφής [69], [71], [72], [73]. Ωστόσο, στερείται επιλογής προσανατολισμού και δεν είναι κατάλληλο για την περιγραφή τοπικών δομών της εικόνας.

Προσέγγιση με μετασχηματισμούς

Μέθοδοι μετασχηματισμών για την ανάλυση υφής, όπως μετασχηματισμών Fourier [74], Gabor [75], [76] και μετασχηματισμών κυματιδίου [77], [78], [79], [80] αντιπροσωπεύουν μια εικόνα σε ένα χώρο του οποίου το σύστημα συντεταγμένων έχει μια ερμηνεία που είναι στενά συνδεδεμένη με τα χαρακτηριστικά της υφής (όπως είναι η συχνότητα ή το μέγεθος). Οι μέθοδοι βασισμένες στο μετασχηματισμό Fourier έχουν κακές επιδόσεις στην πράξη, λόγω της έλλειψης χωρικού προσδιορισμού. Τα φίλτρα Gabor παρέχουν τα μέσα για καλύτερο προσδιορισμό στο χώρο. Ωστόσο, η χρησιμότητά τους περιορίζεται στην πράξη, διότι συνήθως δεν υπάρχει ενιαία ανάλυση με την οποία μπορεί να εντοπισθεί μια χωρική δομή σε φυσική υφή. Σε σύγκριση με το μετασχηματισμό Gabor, οι μετασχηματισμοί κυματιδίου διαθέτουν πολλά πλεονεκτήματα:

- Μεταβλητή χωρική ανάλυση η οποία του επιτρέπει να αναπαριστά υφή στην πιο ταιριαστή κλίμακα.
- Φάσμα επιλογών για τη συνάρτηση κυματιδίων, έτσι ώστε να είναι σε θέση να επιλεχθούν τα καταλληλότερα κυματίδια για την ανάλυση υφής ανά εφαρμογή.

Τα παραπάνω πλεονεκτήματα κάνουν το μετασχηματισμό κυματιδίων ελκυστικό για τον κατακερματισμό υφής. Το πρόβλημα με τον μετασχηματισμό κυματιδίων είναι ότι δεν παραμένει αναλλοίωτος της εκάστοτε μετάφρασης [81], [82].

2.1.4 Τεχνικές εξαγωγής χαρακτηριστικών υφής

Υποθέτουμε πως η εικόνα είναι μια συνάρτηση $f(x,y)$ δυο χωρικών μεταβλητών x και y , όπου $x=0,1 \dots, N-1$ και $y=0,1 \dots, M-1$. Η συνάρτηση $f(x,y)$ μπορεί να πάρει διακριτές τιμές $i=0, 1, \dots, G-1$, όπου το G είναι ο συνολικός αριθμός των επιπέδων φωτεινότητας της εικόνας. Το ιστόγραμμα των επιπέδων φωτεινότητας είναι μια συνάρτηση που δείχνει, για κάθε επίπεδο φωτεινότητας, τον αριθμό των εικονοστοιχείων σε ολόκληρη την εικόνα, τα οποία έχουν αυτήν την φωτεινότητα:

$$h(i) = \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{M-1} \delta(f(x,y), i) \quad (1)$$

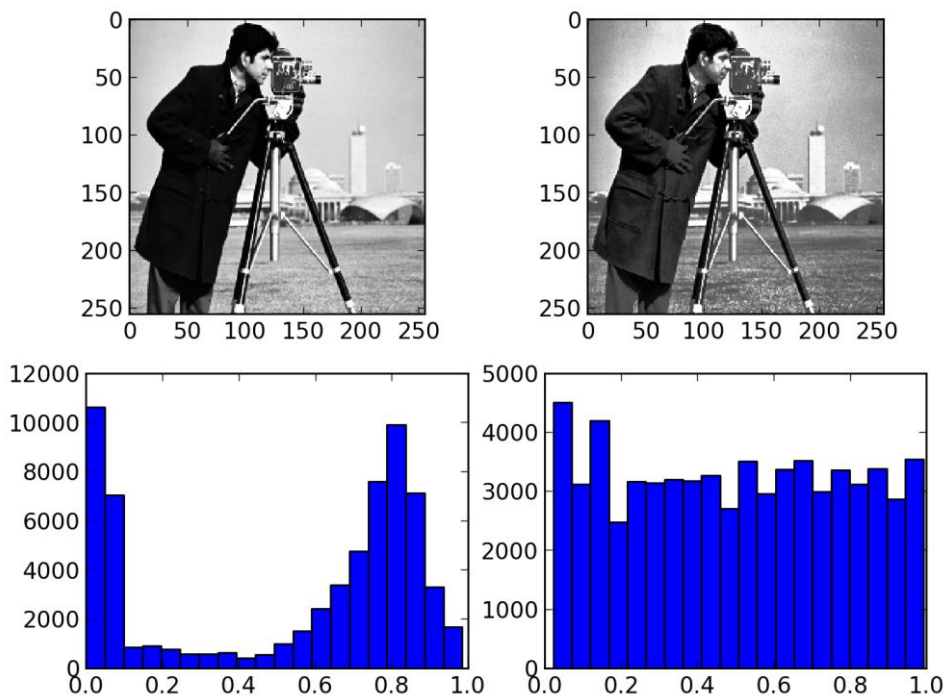
όπου $\delta(i,j)$ είναι η συνάρτηση δέλτα:

$$\delta(i,j) = \begin{cases} 1, & j = i \\ 0, & j \neq i \end{cases} \quad (2)$$

Το ιστόγραμμα των επιπέδων φωτεινότητας είναι προφανώς μια συνοπτική και απλή περίληψη των στατιστικών πληροφοριών που περιέχονται στην εικόνα. Ο υπολογισμός του ιστογράμματος γκρίζας κλίμακας περιλαμβάνει μεμονωμένα εικονοστοιχεία. Έτσι, το ιστόγραμμα περιέχει τις πρώτες τάξεως στατιστικές πληροφορίες σχετικά με την εικόνα (ή τμήματός της). Παράδειγμα ιστογράμματος φαίνεται στην Εικόνα 13 [83]. Διαιρώντας τις

τιμές του $h(i)$ με το συνολικό αριθμό των εικονοστοιχείων της εικόνας αποκτάται η κατά προσέγγιση πυκνότητα πιθανότητας εμφάνισης των επιπέδων φωτεινότητας.

$$p(i) = h(i)/(N * M), i = 0, 1, \dots, G - 1 \quad (3)$$



Εικόνα 13: Παράδειγμα ιστογράμματος εικόνας.

Το ιστογράμμα μπορεί εύκολα να υπολογιστεί, δεδομένης της εικόνας. Το σχήμα του ιστογράμματος παρέχει πολλές ενδείξεις ως προς το χαρακτήρα της εικόνας. Για παράδειγμα, ένα στενά κατανεμημένο ιστογράμμα δείχνει εικόνα χαμηλής αντίθεσης. Ένα ιστογράμμα με δυο κορυφές συχνά υποδηλώνει ότι η εικόνα περιείχε ένα αντικείμενο με ένα στενό εύρος φωτεινοτήτων και ένα φόντο με διαφορετική φωτεινότητα. Διάφορες χρήσιμες παράμετροι (χαρακτηριστικά της εικόνας) μπορούν να προκύψουν από το ιστογράμμα για να περιγράψουν ποσοτικά τις πρώτης τάξης στατιστικές ιδιότητες της εικόνας. Οι πιο συχνά αποκαλούμενες και ως κεντρικές ροπές [84] παράγονται από αυτό για να χαρακτηρίσουν την υφή [85], [86], όπως ορίζονται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\text{Μέση τιμή: } \mu = \sum_{i=0}^{G-1} ip(i) \quad (4)$$

$$\text{Διακύμανση: } \sigma^2 = \sum_{i=0}^{G-1} (i - \mu)^2 p(i) \quad (5)$$

$$\text{Ασυμμετρία: } \mu_3 = \sigma^{-3} \sum_{i=0}^{G-1} (i - \mu)^3 p(i) \quad (6)$$

$$\text{Κύρτωση: } \mu_4 = \sigma^{-4} \sum_{i=0}^{G-1} (i - \mu)^4 p(i) \quad (7)$$

Ακόμα δυο παράμετροι που χρησιμοποιούνται είναι:

$$\text{Ενέργεια: } E = \sum_{i=0}^{G-1} [p(i)]^2 \quad (8)$$

$$\text{Εντροπία: } H = -\sum_{i=0}^{G-1} p(i) \log_2[p(i)] \quad (9)$$

Η μέση τιμή παίρνει το μέσο επίπεδο της φωτεινότητας της εικόνας ή της υφής που εξετάζεται, ενώ η διακύμανση περιγράφει την μεταβολή της φωτεινότητας γύρω από τη μέση τιμή. Η ασυμμετρία είναι μηδέν εάν το ιστόγραμμα είναι συμμετρικό γύρω από τη μέση τιμή, αλλιώς είναι είτε θετική είτε αρνητική αναλόγως εάν έχει λοξότητα πάνω ή κάτω από τη μέση τιμή. Έτσι η μ_3 είναι μια ένδειξη της συμμετρίας. Η κύρτωση είναι ένα μέτρο για το αν το ιστόγραμμα είναι επίπεδο ή παρουσιάζει αιχμή. Η εντροπία είναι ένα μέτρο της ομοιομορφίας του ιστογράμματος. Άλλα πιθανά χαρακτηριστικά που προέρχονται από το ιστόγραμμα είναι η ελάχιστη, η μέγιστη και η ενδιάμεση τιμή φωτεινότητας, όπως και το εύρος φωτεινοτήτων.

Στην περίπτωση των εικόνων που ελήφθησαν από κάποιο μέσο οπτικής λήψης (όπως είναι η φωτογραφική μηχανή, η βιντεοκάμερα κ.α.), η μέση τιμή και η διακύμανση δεν φέρουν στην πραγματικότητα πληροφορία σχετικά με την υφή. Αντιπροσωπεύουν περισσότερο τη διαδικασία απόκτησης της εικόνας, όπως τις μέσες συνθήκες φωτισμού ή την απολαβή του ενισχυτή του βίντεο. Χρησιμοποιώντας εικόνες ομαλοποιημένες τόσο κατά την μέση τιμή όσο και τη διακύμανση μπορεί να δώσει καλύτερη ακρίβεια στην διάκριση της υφής από ότι χρησιμοποιώντας την πραγματική μέση τιμή και την πραγματική διακύμανση ως παραμέτρους υφής [81]. Έτσι οι εικόνες συχνά κανονικοποιούνται για να έχουν την ίδια μέση τιμή, π.χ. $\mu = 0$, και την ίδια τυπική απόκλιση, π.χ. $\sigma = 1$.

Οι πληροφορίες που προέρχονται από τα τοπικά ιστογράμματα της εικόνας χρησιμοποιούνται ως χαρακτηριστικά για τον κατακερματισμό της υφής [87]. Ειδικότερα, η μονάδα μέτρησης και η κατάσταση του ιστογράμματος προτείνονται για την ποσοτική περιγραφή της υφής. Για το εικονοστοιχείο (x, y) τοποθετημένο στο κέντρο ενός παραθύρου που περιέχει N εικονοστοιχεία, η μονάδα μέτρησης είναι:

$$I_{MH}(x, y) = \sum_{i=0}^{G-1} \frac{h(i) - N/G}{\sqrt{h(i)[1-p(i)] + N/G(1-\frac{1}{G})}} \quad (10)$$

Υποστηρίζεται ότι η παραπάνω μονάδα μέτρησης είναι ένα μέτρο της πληροφορίας που περιλαμβάνεται στο ιστόγραμμα [87]. Η κατάσταση είναι το επίπεδο της φωτεινότητας που αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή της φωτεινότητας που μετρείται στο ιστόγραμμα.

Χαρακτηριστικά βασισμένα στον πίνακα συνύπαρξης

Το κύριο πλεονέκτημα χρήσης των παραπάνω χαρακτηριστικών υφής είναι, προφανώς, η απλότητά τους. Ωστόσο, δεν μπορούν να χαρακτηρίσουν πλήρως την υφή. Ο Julesz βρήκε μέσα από τα περίφημα πειράματα που αφορούσαν την ανθρώπινη οπτική αντίληψη της υφής [59], ότι για μια μεγάλη κατηγορία εικόνων υφής «κανένα ζεύγος εικόνων υφής δεν μπορεί να διακριθεί, εφόσον συμφωνούν οι δευτέρας τάξης στατιστικές τους». Ακόμη και αν έχουν βρεθεί αντιπαραδείγματα σε αυτήν την εικασία, η σημασία των στατιστικών δεύτερης τάξης είναι αδιαμφισβήτητη. Ως εκ

τούτου, η κύρια στατιστική μέθοδος που χρησιμοποιείται στην ανάλυση υφής είναι αυτή που βασίζεται τον ορισμό των κοινών κατανομών πιθανότητας ζευγών εικονοστοιχείων.

Το ιστόγραμμα δεύτερης τάξης ορίζεται ως ο πίνακας συνύπαρξης $b_{d\theta}(i, j)$ [55]. Όταν διαιρείται με το συνολικό αριθμό των γειτονικών εικονοστοιχείων $R(d, \theta)$ στην εικόνα, αυτός ο πίνακας γίνεται η εκτίμηση της από κοινού πιθανότητας, $p_{d\theta}(i, j)$, των δύο εικονοστοιχείων, με απόσταση d κατά μήκος μιας δεδομένης κατεύθυνσης θ έχοντας, πιο συγκεκριμένα, τιμές i και j . Υπάρχουν δύο μορφές του πίνακα συνύπαρξης:

- Μια συμμετρική όπου τα ζεύγη που διαχωρίζονται κατά d και $-d$ για μια δεδομένη κατεύθυνση θ προσμετρούνται.
- Μια μη συμμετρική όπου μόνο τα ζεύγη που διαχωρίζονται με απόσταση d προσμετρούνται.

Επισημώς, δεδομένης της εικόνας $f(x, y)$ με ένα σύνολο G διακριτών επιπέδων φωτεινότητας, ο πίνακας $b_{d\theta}(i, j)$ ορίζεται έτσι ώστε η (i, j) στή του είσοδος να είναι ίση με τον αριθμό των φορών όπου:

$$f(x_1, y_1) = i \quad (11)$$

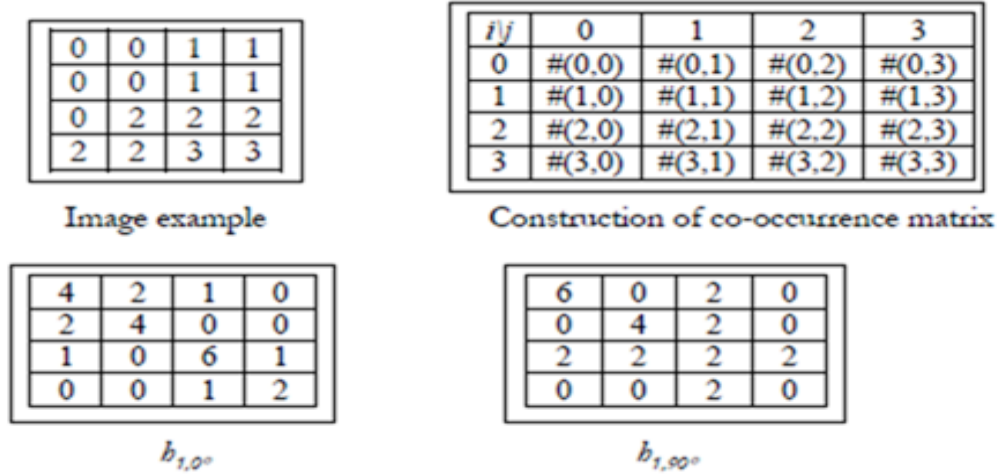
και

$$f(x_2, y_2) = j \quad (12)$$

όπου

$$(x_2, y_2) = (x_1, y_1) + (d \cos\theta, d \sin\theta) \quad (13)$$

Με αυτόν τον τρόπο αποδίδεται ένας τετραγωνικός πίνακας με διάσταση ίση με τον αριθμό των επιπέδων φωτεινότητας της εικόνας, για κάθε απόσταση d και προσανατολισμό θ . Λόγω των απαιτητικών υπολογισμών που εμπλέκονται, συχνά μόνο οι αποστάσεις $d = 1$ και 2 εικονοστοιχείων με γωνίες $\theta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ και 135° υπολογίζονται [55]. Εάν τα ζεύγη των εικονοστοιχείων στην εικόνα είναι πολύ συσχετισμένα, οι εγγραφές στον $b_{d\theta}(i, j)$ θα συγκεντρώνονται κατά μήκος της διαγωνίου του πίνακα. Ο υπολογισμός του πίνακα συνύπαρξης απεικονίζεται στην **Εικόνα 14** [88], για $d = 1$. Η κατάταξη λείας υφής απαιτεί μικρές τιμές του d , ενώ η τραχιά υφή απαιτεί μεγάλες τιμές του d . Η μείωση του αριθμού των επιπέδων φωτεινότητας (με κβαντισμό της εικόνας σε λιγότερα επίπεδα φωτεινότητας) βοηθά στην αύξηση της ταχύτητας των υπολογισμών, με μερική απώλεια πληροφοριών της υφής.



Εικόνα 14: Παράδειγμα πίνακα συνύπαρξης.

Ο πίνακας συνύπαρξης περιέχει G^2 στοιχεία που είναι πάρα πολλά για την ανάλυση της υφής σε ένα εύλογο χρονικό διάστημα. Ο μειωμένος αριθμός των χαρακτηριστικών που μπορούν να υπολογιστούν χρησιμοποιώντας τον πίνακα συνύπαρξης για σκοπούς διάκρισης υφής αναφέρονται στις εργασίες [55], [86]. Ορισμένα από αυτά ορίζονται από τις εξισώσεις που ακολουθούν, όπου μ_x , μ_y και σ_x , σ_y δηλώνουν τις μέσες τιμές και τις τυπικές αποκλίσεις των αθροισμάτων γραμμών και στηλών του πίνακα, αντίστοιχα (σχετιζόμενες με τις συνοριακές κατανομές $p_x(i)$ και $p_y(j)$).

$$\text{Δεύτερη γωνιακή ροπή (ενέργεια): } \sum_{i=0}^{G-1} \sum_{j=0}^{G-1} [p(i,j)]^2 \quad (14)$$

$$\text{Συσχέτιση: } \sum_{i=0}^{G-1} \sum_{j=0}^{G-1} \frac{ijp(i,j) - \mu_x \mu_y}{\sigma_x \sigma_y} \quad (15)$$

$$\text{Απόλυτη τιμή: } \sum_{i=0}^{G-1} \sum_{j=0}^{G-1} |i - j| p(i,j) \quad (16)$$

$$\text{Αντίστροφη διαφορά: } \sum_{i=0}^{G-1} \sum_{j=0}^{G-1} \frac{p(i,j)}{1+(i-j)^2} \quad (17)$$

$$\text{Ομοιογένεια: } \sum_{i=0}^{G-1} \sum_{j=0}^{G-1} \frac{p(i,j)}{1+|i-j|} \quad (18)$$

$$\text{Εντροπία: } -\sum_{i=0}^{G-1} \sum_{j=0}^{G-1} p(i,j) \log_2[p(i,j)] \quad (19)$$

$$\text{Μέγιστη πιθανότητα: } \max_{i,j} [p(i,j)] \quad (20)$$

Μια επέκταση του συνόλου των χαρακτηριστικών από τον πίνακα συνύπαρξης μπορεί να βρεθεί στις εργασίες [61], [86].

Ένας γρήγορος αλγόριθμος για τον υπολογισμό των παραμέτρων του πίνακα συνύπαρξης προτάθηκε για τη μείωση της υπολογιστικής ισχύος και χρόνου [89], [90]. Ένας γενικευμένος πολυδιάστατος πίνακας συνύπαρξης έχει προταθεί, [91] ο οποίος εκμεταλλεύεται τη συνύπαρξη, όχι μόνο των γκρίζων επιπέδων σε κάποια απόσταση και διεύθυνση, αλλά επίσης και χαρακτηριστικά όπως το μέγεθος της τοπικής βαθμίδας Sobel [91]. Οι συγγραφείς ονόμασαν αυτή την προσέγγιση «μέθοδο στοιχειωδών δομών ισοροπίας».

Μία αύξηση στις διαστάσεις του πίνακα συνύπαρξης, η οποία βελτιώνει την περιγραφή των χωρικών σχέσεων, ωφελεί τόσο τον μονόχρωμο όσο και τον χρωματιστό κατακερματισμό της υφής [92].

2.2 Εκτίμηση της κίνησης σε εικόνα

Η εκτίμηση της κίνησης είναι μια διαδικασία προσδιορισμού των διανυσμάτων κίνησης που περιγράφουν τη μετατροπή από μια δισδιάστατη εικόνα σε μια άλλη συνήθως από γειτονικά πλαίσια μιας ακολουθίας βίντεο. Είναι ένα ασθενώς ορισμένο πρόβλημα καθώς η κίνηση πραγματοποιείται σε τρεις διαστάσεις, ενώ οι εικόνες είναι μια προβολή της τρισδιάστατης σκηνής πάνω σε ένα δισδιάστατο επίπεδο. Τα διανύσματα κίνησης μπορεί να αφορούν το σύνολο της εικόνας (παγκόσμια εκτίμηση κίνησης) ή συγκεκριμένα μέρη της, όπως ορθογώνια, αυθαίρετα σχήματα ή ακόμα και μεμονωμένα εικονοστοιχεία. Τα διανύσματα κίνησης μπορούν να αντιπροσωπευθούν από ένα μεταφραστικό μοντέλο ή πολλά άλλα μοντέλα που μπορούν να προσεγγίσουν την κίνηση μιας πραγματικής βιντεοκάμερας, όπως την περιστροφή της, την μετατόπιση της σε όλες τις διαστάσεις και τη μεγέθυνση που εν δυνάμει πραγματοποιεί.

Οι μέθοδοι για την εύρεση των διανυσμάτων κίνησης μπορούν να ταξινομηθούν σε μεθόδους που βασίζονται σε εικονοστοιχεία ("άμεσες") και τις μεθόδους που βασίζονται σε χαρακτηριστικά ("έμμεσες") [93], [94], [95].

Η εκτίμηση της κίνησης σε εικόνες B- mode υπερήχου καρωτίδας έχουν προσελκύσει το επιστημονικό ενδιαφέρον καθώς μπορούν με αυτόν τον τρόπο, να προσδιοριστούν οι μηχανικές ιδιότητες των ιστών που αποτελούν την καρωτίδα [96], [97], [98], [99], [100], [101], να επιτευχθεί κατακερματισμός των καρωτιδικών περιοχών [102], αλλά και να διακριθούν οι εικόνες συστολής και διαστολής της καρωτίδας.

2.3 Οι δείκτες ελαστικότητας

Δύο νέοι και πολλά υποσχόμενοι δείκτες για την αξιολόγηση της καρωτιδικής αθηρωμάτωσης είναι η ελαστικότητα της αθηρωματικής πλάκας και η σχετική ελαστικότητά της, που προκύπτει ως ο λόγος της ελαστικότητας της αθηρωματικής πλάκας προς την ελαστικότητα του υγιούς αρτηριακού τοιχώματος παραπλεύρως της πλάκας.

Η ελαστικότητα της πλάκας αποτελεί μια ένδειξη για το πόσο αυτή παραμορφώνεται υπό την επίδραση τάσεων και φαίνεται να εκφράζει την ομοιογένεια ή την ανομοιογένειά της. Υψηλή τιμή ελαστικότητας αντιστοιχεί σε δύσκαμπτο ιστό, ενώ χαμηλή τιμή της ελαστικότητας αντιστοιχεί σε ελαστικό ιστό. Επίσης, υψηλή τιμή σχετικής ελαστικότητας υποδεικνύει πλάκες πιο άκαμπτες από τον έσω-μέσο χιτώνα, ενώ, αντίστροφα, χαμηλή τιμή σχετικής ελαστικότητας υποδεικνύει πλάκες πιο ελαστικές από τον έσω-μέσο χιτώνα.

Η ελαστικότητα και η σχετική ελαστικότητα της αθηρωματικής πλάκας φαίνεται να σχετίζονται τόσο με κινηματικά χαρακτηριστικά της (πλάτος κίνησης, ταχύτητα, μετατόπιση μεταξύ συστολής και διαστολής) όσο και με δείκτες υφής (ενδιάμεση τιμή φωτεινότητας, εμβαδόν πλάκας, συσχέτιση) [103].

Οι δείκτες ελαστικότητας και σχετικής ελαστικότητας αποτελούν ένα νέο και πολλά υποσχόμενο πεδίο για περαιτέρω έρευνα [104].

2.4 Ο δείκτης ενδιάμεσης τιμής φωτεινότητας (Grey Scale Median- GSM)

Μια από τις απλούστερες παραμέτρους που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ποσοτικοποίηση της μορφής των καρωτιδικών πλακών σε ένα υπερηχογράφημα είναι η πρώτη τάξης στατιστικά ενδιάμεση τιμή της φωτεινότητας σε γκριζα κλίμακα, GSM, που ουσιαστικά είναι η ενδιάμεση τιμή της φωτεινότητας σε γκριζα κλίμακα των εικονοστοιχείων που απαρτίζουν την εικόνα υπερήχου μιας πλάκας. Η ενδιάμεση τιμή της φωτεινότητας σε γκριζα κλίμακα έχει βρεθεί ότι είναι ένας πιθανός δείκτης της αστάθειας της καρωτιδικής πλάκας με αρκετές μελέτες να δείχνουν συσχέτιση μεταξύ του GSM της πλάκας και εμφάνισης φλεγμονής σε αυτή [105], της εμφάνισης εγκεφαλικών επεισοδίων [106], [107], [108], [109], [110] και τον αυξημένο κίνδυνο εγκεφαλικού επεισοδίου κατά τη διάρκεια ή μετά την τοποθέτηση stent στην καρωτιδική αρτηρία (CAS) [111]. Παραδείγματα τιμών του GSM σε αθηρωματικές πλάκες φαίνονται στην **Εικόνα 15** [112]. Μια σύντομη ανασκόπηση της βιβλιογραφίας που έχει δημοσιευθεί μέχρι σήμερα σχετικά με το GSM της πλάκας παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα [112].

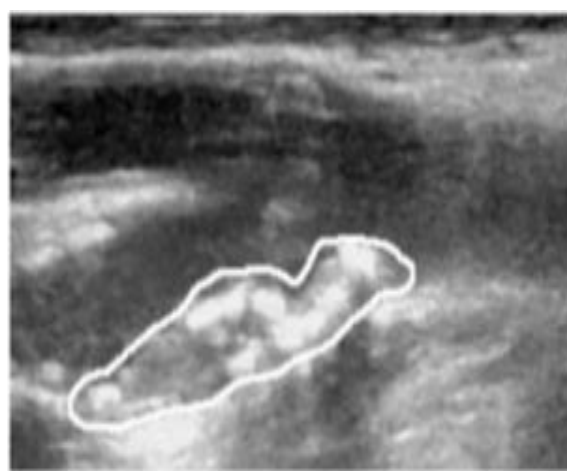
Πίνακας 1: Βιβλιογραφική ανασκόπηση για τον Δείκτη GSM.

G. Geroulakos, J. Domjan, et al. 1994 [113]	Συσχέτιση μεταξύ μη ηχογενών πλακών και εγκεφαλικών επεισοδίων.
N. El-barghouty, G. Geroulakos, et al. 1995 [107]	Το χαμηλό GSM συσχετίζεται με υψηλότερη συχνότητα εμφάνισης εγκεφαλικού επεισοδίου.
T. Elatrozy, A. Nicolaidis, et al. 1998 [106]	Το GSM φαίνεται να αποτελεί σημαντική παράμετρο που σχετίζεται με την εμφάνιση εγκεφαλικών επεισοδίων.
G. Biasi, A. Sampaolo, et al. 1999 [114]	Το GSM φαίνεται να είναι καταλληλότερος δείκτης από το βαθμό της στένωσης για την εύρεση πλακών που ευθύνονται για εγκεφαλικά επεισόδια.

M. Sabetai, T. Tegos, et al. 2000 [109]	Το GSM των πλακών που σχετίζονται με ασυμπτωματικά εγκεφαλικά επεισόδια είναι μικρότερο από των πλακών που δεν σχετίζονται.
T. Tegos, P. Stavropoulos, et al. 2001 [115]	Οι συμπτωματικές πλάκες φαίνεται να σχετίζονται με υψηλότερη πιθανότητα εγκεφαλικού.
S. Golemati, T. Tegos, et al. 2004 [116]	Το GSM μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον χαρακτηρισμό των αθηρωματικών πλακών της καρωτιδικής αρτηρίας.
M. Rosenkranz, O. Wittkugel, et al. 2009 [117]	Ασθενείς με εγκεφαλικό μικροεμβολισμό είχαν εικόνες με μικρότερο GSM από αυτούς που δεν είχαν τέτοιου είδους επεισόδια.
M. Salem, R. Sayers, et al. 2012 [118]	Το χαμηλό GSM σχετίζεται με υποτροπιάζοντα επεισόδια σε προσφάτως συμπτωματικούς ασθενείς.
Y. Irie, N. Katakami, et al. 2013 [119]	Το GSM φαίνεται να βοηθά στην πρόβλεψη καρδιαγγειακών επεισοδίων σε ασυμπτωματικούς ασθενείς με διαβήτη τύπου 2.



α) βαθμός στένωσης >70%,
GSM=20



β) βαθμός στένωσης >70%,
GSM=144

Εικόνα 15: Παράδειγμα τιμών GSM σε αθηρωματική πλάκα.

2.5 Ο τύπος της πλάκας

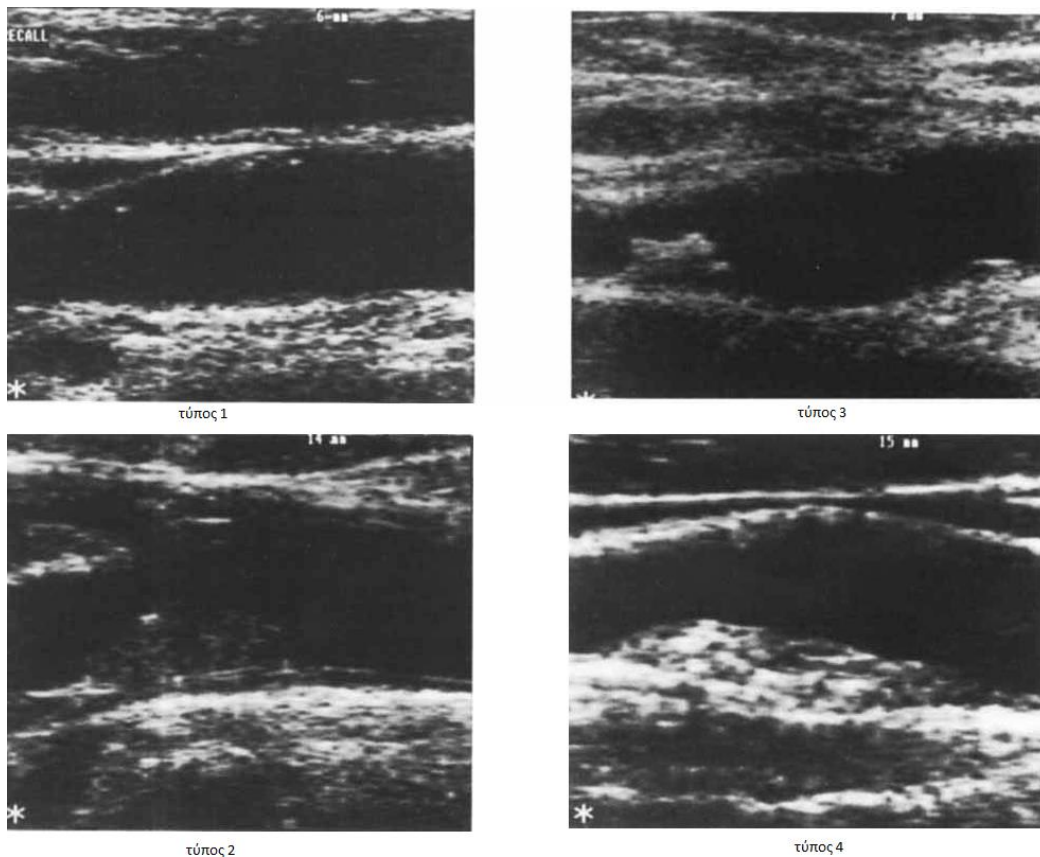
Ο τύπος της πλάκας είναι μια ταξινόμηση που επιτρέπει μια πιο προσεκτική μελέτη του χαρακτήρα και της συμπεριφοράς των πλακών[120].

Υπάρχουν πέντε (5) τύποι πλακών, όπως απεικονίζονται σε εικόνες υπερήχων β-σάρωσης και η ταξινόμηση κάθε πλάκας σε έναν από τους

πέντε (5) τύπους βασίζεται σε υποκειμενικά κριτήρια του εκάστοτε εξεταστή ιατρού [121]:

- Τύπου 1: Ομοιογενώς μη ηχογενείς πλάκες.
- Τύπου 2: Μη ηχογενείς πλάκες με μικρότερο από το 50% του συνολικού εμβαδού τους να αποτελείται από ηχογενείς περιοχές.
- Τύπου 3: Ηχογενείς πλάκες με μικρότερο από το 50% του συνολικού εμβαδού τους να αποτελείται από μη ηχογενείς περιοχές.
- Τύπου 4: Ομοιογενώς ηχογενείς πλάκες.
- Τύπου 5: Πλάκες που δεν μπορούν να ταξινομηθούν διότι διαθέτουν ισχυρή ασβέστωση και ακουστικά σκιώδεις περιοχές.

Στις συμπτωματικές αρτηρίες, ανεξάρτητα από τον βαθμό της στένωσης, οι τύποι 1 και 2 κυριαρχούν και συσχετίζονται με την ύπαρξη έλκους και αιμορραγίας. Έχει φανεί ότι οι μη ηχογενείς πλάκες έχουν αυξημένα επίπεδα λιπιδίων και χοληστερόλης, που τις κάνουν ασταθείς και επιρρεπείς σε έλκη και εμβολισμούς. Αντίθετα, οι ηχογενείς πλάκες περιέχουν σημαντικά περισσότερη λευκή ινώδη ουσία και κολλαγόνο, δίνοντάς τους ευστάθεια και κάνοντάς τους λιγότερο επιρρεπείς σε εμβολισμό [122], [123]. Παραδείγματα κάθε τύπου αθηρωματικής πλάκας φαίνονται στην **Εικόνα 16** [121]:



Για εύρεση του τύπου της πλάκας, με βάση τη ψηφιακή επεξεργασία εικόνας υπερήχου, χρησιμοποιούνται οι παρακάτω τύποι [124]:

- Τύπου 1: Μικρότερο από το 15% των εικονοστοιχείων που ανήκουν στην περιοχή της πλάκας έχουν τιμές φωτεινότητας μεγαλύτερες του 25.
- Τύπου 2: 15-50% των εικονοστοιχείων που ανήκουν στην περιοχή της πλάκας έχουν τιμές φωτεινότητας μεγαλύτερες του 25.
- Τύπου 3: 50-85 % των εικονοστοιχείων που ανήκουν στην περιοχή της πλάκας έχουν τιμές φωτεινότητας μεγαλύτερες του 25.
- Τύπου 4/5: Μεγαλύτερο από το 85% των εικονοστοιχείων που ανήκουν στην περιοχή της πλάκας έχουν τιμές φωτεινότητας μεγαλύτερες του 25.

2.6 Το ολικό εμβαδόν της πλάκας

Το ολικό εμβαδόν της περιοχής που καλύπτει η αθηρωματική πλάκα σε μια εικόνα υπερήχου B-mode μετريέται συνήθως σε τετραγωνικά χιλιοστά και έχει αποδειχθεί πως με τη μέτρηση του ολικού εμβαδού της πλάκας και με την παρακολούθηση της εξέλιξής του μπορούν να εντοπισθούν ποιοι ασθενείς έχουν αυξημένη πιθανότητα να παρουσιάσουν σύμπτωμα. Όσο το εμβαδόν της πλάκας μεγαλώνει, αυξάνεται και το ρίσκο εμβολισμού. Το εμβαδόν της πλάκας μπορεί να είναι χρήσιμο για στοχευόμενη προληπτική θεραπεία, για αξιολόγηση νέων θεραπειών και αποκρίσεων στη θεραπεία και μπορεί να βελτιώσει τη σχέση κόστους- αποτελεσματικότητας της δευτεοβάθμιας ιατρικής περίθαλψης [125], [126].

2.7 Ο δείκτης Juxtaluminal Black Area - JBA

Ο δείκτης JBA αποτελεί έναν σχετικά πρόσφατα χρησιμοποιούμενο δείκτη στην μελέτη της επικινδυνότητας των αθηρωματικών πλακών. Η σκούρα περιοχή κοντά στον αυλό (Juxtaluminal Black Area - JBA), που ορίζεται ως η περιοχή γειτονικά του αυλού με εικονοστοιχεία τα οποία μετά από κανονικοποίηση της εικόνας έχουν φωτεινότητα γκριζας κλίμακας <25, χωρίς ορατό ηχογενές κενό εντοπίζεται και οριοθετείται από εξειδικευμένο ιατρό και το εμβαδόν της περιοχής που καταλαμβάνει υπολογίζεται αυτόματα με κατάλληλο λογισμικό. Αν υπάρχουν περισσότερες από δύο διακριτές περιοχές που καλύπτουν τις πιο πάνω απαιτήσεις ώστε να μπορούν να χαρακτηρισθούν ως JBA περιοχές, τότε επιλέγεται η μεγαλύτερη τιμή και χρησιμοποιείται στις αναλύσεις. Μεγάλες τιμές του JBA έχουν συνδεθεί με υψηλότερη πιθανότητα εμφάνισης συμπτωμάτων για όλους τους βαθμούς στένωσης [127], [128]. Παράδειγμα JBA περιοχών φαίνεται στην **Εικόνα 17** [124].

Το 1997 οι ερευνητές H. Bassiotmy, Y. Sakaguchi, S. Mikucki, et al. εκπόνησαν έρευνα με σκοπό να καθορισθεί περαιτέρω το κατά πόσο η

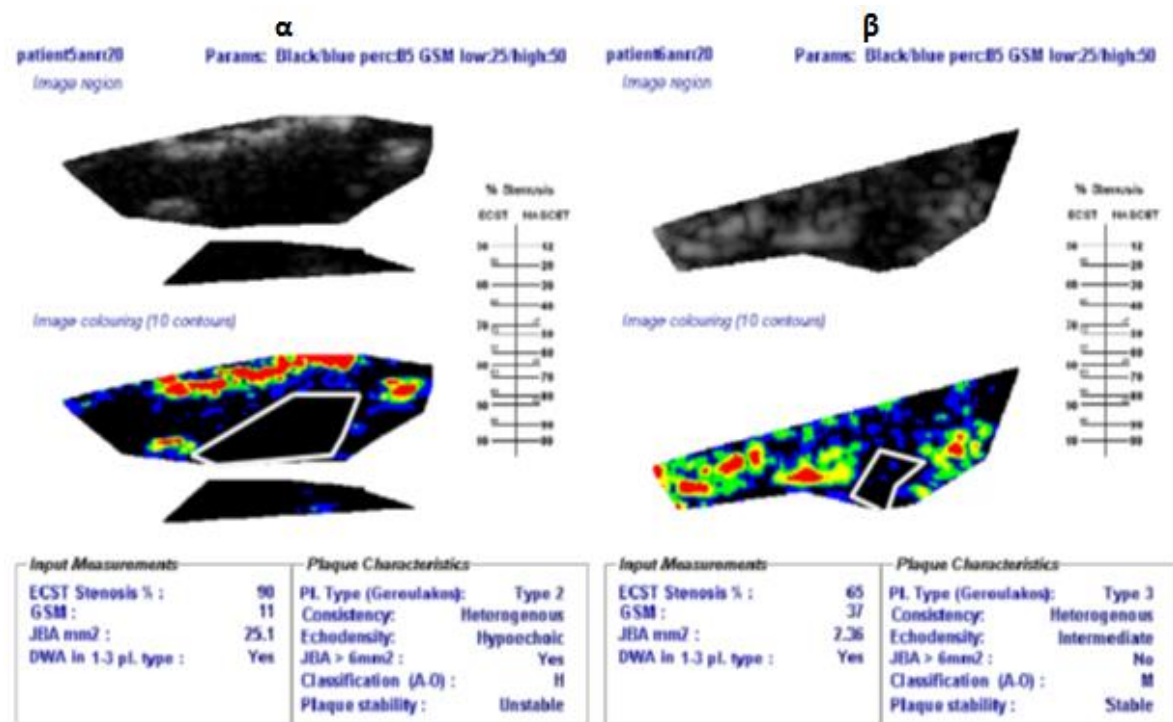
χωρική κατανομή των επιμέρους συστατικών της πλάκας σε σχέση με τον αυλό σχετίζεται με την εκδήλωση συμπτωμάτων [129]. Για το σκοπό αυτό αξιολογήθηκαν 99 καρωτιδικές πλάκες από ενδαρτηρεκτομή. Τα ευρήματα που προέκυψαν δείχνουν ότι η εγγύτητα του νεκρωτικού πυρήνα της πλάκας με τον αυλό σχετίζεται με εμφάνιση ισχαιμικών επεισοδίων. Επίσης, η σχετική θέση των επιμέρους συστατικών της πλάκας σε σχέση με το ινώδες κάλυμμα και τον αυλό φαίνεται να σχετίζεται με την εκδήλωση συμπτώματος και όχι η μορφολογική πολυπλοκότητα της καρωτιδικής στένωσης. Οι συγγραφείς συμπέραναν πως τεχνικές απεικόνισης που προσδιορίζουν με ακρίβεια τη θέση του νεκρωτικού πυρήνα και τις ενδείξεις φλεγμονωδών αντιδράσεων στο εσωτερικό των καρωτιδικών πλακών μπορούν να βοηθήσουν στον εντοπισμό των στενώσεων υψηλού κινδύνου πριν εμφανισθούν ενοχλήσεις ή συμπτωματική καρωτιδική νόσος.

Στη συνέχεια το 2010 οι ερευνητές M. Griffin, E. Kyriacou, C. Pattichis, et al. εκπόνησαν έρευνα για τον προσδιορισμό της διαγνωστικής αξίας της μαύρης (μη ηχογενούς) περιοχής κοντά στον αυλό χωρίς ορατό ηχογενές κενό (JBA) σε εικόνες υπερήχων πλακών εσωτερικών καρωτίδων [127]. Για το σκοπό αυτό λήφθηκε, σε εικόνες υπερήχων από πλάκες 324 ασθενών με ασυμπτωματική (n= 139) και συμπτωματική (n= 185) καρωτίδα, με στένωση από 50% έως 99%, το JBA σε mm² μετά την εξομάλυνση των εικόνων και συσχετίστηκε με την εμφάνιση συμπτώματος. Το αποτέλεσμα που προέκυψαν ήταν πως οι τιμές JBA > 8mm² φαίνεται να σχετίζονται με υψηλή συχνότητα συμπτωμάτων για όλους τους βαθμούς στένωσης. Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης δείχνουν τη διαγνωστική αξία του δείκτη JBA και την πρόταση, για πρώτη φορά, ενός κατωφλίου, στα 8 mm², που φαίνεται να σχετίζεται με τη συμπτωματικότητα.

Αργότερα, το 2013, οι ερευνητές S. Kakkos, M. Griffin, A. Nicolaidis, et al. εκπόνησαν επίσης εργασία για τον δείκτη JBA, με σκοπό τον έλεγχο της υπόθεσης για το αν το μέγεθος της μαύρης (μη ηχογενούς) περιοχής κοντά στον αυλό (JBA) σε εικόνες υπερήχων ασυμπτωματικών πλακών καρωτίδας προβλέπει μελλοντικό ισχαιμικό εγκεφαλικό επεισόδιο [130]. Για το σκοπό αυτό μετρήθηκε το JBA σε εικόνες αθηρωματικών πλακών στις καρωτίδες 1121 ασθενών οι οποίοι δεν είχαν εκδηλώσει σύμπτωμα τους προηγούμενους έξι (6) μήνες και παρουσίαζαν βαθμό στένωσης από 50% έως 99%. Οι ασθενείς παρακολούθηθηκαν για διάστημα έως και 8 ετών. Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης δείχνουν πως το JBA είχε γραμμική συσχέτιση με το ρυθμό μελλοντικών εγκεφαλικών επεισοδίων. Χρησιμοποιώντας τις καμπύλες Kaplan-Meier, ο μέσος ετήσιος ρυθμός εγκεφαλικού επεισοδίου ήταν 0.4% σε 706 ασθενείς με JBA < 4 mm², 1.4% σε 171 ασθενείς με JBA από 4 έως 8 mm², 3.2% σε 46 ασθενείς με JBA 8 έως 10 mm², και 5% σε 198 ασθενείς με JBA > 10 mm² (P < 0.001). Τα συμπεράσματα που προκύπτουν είναι πως το μέγεθος του JBA σχετίζεται γραμμικά με τον κίνδυνο εγκεφαλικού επεισοδίου και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μοντέλα εκτίμησης του κινδύνου αυτού. Επίσης, οι συγγραφείς πρότειναν πως το JBA μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διάκριση ασυμπτωματικών ασθενών, με υψηλό κίνδυνο εγκεφαλικού επεισοδίου οι οποίοι πρέπει να υποβληθούν σε καρωτιδική ενδαρτηρεκτομή και απαλλαγή ασθενών χαμηλού κινδύνου από μια άσκοπη επέμβαση.

Το 2014 οι ερευνητές A. Naylor , T. Schroeder, H. Sillesen στην έρευνα που διεξήγαγαν, στην οποία πραγματοποιήθηκε μια σύγχρονη περίληψη των κλινικών και απεικονιστικών συστημάτων βαθμολόγησης, αλγορίθμων πρόγνωσης και απεικόνισης και παραμέτρων που μπορεί να σχετίζονται με αυξημένο (ή μειωμένο) κίνδυνο εγκεφαλικού επεισοδίου σε ασθενείς με ασυμπτωματική καρωτιδική νόσο, κατέληξαν σε παρόμοια αποτελέσματα με τους προηγούμενους ερευνητές [131]. Τα αποτελέσματα της μελέτης ήταν πως τιμές $JBA < 4 \text{ mm}^2$ συσχετίστηκαν με ετήσιο κίνδυνο 0.4% εγκεφαλικού επεισοδίου, ο οποίος αυξήθηκε σε 1.4%, όταν το JBA ήταν 4-8 mm^2 . Το υψηλότερο ετήσιο ποσοστό εγκεφαλικών επεισοδίων παρατηρήθηκε σε ασυμπτωματικούς ασθενείς με υψηλότερες τιμές JBA (3.2% ετησίως για JBA των 8-10 mm^2 και 5.0% ετησίως για $JBA > 10 \text{ mm}^2$). Συνολικά, οι ασθενείς με $JBA < 8 \text{ mm}^2$ είχαν ετήσιο ρυθμό εγκεφαλικών επεισοδίων 0.6%, σε σύγκριση με 4.6% ετησίως σε ασθενείς με $JBA > 8 \text{ mm}^2$. Το συμπέρασμα που προέκυψε σε αυτήν την εργασία είναι πως οι παράμετροι που σχετίζονται με αυξημένο κίνδυνο εγκεφαλικού επεισοδίου περιλαμβάνουν $JBA > 10 \text{ mm}^2$.

Επίσης, το 2014, οι ερευνητές M. Salem, M. Bown, R. Sayers, K. West, et al. διεξήγαγαν έρευνα σχετικά με την επικύρωση για το αν μπορεί να είναι δυνατόν να προσδιοριστούν οι ασθενείς με υψηλότερη ή χαμηλότερη πιθανότητα ιστολογικά ασταθούς πλάκας με τη χρήση εύκολα προσβάσιμων εικόνων υπερήχων και λογισμικού ανάλυσης της πλάκας [124]. Σε ασθενείς με καρωτιδική στένωση ο κίνδυνος εγκεφαλικού επεισοδίου είναι υψηλότερος τις πρώτες μέρες μετά την έναρξη των συμπτωμάτων, ενώ είναι χαμηλότερος σε ασυμπτωματικούς ασθενείς. Κατά τους συγγραφείς ο εντοπισμός ασθενών με υψηλή (ή χαμηλή) πιθανότητα ύπαρξης ιστολογικά ασταθούς πλάκας θα μπορούσε να γίνει μια δωρεάν μέθοδος που θα βελτίωνε τις ενδείξεις για την χρησιμότητα χειρουργικής επέμβασης. Για το σκοπό αυτό δύο ιστοπαθολόγοι, με τη χρήση επικυρωμένων κριτηρίων από την American Heart Association, βαθμολόγησαν ανεξάρτητα αθηρωματικές πλάκες καρωτίδας που προέκυψαν κατόπιν ενδαρτηρεκτομής. Οι προεγχειρητικές εικόνες των υπερήχων εκτιμήθηκαν ανεξάρτητα για την εύρεση της μαύρης περιοχής κοντά στον αυλό (JBA), του τύπου της πλάκας, του εμβαδού της πλάκας, και του GSM, μετά την εξομάλυνση της εικόνας. Στη συνέχεια δημιουργήθηκε ένα μοντέλο για την πρόβλεψη ιστολογικά ασταθών και σταθερών πλακών. Συνολικά 126 ασθενείς συμπεριλήφθηκαν στη μελέτη. Με βάση την παρουσία και την έκταση της ιστοπαθολογικών χαρακτηριστικών, όπως αιμορραγίες, θρόμβοι, ινώδης ιστός, λιπώδεις πυρήνες και φλεγμονές, 39 πλάκες χαρακτηρίστηκαν ως σταθερές, ενώ 87 ως ασταθείς. Οι ασταθείς πλάκες συνδέονταν με εμβαδόν πλάκας $> 95 \text{ mm}^2$, $JBA > 6 \text{ mm}^2$ και $GSM < 25$. Από τα αποτελέσματα συμπεραίνεται ότι η υπολογιστική ανάλυση της πλάκας έχει τη δυνατότητα εντοπισμού ασθενών με ασταθή καρωτιδική πλάκα όπως προκύπτει από τα ιστοπαθολογικά ευρήματα. Αυτό το μοντέλο προσφέρει τη δυνατότητα να υποβοηθηθεί την απόφαση για επεμβατική αντιμετώπιση ή για συμβατική θεραπεία. Επιπροσθέτως τα ευρήματα αυτής της εργασίας έρχονται να προσδώσουν περισσότερη εγκυρότητα στην χρήση του δείκτη JBA ως σημαντικού εργαλείου στην αξιολόγηση της επικινδυνότητας αθηρωματικών πλακών.



Εικόνα 17: α) Παράδειγμα πλάκας με υψηλή τιμή JBA, β) Παράδειγμα πλάκας με χαμηλή τιμή JBA.

Πίνακας 2: Βιβλιογραφική ανασκόπηση για τον Δείκτη JBA.

H. Bassiotmy, Y. Sakaguchi, et al. 1997 [129]	Η εγγύτητα του νεκρωτικού πυρήνα της πλάκας με τον αυλό σχετίζεται με εμφάνιση ισχαιμικών επεισοδίων.
M. Griffin, E. Kyriacou, et al. 2010 [127]	Ο δείκτης JBA σχετίζεται με τη συμπτωματικότητα των ασθενών. Πρόταση κατωφλίου στα 8 mm ² .
S. Kakkos, M. Griffin, et al. 2013 [130]	Το μέγεθος του JBA σχετίζεται γραμμικά με τον κίνδυνο εγκεφαλικού επεισοδίου και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μοντέλα εκτίμησης του κινδύνου αυτού.
A. Naylor, T. Schroeder, et al. 2014 [131]	Οι παράμετροι που σχετίζονται με αυξημένο κίνδυνο εγκεφαλικού επεισοδίου περιλαμβάνουν JBA>10mm ² .
M. Salem, M. Bown, et al. 2014 [124]	Οι ασταθείς πλάκες συνδέονται με JBA> 6 mm ² .

Επειδή ο δείκτης JBA έχει προταθεί σχετικά πρόσφατα χρειάζεται περαιτέρω επαλήθευση σε περισσότερα σύνολα ασθενών. Επίσης ένας αυτοματοποιημένος τρόπος εύρεσης της περιοχής και υπολογισμού του εμβαδού του JBA, χωρίς την επέμβαση του ανθρώπινου παράγοντα, θα βοηθούσε σε μεγάλο βαθμό την καθημερινή ιατρική πρακτική.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ JBA

3.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται εκτενώς τα τρία σύνολα δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και η μεθοδολογία που υλοποιήθηκε για την αναζήτηση στατιστικής συσχέτισης του δείκτη JBA με άλλους δείκτες υφής και χαρακτηριστικών ενδιαφέροντος.

3.2 Σύνολα δεδομένων

Για την διεξαγωγή της διπλωματικής εργασίας δημιουργήθηκαν 3 σύνολα ασθενών:

Το πρώτο σύνολο αποτελείται από ασθενείς που παρακολουθούνταν στο Αγγειοχειρουργικό τμήμα του Γενικού Νοσοκομείου Αθηνών «Κοργιαλένειο-Μπενάκειο Ε.Ε.Σ», οι οποίοι υποβλήθηκαν σε εξέταση B-Mode υπερηχοτομογραφίας και ελαστογραφίας στο αγγειολογικό διαγνωστικό εργαστήριο «Ευρωιατρική Ψυχικού». Το σύνολο αυτό, το οποίο αριθμεί 18 ασθενείς (14 άντρες, 4 γυναίκες), με ηλικίες από 60 έως 86 έτη, μέσο όρο ηλικίας τα 70 έτη και τυπική απόκλιση 9 έτη, υποβλήθηκε σε τουλάχιστον μια εξέταση υπερηχογραφήματος B-mode στην περιοχή της καρωτίδας. Οι εξετάσεις πραγματοποιήθηκαν κατά τα έτη 2014 και 2015. Οι ασθενείς είχαν βαθμό στένωσης καρωτίδας από 62.5% έως 97%, με μέσο όρο στένωσης 78% και τυπική απόκλιση 11%. Όσον αφορά την εμφάνιση συμπτωμάτων, 12 ασθενείς δεν είχαν παρουσιάσει συμπτώματα που σχετίζονται με την αθηρωμάτωση, ενώ 6 είχαν παρουσιάσει.

Το δεύτερο σύνολο αποτελείται από ασθενείς που περιλαμβάνονται στην βάση δεδομένων του έργου με κωδικό 09ΣΥΝ-12-1054 και τίτλο «Η αθηρωματική πλάκα στην καρωτίδα: μία πολυ-επιστημονική προσέγγιση με στόχο τη βέλτιστη διαχείριση συμπτωματικών και ασυμπτωματικών ασθενών», υπαγόμενο στα επιχειρησιακά προγράμματα «ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΤΙΚΟΤΗΤΑ & ΕΠΙΧΕΙΡΗΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ», ΕΣΠΑ 2007-2013 [29]. Το σύνολο αριθμεί 82 ασθενείς (61 άντρες, 21 γυναίκες) με ηλικίες από 46 έως 88 έτη, με μέσο όρο ηλικίας τα 73 έτη και τυπική απόκλιση 9 έτη. Κάθε ασθενής υποβλήθηκε σε τουλάχιστον μια εξέταση υπερηχογραφήματος B-mode στην περιοχή της καρωτίδας. Οι εξετάσεις πραγματοποιήθηκαν στο αγγειοχειρουργικό τμήμα του Πανεπιστημιακού Γενικού Νοσοκομείου «ΑΤΤΙΚΟΝ» κατά τα έτη 2012 - 2015. Οι ασθενείς είχαν βαθμό στένωσης μεταξύ 20- 99%, με μέσο όρο στένωσης 72% και τυπική απόκλιση 20%. Όσον αφορά την εμφάνιση συμπτωμάτων 59 ασθενείς δεν είχαν παρουσιάσει συμπτώματα που σχετίζονται με την αθηρωμάτωση, ενώ 21 είχαν παρουσιάσει. Τέλος 70 ασθενείς υποβλήθηκαν σε επέμβαση αποκατάστασης της καρωτίδας, ενώ 12 δεν υποβλήθηκαν.

Το τρίτο σύνολο που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μελέτη αποτελείται από την ένωση των παραπάνω δύο συνόλων.

Η παρουσίαση των συνόλων σε συνοπτική μορφή φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 3: Συνοπτική παρουσίαση των 3 συνόλων.

Πρώτο Σύνολο	
Ασθενείς που παρακολουθούνταν στο Αγγειοχειρουργικό τμήμα του Γενικού Νοσοκομείου Αθηνών «Κοργιαλένιο - Μπενάκειο Ε.Ε.Σ»	
Έτη εξέτασης	2014, 2015
Αριθμός ασθενών	18 ασθενείς (14 άντρες, 4 γυναίκες)
Ηλικίες	60-86 έτη, μέσος όρος 70 έτη, τυπική απόκλιση 9 έτη
Βαθμός στένωσης	62.5% - 97%, μέσος όρος 78%, τυπική απόκλιση 11%
Εμφάνιση συμπτωμάτων	6 συμπτωματικοί, 12 ασυμπτωματικοί
Δεύτερο Σύνολο	
Ασθενείς που εξετάσθηκαν στο αγγειοχειρουργικό τμήμα του Πανεπιστημιακού Γενικού Νοσοκομείου «ΑΤΤΙΚΟΝ»	
Έτη εξέτασης	2012 – 2015
Αριθμός ασθενών	82 ασθενείς (61 άντρες, 21 γυναίκες)
Ηλικίες	46-88 έτη, μέσος όρος 73 έτη, τυπική απόκλιση 9 έτη
Βαθμός στένωσης	20% - 99%, μέσος όρος 72%, τυπική απόκλιση 20%
Εμφάνιση συμπτωμάτων	21 συμπτωματικοί, 59 ασυμπτωματικοί
Τρίτο Σύνολο	
Δημιουργήθηκε από την ένωση των συνόλων 1 και 2.	

Και για τα δύο σύνολα ασθενών, οι εξετάσεις πραγματοποιήθηκαν από εξειδικευμένους ιατρούς (ακτινολόγους και αγγειοχειρουργούς) με εμπειρία στη χρήση των υπερηχογράφων, στη διάγνωση της αθηρωματικής νόσου και στην επισήμανση των ορίων των αθηρωματικών πλακών. Επίσης, το πρωτόκολλο λήψης των υπερηχογραφημάτων ήταν πλήρως καθορισμένο και το ίδιο για όλους τους ασθενείς και των δύο συνόλων [28].

Το πρώτο σύνολο δεδομένων αποτελείται από αλληλουχίες εικόνων (βίντεο) υπερήχων Β - σάρωσης (104 βίντεο) που προέκυψαν από την εξέταση των ασθενών στο αγγειολογικό διαγνωστικό εργαστήριο «Ευρωιατρική Ψυχικού». Κάθε βίντεο περιέχει μία ή περισσότερες αθηρωματικές πλάκες. Κάθε πλάκα μπορεί να περιλαμβάνεται στο περιεχόμενο ενός ή περισσότερων βίντεο. Περιστατικό θεωρείται κάθε ξεχωριστή πλάκα ανεξάρτητα από τον αριθμό των βίντεο στα οποία περιλαμβάνεται. Σε αυτό το σύνολο υπάρχουν 25 διακριτά περιστατικά.

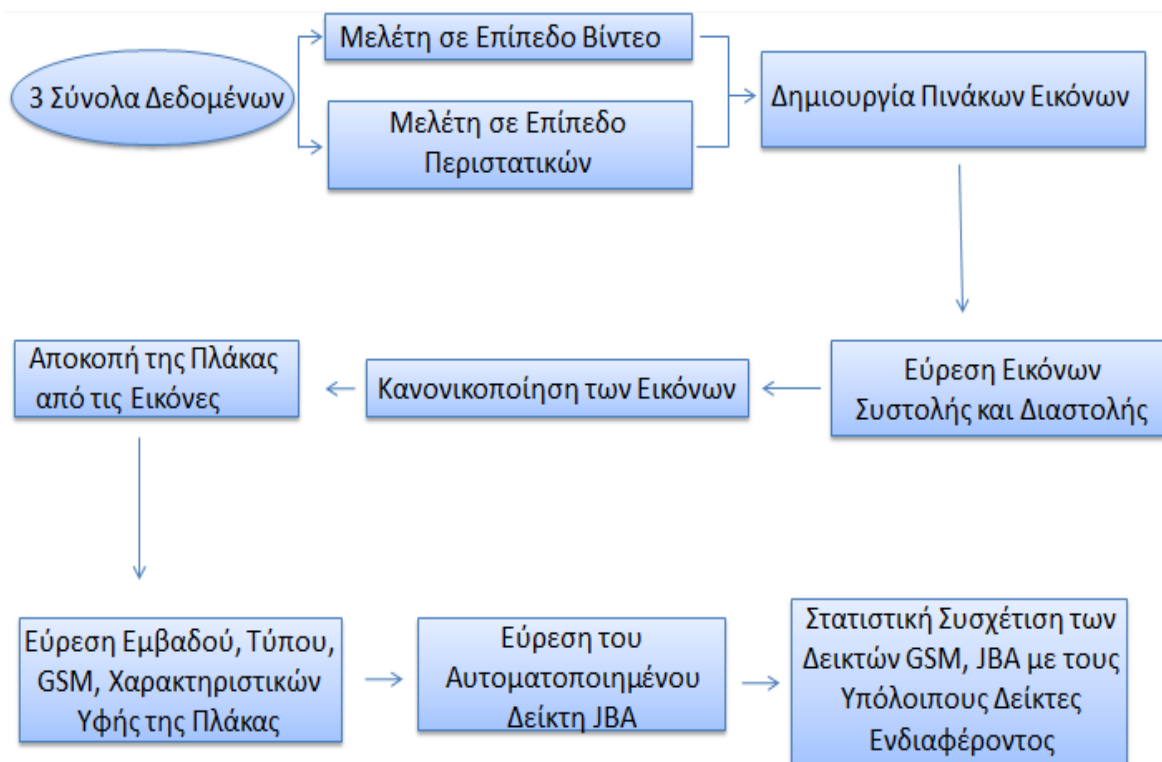
Το δεύτερο σύνολο δεδομένων αποτελείται από αλληλουχίες εικόνων (βίντεο) υπερήχων Β - σάρωσης (96 βίντεο) που προέκυψαν από την εξέταση των ασθενών που περιλαμβάνονται στην βάση δεδομένων του έργου «Η αθηρωματική πλάκα στην καρωτίδα: μία πολυ-επιστημονική

προσέγγιση με στόχο τη βέλτιστη διαχείριση συμπτωματικών και ασυμπτωματικών ασθενών». Κάθε βίντεο περιέχει μία ή περισσότερες αθηρωματικές πλάκες. Κάθε πλάκα μπορεί να περιλαμβάνεται στο περιεχόμενο ενός ή περισσότερων βίντεο. Περιστατικό θεωρείται κάθε ξεχωριστή πλάκα ανεξάρτητα από τον αριθμό των βίντεο στα οποία περιλαμβάνεται. Σε αυτό το σύνολο υπάρχουν 154 διακριτά περιστατικά.

Τα βίντεο ήταν σε μορφή DICOM. Το συγκεκριμένο πρότυπο εκτός από το βίντεο για κάθε εξέταση εμπεριέχει και αρκετά μεταδεδομένα (metadata) τα οποία παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες για την διαδικασία λήψης, κωδικοποίησης και αναπαραγωγής των βίντεο.

3.3 Γενική μεθοδολογία

Αρχικά τα δεδομένα των συνόλων υφίστανται κατηγοριοποίηση σε επίπεδο βίντεο και περιστατικών. Κατόπιν, τα διαθέσιμα αρχεία DICOM μετατρέπονται σε πίνακες εικόνων. Έπειτα με την χρήση αλγορίθμου ανάλυσης κίνησης εξάγονται οι εικόνες συστολής και διαστολής κάθε πίνακα εικόνων. Από τις εικόνες αυτές αποκόπτεται η περιοχή της πλάκας. Στην περιοχή της πλάκας υπολογίζονται οι δείκτες ενδιαφέροντος (το εμβαδόν της πλάκας, ο τύπος της πλάκας και οι δείκτες υφής της). Τέλος, υπολογίζεται ο δείκτης JBA με αυτοματοποιημένο αλγόριθμο για κάθε πλάκα και διερευνάται η συσχέτισή του με τους υπόλοιπους δείκτες ενδιαφέροντος. Η παραπάνω μεθοδολογία φαίνεται στην **Εικόνα 18**.



Εικόνα 18: Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στην παρούσα εργασία

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε στην επεξεργασία του δεύτερου συνόλου ήταν όμοια με του πρώτου, με κάποιες μετατροπές, ώστε τα προγράμματα να

συμφωνούν με τον διαφορετικό αριθμό περιστατικών και βίντεο, αλλά και με τον διαφορετικό τρόπο ονοματοποίησης των δεδομένων σε σχέση με αυτών του πρώτου συνόλου.

Τέλος, η διαδικασία που ακολουθήθηκε στην επεξεργασία του τρίτου συνόλου ήταν όμοια με των υπολοίπων συνόλων, με απαραίτητες μικρές τροποποιήσεις όπου χρειαζόταν.

Για την επεξεργασία των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Matlab (© 1994-2016 The MathWorks, Inc).

3.4 Δημιουργία πινάκα εικόνων

Αρχικά διαβάζεται κάθε αρχείο DICOM. Έπειτα αποφασίζεται ποια θα είναι η πρώτη και η τελευταία εικόνα του βίντεο, ώστε αυτές και οι ενδιάμεσες τους να είναι έτοιμες για επεξεργασία. Η επιλογή αυτών των εικόνων πρέπει να γίνει έτσι ώστε να μην περιέχουν παράσιτα και θόρυβο, τα οποία θα δημιουργούσαν εικόνες ακατάλληλες για ψηφιακή επεξεργασία. Έπειτα στην πρώτη εικόνα σχεδιάζονται οι περιοχές ενδιαφέροντος της πλάκας, οι οποίες είναι τα σύνορα της πλάκας με τον αυλό, τα σύνορα της πλάκας με το τοίχωμα της αρτηρίας, τα σύνορα ολόκληρης της πλάκας, τα σύνορα του άνω υγιούς τοιχώματος της αρτηρίας με τον αυλό και τα σύνορα του κάτω υγιούς τοιχώματος της αρτηρίας με τον αυλό, όπως αυτά τα όρια έχουν καθοριστεί από τον εξειδικευμένο ιατρό. Τα σύνορα της πλάκας είχαν σχεδιαστεί σε εικόνα που προέκυψε από ελαστογραφία του κάθε ασθενούς από ιατρό και επιχειρήθηκε η όσο πιο ακριβής αναπαράστασή τους. Επίσης επιλέγεται μια περιοχή του αυλού που περιέχει τη μικρότερη τιμή έντασης της φωτεινότητας (η οποία αναπαριστά το αίμα που ρέει στον αυλό) και μια περιοχή που περιέχει την μεγαλύτερη τιμή έντασης της φωτεινότητας (η οποία αναπαριστά τον ιστό της αρτηρίας, adventitia). Οι αριθμοί της πρώτης και της τελευταίας επιλεγείσας εικόνας, οι συντεταγμένες των περιοχών ενδιαφέροντος και οι τιμές φωτεινότητας αίματος και ιστού αποθηκεύονται για περεταίρω επεξεργασία.

Για τα επόμενα βήματα χρειάζεται η διακριτική ικανότητα της οριζόντιας και κατακόρυφης κατεύθυνσης κάθε εικόνας βίντεο. Οι πληροφορίες αυτές ελήφθησαν από τα metadata κάθε DICOM αρχείου. Οι τιμές της διακριτικής ικανότητας οριζόντιας και κατακόρυφης κατεύθυνσης μετατράπηκαν από εκατοστά σε χιλιοστά.

3.5 Εύρεση εικόνων συστολής - διαστολής

Στην ανάλυση των βίντεο υπερήχων υπάρχει ενδιαφέρον να παρατηρηθούν οι τιμές των δεικτών των αθηρωματικών πλακών ξεχωριστά για εικόνες συστολών και διαστολών της καρδιάς. Η διδάκτωρ του Ε.Μ.Π. Αιμιλία Γαστουνιώτη στην Διδακτορική της διατριβή [28] δημιούργησε αλγόριθμο που υπολογίζει πληθώρα μηχανικών δεικτών που αφορούν την κίνηση αθηρωματικών πλακών για εικόνες συστολής και διαστολής ξεχωριστά. Αρχικά το έγχρωμο DICOM αρχείο βίντεο μετατρέπεται σε τρισδιάστατο

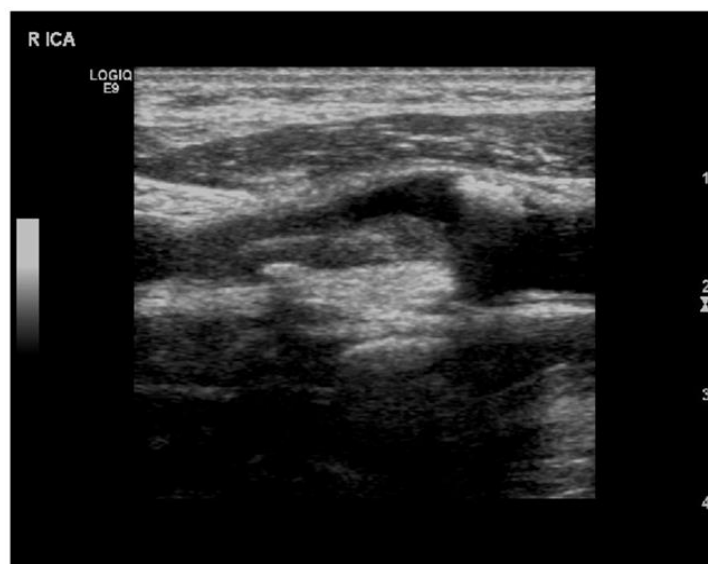
πίνακα φωτεινότητας γκριζας κλίμακας. Με τον τρισδιάστατο πίνακα που προέκυψε και με τις αντίστοιχες τιμές των περιοχών ενδιαφέροντος, αφού κανονικοποιηθούν οι εικόνες του τρισδιάστατου πίνακα ως προς τις αντίστοιχες τιμές φωτεινότητας αίματος και ιστού, υπολογίζονται οι διαμήκεις και αξονικές μετατοπίσεις των περιοχών ενδιαφέροντος. Με την χρήση των ακτινικών μετατοπίσεων των περιοχών ενδιαφέροντος που προέκυψαν υπολογίζονται οι αριθμοί των εικόνων για τα οποία συμβαίνει πλήρης συστολή και διαστολή. Οι αριθμοί αυτοί αποθηκεύονται για συστολές και διαστολές ξεχωριστά.

3.6 Κανονικοποίηση εικόνων

Στόχος είναι να δημιουργηθεί ένας πίνακας που να περιέχει όλους τους δείκτες ενδιαφέροντος για κάθε βίντεο υπερήχων, τόσο για τις εικόνες συστολής, όσο και για διαστολής.

Αρχικά, διαβάζεται το αρχείο DICOM που περιέχει το επιθυμητό βίντεο υπερήχου. Έπειτα επιλέγονται οι εικόνες συστολής και διαστολής, που περιέχονται στο βίντεο και δημιουργείται τρισδιάστατος πίνακας με αυτές τις εικόνες σε γκριζα κλίμακα. Σε αυτόν τον πίνακα πραγματοποιείται κανονικοποίηση των εικόνων ως προς τις αντίστοιχες τιμές έντασης του αίματος και του ιστού που είχαν εξαχθεί αρχικά από το αρχείο DICOM (η κανονικοποιημένη εικόνα φαίνεται στην **Εικόνα 19**).

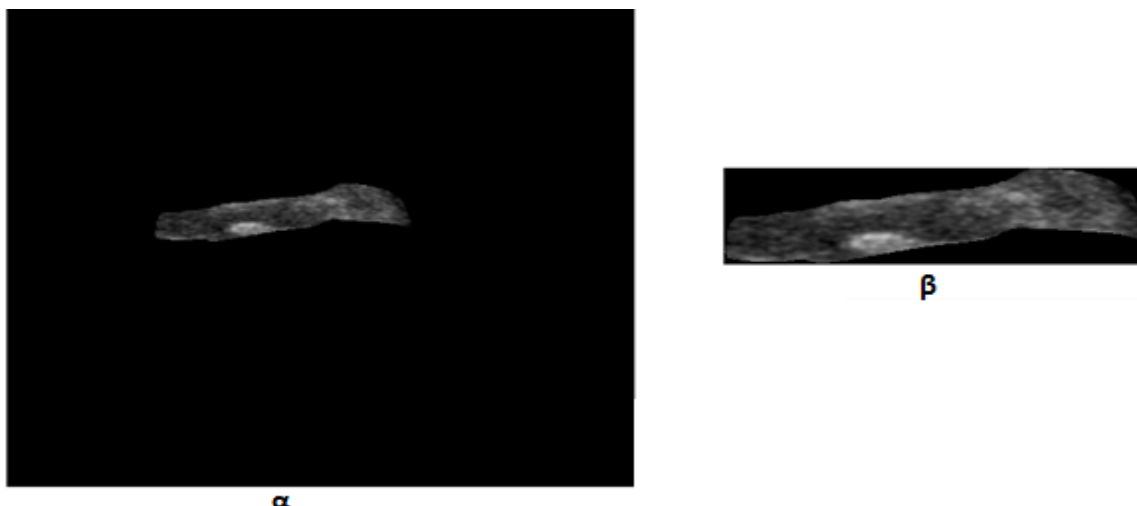
Στο δεύτερο σύνολο ασθενών οι πίνακες περιοχών ενδιαφέροντος της πλάκας, καθώς και οι αναλύσεις και οι τιμές που χρειάζονται για την κανονικοποίηση των εικόνων είχαν ήδη υπολογισθεί από τη Δρ. Αιμιλία Γαστουγιώτη στην διδακτορική της διατριβή [28]



Εικόνα 19: Εικόνα που προέκυψε μετά από κανονικοποίηση.

3.7 Αποκοπή της πλάκας από την εικόνα

Από κάθε εικόνα επιλέγεται η περιοχή που αντιπροσωπεύει την αθηρωματική πλάκα και όλα τα εικονοστοιχεία που δεν ανήκουν σε αυτήν παίρνουν την ελάχιστη τιμή φωτεινότητας. Η εικόνα της πλάκας που προκύπτει μετά από την αποκοπή φαίνεται στην **Εικόνα 20**).



Εικόνα 20: α) Περιοχή της αθηρωματικής πλάκας μετά την αποκοπή
β) Περιοχή της αθηρωματικής πλάκας μετά την αποκοπή σε μεγέθυνση.

3.8 Εύρεση του εμβαδού της πλάκας

Για κάθε εικόνα που περιέχει μόνο την αθηρωματική πλάκα υπολογίζεται το εμβαδόν της Αρχικά αθροίζονται όλα τα εικονοστοιχεία που ανήκουν στην πλάκα και πολλαπλασιάζεται το άθροισμα αυτό με το στοιχειώδες εμβαδόν εικονοστοιχείου που προκύπτει από το γινόμενο του στοιχειώδους οριζοντίου και κατακόρυφου μήκους του. Η μονάδα μέτρησης του εμβαδού είναι mm^2 .

3.9 Εύρεση του τύπου της πλάκας

Επίσης για κάθε εικόνα που περιέχει μόνο την αθηρωματική πλάκα υπολογίζεται ο τύπος της. Αρχικά υπολογίζεται ο συνολικός αριθμός των εικονοστοιχείων της πλάκας και το πλήθος των εικονοστοιχείων της πλάκας που έχουν ένταση φωτεινότητας μεγαλύτερη του 25. Ανάλογα με την τιμή του λόγου αυτών των δυο αριθμών προκύπτει ο τύπος της πλάκας σύμφωνα με τον αλγόριθμο που αναλύθηκε στο εδάφιο 2.5 [124].

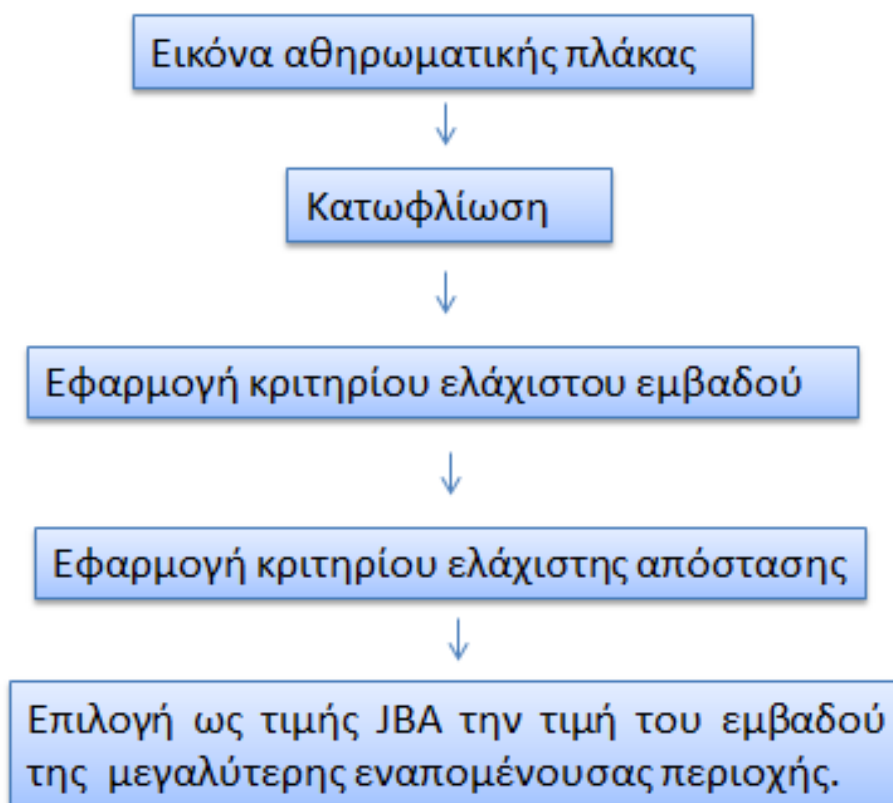
3.10 Εύρεση των χαρακτηριστικών υφής της πλάκας

Για κάθε εικόνα που περιέχει την αθηρωματική πλάκα υπολογίζονται οι δείκτες υφής. Αρχικά υπολογίζονται τα στατιστικά μεγέθη της αντίθεσης, της συσχέτισης, της ενέργειας και της ομοιογένειας για διευθύνσεις 0, 45, 90 και 135° με χρήση του πίνακα συνύπαρξης. Επιπλέον υπολογίζεται το

ενδιάμεσο επίπεδο φωτεινότητας γκριζας κλίμακας (Grey Scale Median - GSM).

3.11 Εύρεση του JBA της πλάκας

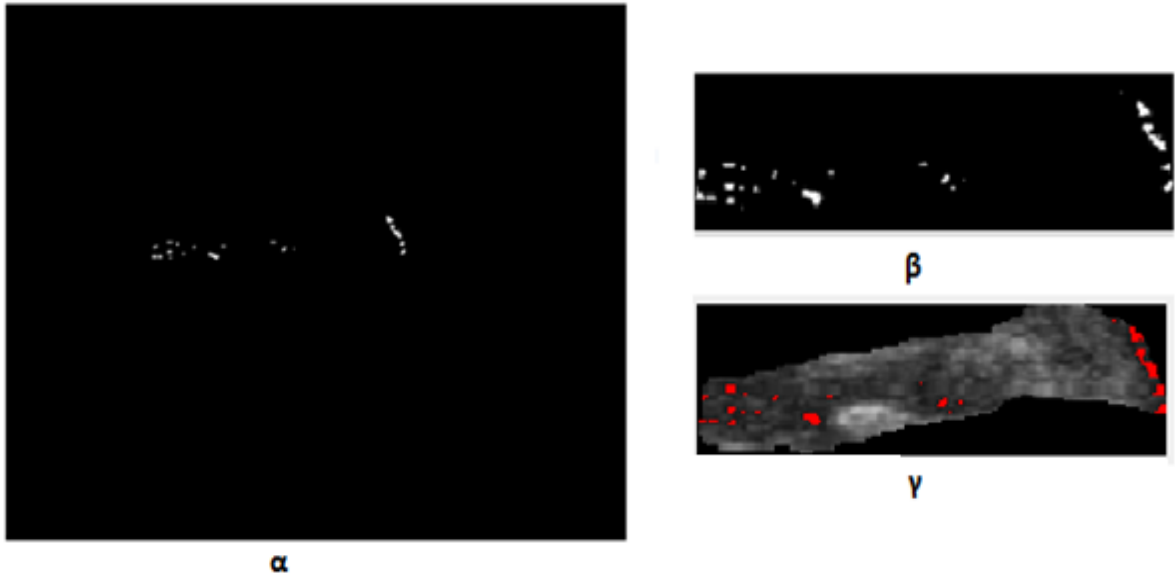
Για την εύρεση του εμβαδού της μη ηχογενούς περιοχής κοντά στον αυλό JBA υλοποιήθηκε αυτοματοποιημένος αλγόριθμος εύρεσης του συγκεκριμένου δείκτη. Για την εύρεση του δείκτη χρειάζονται η εικόνα της αθηρωματικής πλάκας, το εμβαδόν του στοιχειώδους εικονοστοιχείου της εικόνας σε mm^2 και η στοιχειώδης ακτινική και διαμήκης απόσταση της εικόνας σε mm. Τα βήματα του αλγορίθμου φαίνονται στην **Εικόνα 21**.



Εικόνα 21: Βήματα αυτοματοποιημένου αλγορίθμου εύρεσης του δείκτη JBA.

Κατωφλίωση

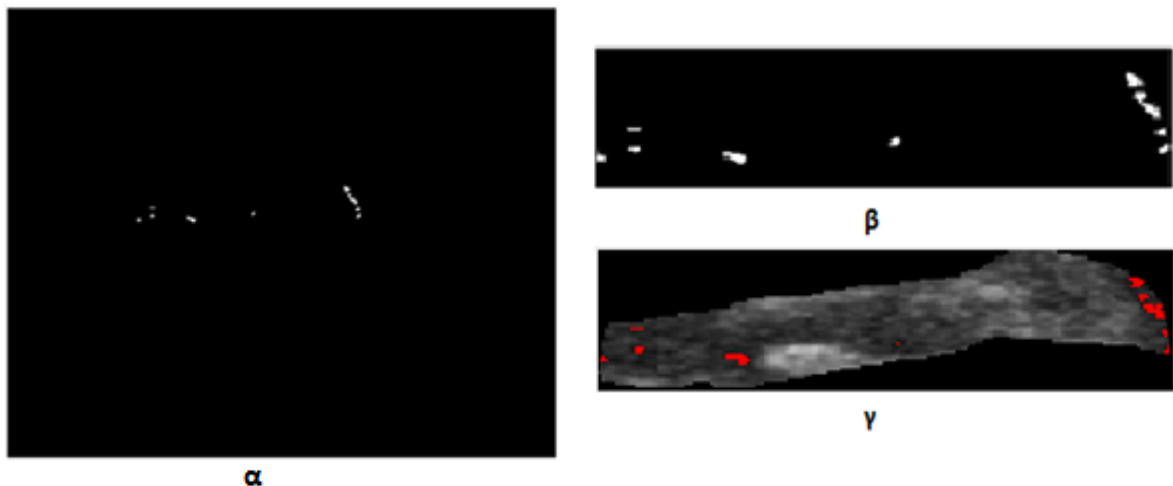
Αρχικά ορίζεται ως τιμή κατωφλίου η τιμή έντασης 25, όπως προτείνεται στη βιβλιογραφία [50], [124]. Με σκοπό να δημιουργηθεί μια δυαδική εικόνα τα εικονοστοιχεία που έχουν τιμή έντασης μεγαλύτερη του 25 παίρνουν την ελάχιστη τιμή φωτεινότητας (μαύρο) και τα υπόλοιπα εικονοστοιχεία παίρνουν την μέγιστη τιμή φωτεινότητας (λευκό). Η πλάκα μετά την κατωφλίωση φαίνεται στην **Εικόνα 22**).



Εικόνα 22: α) Περιοχή της αθηρωματικής πλάκας μετά την κατωφλίωση.
 β) Περιοχή αθηρωματικής πλάκας μετά την κατωφλίωση και σε μεγέθυνση.
 γ) Εντοπισμός περιοχών ενδιαφέροντος στην αρχική πλάκα.

Κριτήριο ελάχιστου εμβαδού

Κατόπιν στην δισδιάστατη εικόνα απορρίπτονται οι λευκές περιοχές που αποτελούνται από αριθμό εικονοστοιχείων μικρότερο των 16, όπως προτείνεται στην πατέντα των **A. Nicolaidis et al.** [132]. Η τιμή αυτή φαίνεται πως ποιοτικά είναι ικανοποιητική για την μείωση των περιοχών ενδιαφέροντος χωρίς να υπάρχει κίνδυνος να αγνοηθεί κάποια σημαντική περιοχή. Η εικόνα που προκύπτει εφαρμόζοντας το κριτήριο εμβαδού φαίνεται στην **Εικόνα 23**.

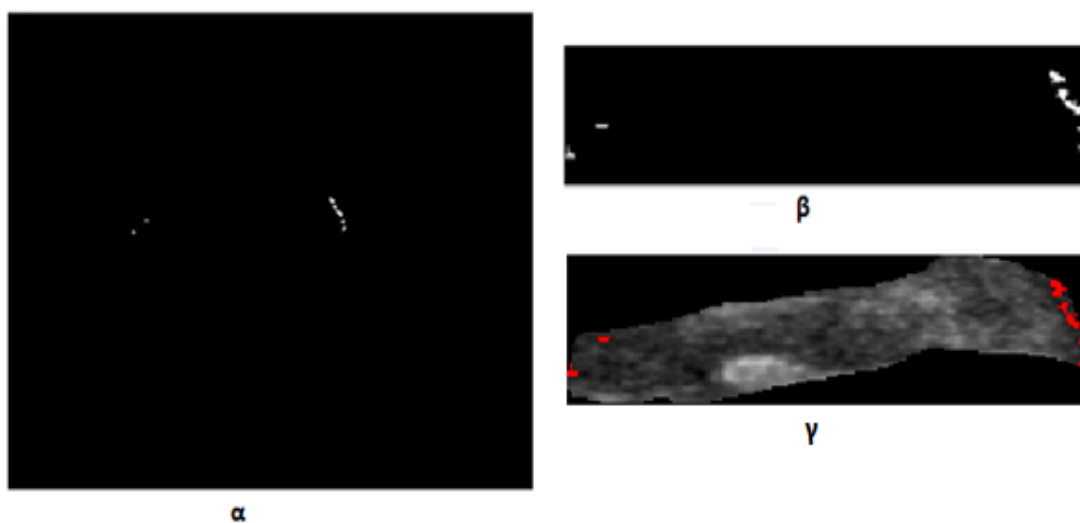


Εικόνα 23: α) Περιοχή αθηρωματικής πλάκας μετά την εφαρμογή του κριτηρίου εμβαδού.
 β) Περιοχή της αθηρωματικής πλάκας μετά την εφαρμογή του κριτηρίου εμβαδού σε μεγέθυνση.
 γ) Εντοπισμός περιοχών ενδιαφέροντος στην αρχική πλάκα μετά την εφαρμογή του κριτηρίου εμβαδού.

Για κάθε εναπομένουσα περιοχή υπολογίζεται ο αριθμός των εικονοστοιχείων που την αποτελούν και οι χωρικές συντεταγμένες της.

Κριτήριο ελάχιστης απόστασης

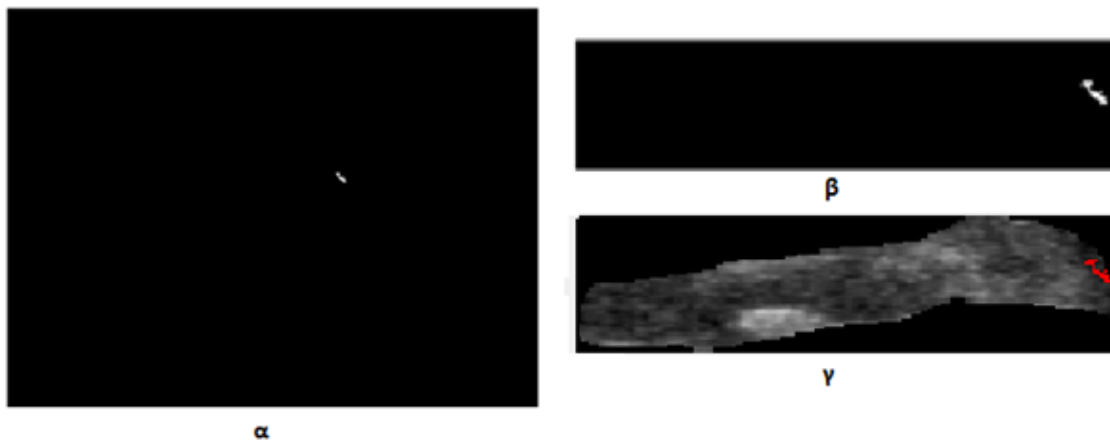
Στη συνέχεια υπολογίζονται οι αποστάσεις μεταξύ των εικονοστοιχείων κάθε περιοχής ενδιαφέροντος και των συντεταγμένων των εικονοστοιχείων της συνοριακής περιοχής μεταξύ πλάκας και αυλού. Από τις προκύπτουσες αποστάσεις αν η ελάχιστη απόσταση της κάθε περιοχής είναι μικρότερη των 0.6 mm τότε η περιοχή ικανοποιεί το κριτήριο απόστασης. Επειδή δεν έχει προταθεί κάποιο ποσοτικό κριτήριο μέγιστης απόστασης από τον αυλό για να θεωρηθεί μια περιοχή JBA ως έγκυρη τα 0.6 mm παρατηρήθηκαν σε αυξημένο αριθμό πλακών να προσδιορίζουν αρκετά ικανοποιητικά την αίσθηση του κατωφλίου της εγγύτητας. Η εικόνα που προκύπτει εφαρμόζοντας το κριτήριο ελάχιστης απόστασης φαίνεται στην **Εικόνα 24**.



- Εικόνα 24:** α) Περιοχή αθηρωματικής πλάκας μετά την εφαρμογή του κριτηρίου ελάχιστης απόστασης.
β) Περιοχή αθηρωματικής πλάκας μετά την εφαρμογή του κριτηρίου ελάχιστης απόστασης σε μεγέθυνση.
γ) Εντοπισμός περιοχών ενδιαφέροντος στην αρχική πλάκα μετά την εφαρμογή του κριτηρίου ελάχιστης απόστασης.

Αυτοματοποιημένος προσδιορισμός δείκτη JBA

Από τις εναπομένουσες περιοχές υπολογίζεται το εμβαδόν τους σε mm² και επιλέγεται ως εμβαδόν του JBA το μέγιστο εμβαδόν. Αν δεν υπάρχουν τέτοιες περιοχές το εμβαδόν του JBA είναι 0. Η τελική περιοχή που αντιπροσωπεύει το JBA φαίνεται στην **Εικόνα 25**.



Εικόνα 25: α) Τελική περιοχή JBA.
 β) Τελική περιοχή JBA σε μεγέθυνση.
 γ) Εντοπισμός της περιοχής JBA στην αρχική πλάκα

Τα χαρακτηριστικά υφής, το εμβαδόν της πλάκας, ο τύπος της πλάκας και το JBA που υπολογίστηκαν, καθώς και ο βαθμός στένωσης και η πληροφορία αν ο ασθενής έχει παρουσιάσει σύμπτωμα αποθηκεύονται.

3.12 Εύρεση στατιστικής συσχέτισης μεταξύ των χαρακτηριστικών της πλάκας

Σκοπός του συγκεκριμένου βήματος είναι να αναζητηθούν πιθανές στατιστικά σημαντικές συσχετίσεις μεταξύ των JBA και GSM με τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά της κάθε πλάκας.

Αρχικά, για κάθε βίντεο, το οποίο περιέχει περισσότερες από μία εικόνες συστολής και διαστολής αντίστοιχα, υπολογίζεται ο μέσος όρος των χαρακτηριστικών των εικόνων και οι εν λόγω μέσοι όροι αποτελούν τα χαρακτηριστικά των πλακών σε επίπεδο βίντεο.

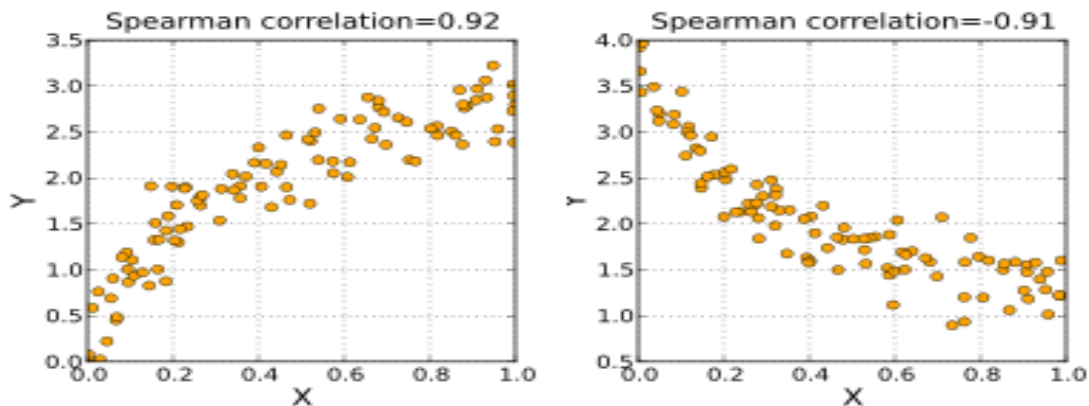
Επίσης, εκτός από τα χαρακτηριστικά σε επίπεδο βίντεο υπολογίζονται και τα χαρακτηριστικά σε επίπεδο περιστατικών τα οποία προκύπτουν από τον μέσο όρο των χαρακτηριστικών σε επίπεδο βίντεο που αφορούν το ίδιο περιστατικό.

Η συσχέτιση μεταξύ των χαρακτηριστικών ενδιαφέροντος και των δεικτών JBA και GSM εξετάσθηκε με τον υπολογισμό του συντελεστή συσχέτισης Spearman, rho, σε επίπεδο βίντεο και περιστατικών.

Στην στατιστική, ο συντελεστής συσχέτισης Spearman, rho, είναι ένας μη παραμετρικός δείκτης του βαθμού συσχέτισης, δηλαδή της στατιστικής εξάρτησης μεταξύ δύο μεταβλητών. Ο συντελεστής συσχέτισης Spearman αξιολογεί το πόσο καλά μπορεί η σχέση μεταξύ των δύο μεταβλητών να περιγραφεί χρησιμοποιώντας μια μονότονη συνάρτηση.

Η συσχέτιση Spearman μεταξύ δύο μεταβλητών είναι ίση με την συσχέτιση Pearson μεταξύ των τιμών της κατάταξης των δύο αυτών μεταβλητών από την μικρότερη στην μεγαλύτερη, όπως αυτές παρατηρούνται στο σύνολο του

δείγματος. Ενώ η συσχέτιση Pearson αξιολογεί την γραμμικότητα μιας σχέσης, η συσχέτιση Spearman αξιολογεί την μονοτονία μιας σχέσης (είτε είναι γραμμική, είτε όχι). Αν δεν υπάρχουν επαναλαμβανόμενες τιμές των δεδομένων, μια τέλεια συσχέτιση Spearman παίρνει τιμές +1 ή -1 και συμβαίνει όταν κάθε μία από τις μεταβλητές είναι μια τέλεια μονότονη συνάρτηση της άλλης. Παραδείγματα μεταβλητών με μονότονη συσχέτιση φαίνονται στην **Εικόνα 26**[133] .



Εικόνα 26: Παραδείγματα μεταβλητών με μονότονη συσχέτιση και οι αντίστοιχοι συντελεστές συσχέτισης rho.

Διαισθητικά, η συσχέτιση Spearman μεταξύ δύο μεταβλητών θα είναι υψηλή όταν οι παρατηρήσεις έχουν παρόμοια κατάταξη (δηλαδή την σχετική θέση των παρατηρήσεων εντός της μεταβλητής: 1η, 2η, 3η, κλπ.) μεταξύ τους, και χαμηλή όταν οι παρατηρήσεις έχουν ανόμοια κατάταξη. Ο συντελεστής Spearman είναι κατάλληλος για συνεχείς και διακριτές μεταβλητές [134], [135].

Για ένα δείγμα μεγέθους n, οι τιμές των μεταβλητών X_i, Y_i μετατρέπονται σε αριθμούς κατάταξης rgX, rgY . Ο συντελεστής συσχέτισης Spearman υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\rho = \frac{\text{cov}(rgX_i, rgY_i)}{\sigma_{rgX} \sigma_{rgY}} \quad (21)$$

όπου $\text{cov}(rgX_i, rgY_i)$ είναι η συνδιακύμανση των rgX_i, rgY_i και ορίζεται ως:

$$\text{cov}(rgX_i, rgY_i) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(rgX_i - rg\bar{X})(rgY_i - rg\bar{Y})] \quad (22)$$

Εάν όλες οι τιμές κατάταξης είναι ακέραιοι αριθμοί ο συντελεστής συσχέτισης Spearman μπορεί να υπολογιστεί επίσης από τον παρακάτω τύπο:

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n (rgX_i - rgY_i)}{n(n^2 - 1)} \quad (23)$$

Η στατιστική σημαντικότητα των αποτελεσμάτων εκτιμήθηκε με δοκιμές μετάθεσης, οι οποίες είναι κατάλληλες για μικρό μέγεθος δείγματος. Τιμές p παρήχθησαν για τον έλεγχο της υπόθεσης της μη συσχέτισης έναντι της εναλλακτικής, ότι υπάρχει μη μηδενική συσχέτιση.

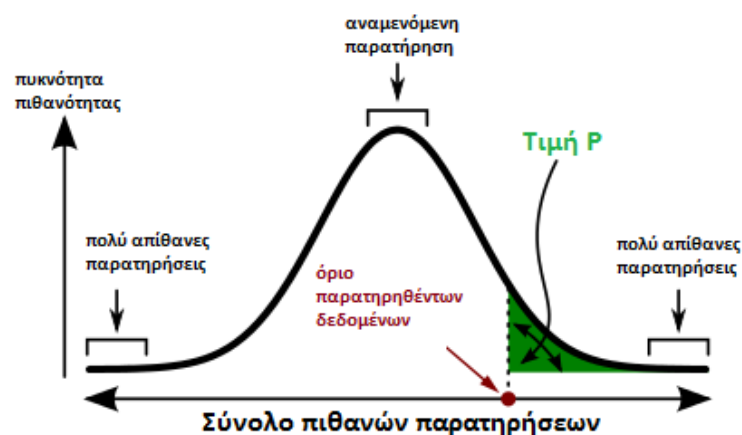
Στην στατιστική, η τιμή p είναι η συνάρτηση των παρατηρούμενων αποτελεσμάτων του δείγματος (που θεωρούνται ως ένα στατιστικό τεστ) σε σχέση με ένα στατιστικό μοντέλο και μετρά πόσο «ακραία» είναι μια παρατήρηση [136]. Συγκεκριμένα, η τιμή p ορίζεται ως η πιθανότητα παρατήρησης ενός αποτελέσματος ίσου ή «πιο ακραίου» από ό, τι έχει παρατηρηθεί, όταν η μηδενική υπόθεση είναι αληθής [137].

Η τιμή p χρησιμοποιείται ευρέως για τον έλεγχο στατιστικών υποθέσεων και ειδικότερα για τον έλεγχο μηδενικών υποθέσεων. Σε αυτή τη μέθοδο, ως μέρος του πειραματικού σχεδιασμού, πριν από την εκτέλεση του πειράματος, πρώτα επιλέγεται ένα μοντέλο (η μηδενική υπόθεση) και μία τιμή κατωφλίου για το ρ , το οποίο ονομάζεται επίπεδο σημαντικότητας του τεστ (συνήθως 5% ή 1%) [138]. Εάν η τιμή p είναι μικρότερη ή ίση από το επιλεχθέν επίπεδο σημαντικότητας, ο έλεγχος δείχνει ότι τα παρατηρούμενα δεδομένα είναι ασυμβίβαστα με την μηδενική υπόθεση και η μηδενική υπόθεση πρέπει να απορριφθεί. Ωστόσο, αυτό δεν αποδεικνύει ότι η υπό έλεγχο υπόθεση είναι αληθής. Για παράδειγμα, αν η μηδενική υπόθεση θεωρείται ότι είναι μια τυπική κανονική κατανομή, η απόρριψη της μηδενικής υπόθεσης μπορεί να σημαίνει ότι ο μέσος όρος δεν είναι μηδέν, ή ότι η διακύμανση δεν είναι μονάδα, ή ότι η κατανομή δεν είναι κανονική. Σε αυτήν τη μελέτη, οι στατιστικά σημαντικές συσχετίσεις μεταξύ των χαρακτηριστικών ενδιαφέροντος και των δεικτών JBA και GSM έχουν τιμή $p \leq 0.05$ [139].

Στην στατιστική, μια υπόθεση αναφέρεται σε μια κατανομή πιθανοτήτων που υποτίθεται ότι αντιπροσωπεύει τα παρατηρούμενα δεδομένα. Αν X είναι μια τυχαία μεταβλητή που αντιπροσωπεύει τα παρατηρούμενα δεδομένα και H είναι η στατιστική υπόθεση υπό εξέταση, τότε η έννοια της στατιστικής σημαντικότητας μπορεί να ποσοτικοποιηθεί από την δεσμευμένη πιθανότητα $\Pr(X|H)$, η οποία δίνει την πιθανότητα της παρατήρησης, εάν η υπόθεση θεωρηθεί αληθής. Ωστόσο, αν X είναι μια συνεχής τυχαία μεταβλητή και μια τιμή x παρατηρηθεί, τότε χρησιμοποιείται η δεσμευμένη πιθανότητα $\Pr(X=x|H) = 0$. Με την προϋπόθεση ότι οι τιμές των παρατηρήσεων μπορούν να πάρουν κάθε τιμή στον πραγματικό άξονα η τιμή p ορίζεται ως [140]:

$$p = \min[\Pr(X \leq x|H), \Pr(X \geq x|H)] \quad (24)$$

Παράδειγμα εύρεσης της τιμής p σε κατανομή πιθανοτήτων φαίνεται στην **Εικόνα 27** [141].



Εικόνα 27: Παράδειγμα εύρεσης της τιμής p σε κατανομή πιθανοτήτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

4.1 Συσχέτιση των JBA, GSM με τους υπόλοιπους δείκτες ενδιαφέροντος

Στη συνέχεια παρατίθενται τα αποτελέσματα της διαδικασίας που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 3.

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3, η συσχέτιση μεταξύ των χαρακτηριστικών ενδιαφέροντος και των δεικτών JBA και GSM εξετάστηκε με τον υπολογισμό του συντελεστή συσχέτισης Spearman, rho, σε επίπεδο βίντεο και περιστατικών. Ο συντελεστής συσχέτισης rho είναι η μη παραμετρική εναλλακτική της συσχέτισης Pearson και αξιολογεί πόσο καλά μπορεί να περιγραφεί η σχέση μεταξύ των μεταβλητών χρησιμοποιώντας μια μονότονη συνάρτηση, χωρίς να υποθέτει την ομαλότητα των δεδομένων ή την γραμμική τους σχέση. Ο συντελεστής συσχέτισης rho μπορεί να πάρει τιμές από 1 έως -1, με το 1 να δείχνει μια τέλεια θετική συσχέτιση, το 0 να δείχνει ότι δεν υπάρχει συσχέτιση, και το -1 δείχνει μια τέλεια αρνητική συσχέτιση.

Η στατιστική σημαντικότητα των αποτελεσμάτων εκτιμήθηκε με δοκιμές μετάθεσης, οι οποίες είναι κατάλληλες για μικρό μέγεθος δείγματος. Τιμές p παρήχθησαν για τον έλεγχο της υπόθεσης της μη συσχέτισης έναντι της εναλλακτικής, ότι υπάρχει μη μηδενική συσχέτιση. Η τιμή p ορίζεται ως η πιθανότητα, υπό την παραδοχή μιας υπόθεσης (H), ύπαρξης αποτελέσματος ίσου ή πιο ακραίου από τα αποτελέσματα που πραγματοποιήθηκαν. Σε αυτή τη μελέτη, οι στατιστικά σημαντικές συσχετίσεις μεταξύ των χαρακτηριστικών ενδιαφέροντος και των δεικτών JBA και GSM έχουν τιμή $p \leq 0.05$ [133].

Για όλα τα σύνολα των ασθενών τα αποτελέσματα της συσχέτισης των χαρακτηριστικών της πλάκας με τους δείκτες JBA και GSM σε επίπεδο περιστατικών και βίντεο για τις εικόνες συστολής και διαστολής αποτυπώνονται στους πίνακες 4-9.

Με πράσινο χρώμα αποδίδονται οι τιμές των συσχετίσεων για τις οποίες η τιμή p είναι μικρότερη του 0.05, ώστε οι αντίστοιχες τιμές του συντελεστή συσχέτισης rho να θεωρούνται στατιστικά σημαντικές για τη συσχέτιση των δυο πληθυσμών των εκάστοτε εξεταζόμενων δεικτών.

Με κόκκινο χρώμα αποδίδονται οι τιμές των συσχετίσεων για τις οποίες η τιμή p είναι μεγαλύτερη του 0.05, έτσι ώστε οι αντίστοιχες τιμές του συντελεστή συσχέτισης rho να μη θεωρούνται στατιστικά σημαντικές για την συσχέτιση των δυο πληθυσμών από τους οποίους προέρχονται τα εξεταζόμενα δείγματα.

Πίνακας 4: Συσχέτιση των χαρακτηριστικών της πλάκας με τους δείκτες JBA και GSM σε επίπεδο περιστατικών και βίντεο για τις εικόνες συστολής (Σύνολο 1).

Χαρακτηριστικά πλάκων	Με το GSM σε επίπεδο βίντεο	Με το GSM σε επίπεδο περιστατικών	Με το JBA σε επίπεδο βίντεο	Με το JBA σε επίπεδο περιστατικών
Αντίθεση 0	τιμή rho 0,39	τιμή p 0,00004	τιμή rho 0,37	τιμή p 0,06815
Αντίθεση 45	0,37	0,00009	0,38	0,06374
Αντίθεση 90	0,36	0,00015	0,36	0,08041
Αντίθεση 135	0,38	0,00008	0,37	0,07052
Συσχέτιση 0	0,26	0,00884	0,15	0,46018
Συσχέτιση 45	0,30	0,00235	0,19	0,37390
Συσχέτιση 90	0,28	0,00438	0,19	0,35931
Συσχέτιση 135	0,25	0,01019	0,18	0,39050
Ενέργεια 0	0,24	0,01362	-0,20	0,33450
Ενέργεια 45	0,32	0,00105	-0,09	0,67943
Ενέργεια 90	0,31	0,00163	-0,11	0,60517
Ενέργεια 135	0,31	0,00128	-0,09	0,66258
Ομοιογένεια 0	-0,30	0,00169	-0,53	0,00691
Ομοιογένεια 45	-0,12	0,21634	-0,34	0,10141
Ομοιογένεια 90	-0,13	0,17267	-0,34	0,09791
Ομοιογένεια 135	-0,13	0,19990	-0,34	0,09620
GSM	1	0	1,00	0
εμβαδόν πλάκας	-0,11	0,28647	-0,29	0,15241
τύπος πλάκας	0,54	0	0,61	0,00108
JBA	-0,49	0	-0,57	0,00320
Ελαστικότητα	-0,25	0,00960	-0,21	0,30362
Σχετική Ελαστικότητα	-0,22	0,02353	-0,19	0,35065
Βαθμός στέωσης	0,08	0,42422	-0,01	0,94952
Εμφάνιση Συμπτωμάτων	0,18	0,06452	0,33	0,10478

Πίνακας 5: Συσχέτιση των χαρακτηριστικών της πλάκας με τους δείκτες JBA και GSM σε επίπεδο περιστατικών και βίντεο για τις στιγμές διαστολής (Σύνολο Ι).

Συσχέτιση για εικόνες διαστολών	Με το GSM σε επίπεδο βίντεο	Με το GSM σε επίπεδο περιστατικών	Με το JBA σε επίπεδο βίντεο	Με το JBA σε επίπεδο περιστατικών
Χαρακτηριστικά πλάκων	τιμή rho	τιμή p	τιμή rho	τιμή p
Αντίθεση 0	0,34	0,00038	0,34	0,09650
Αντίθεση 45	0,33	0,00061	0,34	0,09576
Αντίθεση 90	0,33	0,00072	0,32	0,11615
Αντίθεση 135	0,35	0,00028	0,34	0,09690
Συσχέτιση 0	0,30	0,00227	0,21	0,31984
Συσχέτιση 45	0,33	0,00067	0,24	0,24950
Συσχέτιση 90	0,31	0,00147	0,24	0,25079
Συσχέτιση 135	0,28	0,00401	0,22	0,28551
Ενέργεια 0	0,03	0,79380	-0,31	0,13001
Ενέργεια 45	0,11	0,25452	-0,24	0,25760
Ενέργεια 90	0,10	0,33183	-0,25	0,23079
Ενέργεια 135	0,10	0,28893	-0,24	0,24816
Ομοιογένεια 0	-0,33	0,00068	-0,53	0,00590
Ομοιογένεια 45	-0,22	0,02706	-0,40	0,04887
Ομοιογένεια 90	-0,22	0,02256	-0,38	0,06329
Ομοιογένεια 135	-0,22	0,02681	-0,39	0,05592
GSM	1	0	1	0
εμβαδόν πλάκας	-0,10	0,30340	-0,30	0,14265
τύπος πλάκας	0,54	0	0,60	0,00146
JBA	-0,53	0	-0,60	0,00163
Ελαστικότητα	-0,26	0,00827	-0,19	0,35487
Σχετική Ελαστικότητα	-0,26	0,00890	-0,23	0,27336
Βαθμός στέωσης	0,05	0,58829	-0,06	0,79369
Εμφάνιση Συμπυκνώσεων	0,18	0,06394	0,34	0,09707

Πίνακας 6: Συσχέτιση των χαρακτηριστικών της πλάκας με τους δείκτες JBA και GSM σε επίπεδο περιστατικών και βίντεο για τις στιγμές συστολής (Σύνολο 2).

Χαρακτηριστικά πλάκων	Με το GSM σε επίπεδο βίντεο	Με το GSM σε επίπεδο περιστατικών	Με το JBA σε επίπεδο βίντεο	Με το JBA σε επίπεδο περιστατικών
	τιμή rho	τιμή p	τιμή rho	τιμή p
Αντίθεση 0	0,27	0,00073	0,33	0,00089
Αντίθεση 45	0,27	0,00064	0,26	0,00965
Αντίθεση 90	0,26	0,00094	0,25	0,01489
Αντίθεση 135	0,28	0,00055	0,27	0,00843
Συσχέτιση 0	-0,05	0,50197	-0,05	0,64794
Συσχέτιση 45	0,03	0,72700	0,15	0,15282
Συσχέτιση 90	0,03	0,72478	0,15	0,14263
Συσχέτιση 135	0,01	0,85831	0,13	0,21635
Ενέργεια 0	-0,30	0,00018	-0,32	0,00175
Ενέργεια 45	-0,28	0,00042	-0,29	0,00363
Ενέργεια 90	-0,28	0,00040	-0,29	0,00369
Ενέργεια 135	-0,28	0,00042	-0,29	0,00372
Ομοιογένεια 0	-0,46	0	-0,48	0
Ομοιογένεια 45	-0,37	0	-0,36	0,00031
Ομοιογένεια 90	-0,37	0	-0,36	0,00033
Ομοιογένεια 135	-0,37	0	-0,36	0,00031
GSM	1	0	1	0
εμβαδόν πλάκας	-0,05	0,51573	-0,12	0,25605
τύπος πλάκας	0,77	0	0,72	0
JBA	-0,67	0	-0,68	0
Βαθμός στένωσης	-0,29	0,00047	-0,38	0,00021
Εμφάνιση Συμπτωμάτων	0,09	0,28513	0,12	0,26042

Πίνακας 7: Συσχέτιση των χαρακτηριστικών της πλάκας με τους δείκτες JBA και GSM σε επίπεδο περιστατικών και βίντεο για τις στιγμές διαστολής (Σύνολο 2).

Συσχέτιση για εικόνες διαστολών	Με το GSM σε επίπεδο βίντεο	Με το GSM σε επίπεδο περιστατικών	Με το JBA σε επίπεδο βίντεο	Με το JBA σε επίπεδο περιστατικών
Χαρακτηριστικά πλάκων	τιμή rho	τιμή p	τιμή rho	τιμή p
Αντίθεση 0	0,24	0,00263	0,31	0,00233
Αντίθεση 45	0,26	0,00116	0,24	0,01739
Αντίθεση 90	0,26	0,00129	0,23	0,02283
Αντίθεση 135	0,27	0,00077	0,25	0,01330
Συσχέτιση 0	-0,03	0,72333	-0,04	0,67302
Συσχέτιση 45	0,04	0,59509	0,16	0,11950
Συσχέτιση 90	0,04	0,62679	0,16	0,11552
Συσχέτιση 135	0,03	0,72562	0,14	0,17558
Ενέργεια 0	-0,30	0,00016	-0,32	0,00174
Ενέργεια 45	-0,29	0,00033	-0,30	0,00339
Ενέργεια 90	-0,29	0,00031	-0,30	0,00343
Ενέργεια 135	-0,29	0,00031	-0,30	0,00340
Ομοιογένεια 0	-0,45	0	-0,47	0
Ομοιογένεια 45	-0,37	0	-0,36	0,00037
Ομοιογένεια 90	-0,37	0	-0,35	0,00040
Ομοιογένεια 135	-0,37	0	-0,36	0,00036
GSM	1	0	1	0
εμβαδόν πλάκας	-0,05	0,52393	-0,13	0,22290
τύπος πλάκας	0,76	0	0,72	0
JBA	-0,68	0	-0,69	0
Βαθμός στένωσης	-0,29	0,00052	-0,39	0,00014
Εμφάνιση Συμπυκνώσεων	0,11	0,17814	0,14	0,19139

Πίνακας 8: Συσχέτιση των χαρακτηριστικών της πλάκας με τους δείκτες JBA και GSM σε επίπεδο περιστατικών και βίντεο για τις στιγμές συστολής (Σύνολο 3).

Συσχέτιση για εικόνες αυτοδών	Με το GSM σε επίπεδο βίντεο	Με το GSM σε επίπεδο περιστατικών	Με το JBA σε επίπεδο βίντεο	Με το JBA σε επίπεδο περιστατικών
Χαρακτηριστικά πλάκων	τιμή rho	τιμή p	τιμή rho	τιμή p
Αντίθεση 0	0,08	0,18098	0,21	0,01941
Αντίθεση 45	0,05	0,42518	0,13	0,15836
Αντίθεση 90	0,05	0,43946	0,12	0,19723
Αντίθεση 135	0,06	0,34174	0,14	0,13880
Συσχέτιση 0	0,13	0,03034	0,06	0,48145
Συσχέτιση 45	0,24	0,00009	0,25	0,00563
Συσχέτιση 90	0,24	0,00011	0,25	0,00499
Συσχέτιση 135	0,23	0,00026	0,23	0,00961
Ενέργεια 0	-0,34	0	-0,34	0,00011
Ενέργεια 45	-0,32	0	-0,32	0,00037
Ενέργεια 90	-0,32	0	-0,32	0,00037
Ενέργεια 135	-0,32	0	-0,32	0,00038
Ομοιογένεια 0	-0,51	0	-0,52	0
Ομοιογένεια 45	-0,42	0	-0,40	0,00001
Ομοιογένεια 90	-0,42	0	-0,40	0,00001
Ομοιογένεια 135	-0,42	0	-0,40	0,00001
GSM	1	0	1	0
εμβαδόν πλάκας	0,03	0,60931	-0,08	0,40451
τύπος πλάκας	0,78	0	0,73	0
JBA	-0,69	0	-0,70	0
Βαθμός στένωσης	-0,14	0,02828	-0,30	0,00119
Εμφάνιση Συμπτωμάτων	0,13	0,04156	0,17	0,06056

Πίνακας 9: Σύσχεση των χαρακτηριστικών της πλάκας με τους δείκτες JBA και GSM σε επίπεδο περιστατικών και βίντεο για τις στιγμές διαστολής (Σύνολο 3).

Χαρακτηριστικά πλάκων	Με το GSM σε επίπεδο βίντεο	Με το GSM σε επίπεδο περιστατικών	Με το JBA σε επίπεδο βίντεο	Με το JBA σε επίπεδο περιστατικών
Αντίθεση 0	τιμή rho 0,06	τιμή p 0,36891	τιμή rho 0,19	τιμή p 0,04110
Αντίθεση 45	0,03	0,62972	0,11	0,24866
Αντίθεση 90	0,03	0,59715	0,10	0,28003
Αντίθεση 135	0,04	0,48177	0,12	0,20320
Συσχέτιση 0	0,16	0,01246	0,07	0,43324
Συσχέτιση 45	0,26	0,00003	0,27	0,00299
Συσχέτιση 90	0,25	0,00004	0,27	0,00279
Συσχέτιση 135	0,24	0,00008	0,25	0,00537
Ενέργεια 0	-0,35	0	-0,34	0,00011
Ενέργεια 45	-0,33	0	-0,32	0,00035
Ενέργεια 90	-0,33	0	-0,32	0,00035
Ενέργεια 135	-0,33	0	-0,32	0,00035
Ομοιογένεια 0	-0,51	0	-0,52	0
Ομοιογένεια 45	-0,42	0	-0,40	0,00001
Ομοιογένεια 90	-0,42	0	-0,39	0,00001
Ομοιογένεια 135	-0,42	0	-0,40	0,00001
GSM	1	0	1	0
εμβαδόν πλάκας	0,04	0,56046	-0,08	0,37142
τύπος πλάκας	0,77	0	0,74	0
JBA	-0,70	0	-0,71	0
Βαθμός στένωσης	-0,14	0,02762	-0,31	0,00082
Εμφάνιση Συμπυκνώσεων	0,14	0,02293	0,19	0,03903

4.2 Μελέτη για τα τρία σύνολα δεδομένων

4.2.1 Αποτελέσματα για το πρώτο σύνολο δεδομένων

Στο πρώτο σύνολο, για εικόνες συστολών, οι συσχετίσεις του JBA με τους υπόλοιπους δείκτες οι οποίες μπορούν να θεωρηθούν στατιστικά σημαντικές ($p < 0.05$) φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 10: Οι στατιστικά σημαντικές συσχετίσεις του JBA με τους υπόλοιπους δείκτες, για εικόνες συστολής (Σύνολο 1).

Στατιστικά σημαντικές συσχετίσεις του JBA ($p < 0.05$)			
Σε επίπεδο βίντεο			
Δείκτες	Είδος συσχέτισης	Τιμή rho	Χαρακτηρισμός συσχέτισης
GSM	Αρνητική γραμμική	-0,49	Ασθενής
Τύπος της πλάκας	Αρνητική γραμμική	-0,61	Σημαντική
Σε επίπεδο περιστατικών			
Δείκτες	Είδος συσχέτισης	Τιμή rho	Χαρακτηρισμός συσχέτισης
Ενέργεια 0	Θετική γραμμική	0,74	Ισχυρή
Ενέργεια 45	Θετική γραμμική	0,69	Σημαντική
Ενέργεια 90	Θετική γραμμική	0,71	Ισχυρή
Ενέργεια 135	Θετική γραμμική	0,69	Σημαντική
Ομοιογένεια 45	Θετική γραμμική	0,61	Σημαντική
Ομοιογένεια 90	Θετική γραμμική	0,61	Σημαντική
Ομοιογένεια 135	Θετική γραμμική	0,58	Σημαντική
Εμβαδόν της πλάκας	Θετική γραμμική	0,62	Σημαντική
GSM	Αρνητική γραμμική	-0,57	Ασθενής
Τύπος της πλάκας	Αρνητική γραμμική	-0,69	Σημαντική

Επίσης, οι συσχετίσεις του GSM με τους υπόλοιπους δείκτες οι οποίες μπορούν να θεωρηθούν στατιστικά σημαντικές ($p < 0.05$) φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 11: Οι στατιστικά σημαντικές συσχετίσεις του GSM με τους υπόλοιπους δείκτες, για εικόνες συστολής (Σύνολο 1).

Στατιστικά σημαντικές συσχετίσεις του GSM ($p < 0.05$)			
Σε επίπεδο βίντεο			
Δείκτες	Είδος συσχέτισης	Τιμή rho	Χαρακτηρισμός συσχέτισης
Τύπος της πλάκας	Θετική γραμμική	0,54	Ασθενής
Σε επίπεδο περιστατικών			
Δείκτες	Είδος συσχέτισης	Τιμή rho	Χαρακτηρισμός συσχέτισης
Ομοιογένεια 0	Αρνητική γραμμική	-0,53	Ασθενής
Τύπος της πλάκας	Θετική γραμμική	0,61	Σημαντική

Στο πρώτο σύνολο, για εικόνες διαστολών, οι συσχετίσεις του JBA με τους υπόλοιπους δείκτες οι οποίες μπορούν να θεωρηθούν στατιστικά σημαντικές ($p < 0.05$) φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 12: Οι στατιστικά σημαντικές συσχετίσεις του JBA με τους υπόλοιπους δείκτες, για εικόνες διαστολής (Σύνολο 1).

Στατιστικά σημαντικές συσχετίσεις του JBA ($p < 0.05$)			
Σε επίπεδο βίντεο			
Δείκτες	Είδος συσχέτισης	Τιμή rho	Χαρακτηρισμός συσχέτισης
GSM	Αρνητική γραμμική	-0,53	Ασθενής
Τύπος της πλάκας	Αρνητική γραμμική	-0,74	Ισχυρή
Σε επίπεδο περιστατικών			
Δείκτες	Είδος συσχέτισης	Τιμή rho	Χαρακτηρισμός συσχέτισης
Ενέργεια 0	Θετική γραμμική	0,8	Ισχυρή
Ενέργεια 45	Θετική γραμμική	0,78	Ισχυρή
Ενέργεια 90	Θετική γραμμική	0,8	Ισχυρή
Ενέργεια 135	Θετική γραμμική	0,79	Ισχυρή
Ομοιογένεια 0	Θετική γραμμική	0,48	Ασθενής
Ομοιογένεια 45	Θετική γραμμική	0,67	Σημαντική
Ομοιογένεια 90	Θετική γραμμική	0,64	Σημαντική
Ομοιογένεια 135	Θετική γραμμική	0,63	Σημαντική
Εμβადόν της πλάκας	Θετική γραμμική	0,62	Σημαντική
GSM	Αρνητική γραμμική	-0,6	Σημαντική
Τύπος της πλάκας	Αρνητική γραμμική	-0,72	Ισχυρή

Επίσης οι συσχετίσεις του GSM με τους υπόλοιπους δείκτες οι οποίες μπορούν να θεωρηθούν στατιστικά σημαντικές ($p < 0.05$) φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.:

Πίνακας 13: Οι στατιστικά σημαντικές συσχετίσεις του GSM με τους υπόλοιπους δείκτες, για εικόνες διαστολής (Σύνολο 1).

Στατιστικά σημαντικές συσχετίσεις του GSM ($p < 0.05$)			
Σε επίπεδο βίντεο			
Δείκτες	Είδος συσχέτισης	Τιμή rho	Χαρακτηρισμός συσχέτισης
Τύπος της πλάκας	Θετική γραμμική	0,54	Ασθενής
Σε επίπεδο περιστατικών			
Δείκτες	Είδος συσχέτισης	Τιμή rho	Χαρακτηρισμός συσχέτισης
Ομοιογένεια 0	Αρνητική γραμμική	-0,53	Ασθενής
Τύπος της πλάκας	Θετική γραμμική	0,6	Σημαντική

4.2.2 Αποτελέσματα για το δεύτερο σύνολο δεδομένων

Στο δεύτερο σύνολο, για εικόνες συστολών, οι συσχετίσεις του JBA με τους υπόλοιπους δείκτες οι οποίες μπορούν να θεωρηθούν στατιστικά σημαντικές ($p < 0.05$) φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 14: Οι στατιστικά σημαντικές συσχετίσεις του JBA με τους υπόλοιπους δείκτες, για εικόνες συστολής (Σύνολο 2).

Στατιστικά σημαντικές συσχετίσεις του JBA ($p < 0.05$)			
Σε επίπεδο βίντεο			
Δείκτες	Είδος συσχέτισης	Τιμή rho	Χαρακτηρισμός συσχέτισης
Ενέργεια 0	Θετική γραμμική	0,46	Ασθενής
Ενέργεια 45	Θετική γραμμική	0,43	Ασθενής
Ενέργεια 90	Θετική γραμμική	0,43	Ασθενής
Ενέργεια 135	Θετική γραμμική	0,43	Ασθενής
Ομοιογένεια 0	Θετική γραμμική	0,62	Σημαντική
Ομοιογένεια 45	Θετική γραμμική	0,59	Σημαντική
Ομοιογένεια 90	Θετική γραμμική	0,59	Σημαντική
Ομοιογένεια 135	Θετική γραμμική	0,59	Σημαντική
Εμβαδόν της πλάκας	Θετική γραμμική	0,42	Ασθενής
GSM	Αρνητική γραμμική	-0,67	Σημαντική
Τύπος της πλάκας	Αρνητική γραμμική	-0,76	Ισχυρή
Σε επίπεδο περιστατικών			
Δείκτες	Είδος συσχέτισης	Τιμή rho	Χαρακτηρισμός συσχέτισης
Ενέργεια 0	Θετική γραμμική	0,44	Ασθενής
Ενέργεια 45	Θετική γραμμική	0,4	Ασθενής
Ενέργεια 90	Θετική γραμμική	0,4	Ασθενής
Ενέργεια 135	Θετική γραμμική	0,4	Ασθενής
Ομοιογένεια 0	Θετική γραμμική	0,61	Σημαντική
Ομοιογένεια 45	Θετική γραμμική	0,57	Σημαντική
Ομοιογένεια 90	Θετική γραμμική	0,57	Σημαντική
Ομοιογένεια 135	Θετική γραμμική	0,57	Σημαντική
Εμβαδόν της πλάκας	Θετική γραμμική	0,49	Ασθενής
GSM	Αρνητική γραμμική	-0,68	Σημαντική
Τύπος της πλάκας	Αρνητική γραμμική	-0,82	Ισχυρή

Επίσης οι συσχετίσεις του GSM με τους υπόλοιπους δείκτες οι οποίες μπορούν να θεωρηθούν στατιστικά σημαντικές ($p < 0.05$) φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 15: Οι στατιστικά σημαντικές συσχετίσεις του GSM με τους υπόλοιπους δείκτες, για εικόνες συστολής (Σύνολο 2).

Στατιστικά σημαντικές συσχετίσεις του GSM ($p < 0.05$)			
Σε επίπεδο βίντεο			
Δείκτες	Είδος συσχέτισης	Τιμή rho	Χαρακτηρισμός συσχέτισης
Τύπος της πλάκας	Θετική γραμμική	0,77	Ισχυρή
Σε επίπεδο περιστατικών			
Δείκτες	Είδος συσχέτισης	Τιμή rho	Χαρακτηρισμός συσχέτισης
Ομοιογένεια 0	Αρνητική γραμμική	-0,48	Ασθενής
Τύπος της πλάκας	Θετική γραμμική	0,72	Ισχυρή

Στο δεύτερο σύνολο, για εικόνες διαστολών, οι συσχετίσεις του JBA με τους υπόλοιπους δείκτες οι οποίες μπορούν να θεωρηθούν στατιστικά σημαντικές ($p < 0.05$) φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 16: Οι στατιστικά σημαντικές συσχετίσεις του JBA με τους υπόλοιπους δείκτες, για εικόνες διαστολής (Σύνολο 2).

Στατιστικά σημαντικές συσχετίσεις του JBA ($p < 0.05$)			
Σε επίπεδο βίντεο			
Δείκτες	Είδος συσχέτισης	Τιμή rho	Χαρακτηρισμός συσχέτισης
Ενέργεια 0	Θετική γραμμική	0,47	Ασθενής
Ενέργεια 45	Θετική γραμμική	0,44	Ασθενής
Ενέργεια 90	Θετική γραμμική	0,44	Ασθενής
Ενέργεια 135	Θετική γραμμική	0,44	Ασθενής
Ομοιογένεια 0	Θετική γραμμική	0,61	Σημαντική
Ομοιογένεια 45	Θετική γραμμική	0,59	Σημαντική
Ομοιογένεια 90	Θετική γραμμική	0,59	Σημαντική
Ομοιογένεια 135	Θετική γραμμική	0,59	Σημαντική
Εμβαδόν της πλάκας	Θετική γραμμική	0,4	Ασθενής
GSM	Αρνητική γραμμική	-0,68	Σημαντική
Τύπος της πλάκας	Αρνητική γραμμική	-0,76	Ισχυρή
Σε επίπεδο περιστατικών			
Δείκτες	Είδος συσχέτισης	Τιμή rho	Χαρακτηρισμός συσχέτισης
Ενέργεια 0	Θετική γραμμική	0,46	Ασθενής
Ενέργεια 45	Θετική γραμμική	0,42	Ασθενής
Ενέργεια 90	Θετική γραμμική	0,42	Ασθενής
Ενέργεια 135	Θετική γραμμική	0,42	Ασθενής
Ομοιογένεια 0	Θετική γραμμική	0,61	Σημαντική
Ομοιογένεια 45	Θετική γραμμική	0,58	Σημαντική
Ομοιογένεια 90	Θετική γραμμική	0,58	Σημαντική
Ομοιογένεια 135	Θετική γραμμική	0,58	Σημαντική
Εμβαδόν της πλάκας	Θετική γραμμική	0,5	Ασθενής
GSM	Αρνητική γραμμική	-0,69	Σημαντική
Τύπος της πλάκας	Αρνητική γραμμική	-0,81	Ισχυρή

Επίσης οι συσχετίσεις του GSM με τους υπόλοιπους δείκτες οι οποίες μπορούν να θεωρηθούν στατιστικά σημαντικές ($p < 0.05$) φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 17: Οι στατιστικά σημαντικές συσχετίσεις του GSM με τους υπόλοιπους δείκτες, για εικόνες διαστολής (Σύνολο 2).

Στατιστικά σημαντικές συσχετίσεις του GSM ($p < 0.05$)			
Σε επίπεδο βίντεο			
Δείκτες	Είδος συσχέτισης	Τιμή rho	Χαρακτηρισμός συσχέτισης
Ομοιογένεια 0	Αρνητική γραμμική	-0,45	Ασθενής
Τύπος της πλάκας	Θετική γραμμική	0,76	Ισχυρή
Σε επίπεδο περιστατικών			
Δείκτες	Είδος συσχέτισης	Τιμή rho	Χαρακτηρισμός συσχέτισης
Ομοιογένεια 0	Αρνητική γραμμική	-0,47	Ασθενής
Τύπος της πλάκας	Θετική γραμμική	0,72	Ισχυρή

4.2.3 Αποτελέσματα για το τρίτο σύνολο δεδομένων

Στο τρίτο σύνολο, για εικόνες συστολών, οι συσχετίσεις του JBA με τους υπόλοιπους δείκτες οι οποίες μπορούν να θεωρηθούν στατιστικά σημαντικές ($p < 0.05$) φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 18: Οι στατιστικά σημαντικές συσχετίσεις του JBA με τους υπόλοιπους δείκτες, για εικόνες συστολής (Σύνολο 3).

Στατιστικά σημαντικές συσχετίσεις του JBA ($p < 0.05$)			
Σε επίπεδο βίντεο			
Δείκτες	Είδος συσχέτισης	Τιμή rho	Χαρακτηρισμός συσχέτισης
Ενέργεια 0	Θετική γραμμική	0,5	Ασθενής
Ενέργεια 45	Θετική γραμμική	0,47	Ασθενής
Ενέργεια 90	Θετική γραμμική	0,47	Ασθενής
Ενέργεια 135	Θετική γραμμική	0,46	Ασθενής
Ομοιογένεια 0	Θετική γραμμική	0,66	Σημαντική
Ομοιογένεια 45	Θετική γραμμική	0,63	Σημαντική
Ομοιογένεια 90	Θετική γραμμική	0,62	Σημαντική
Ομοιογένεια 135	Θετική γραμμική	0,62	Σημαντική
GSM	Αρνητική γραμμική	-0,69	Σημαντική
Τύπος της πλάκας	Αρνητική γραμμική	-0,79	Ισχυρή
Σε επίπεδο περιστατικών			
Δείκτες	Είδος συσχέτισης	Τιμή rho	Χαρακτηρισμός συσχέτισης
Ενέργεια 0	Θετική γραμμική	0,46	Ασθενής
Ενέργεια 45	Θετική γραμμική	0,42	Ασθενής
Ενέργεια 90	Θετική γραμμική	0,42	Ασθενής
Ενέργεια 135	Θετική γραμμική	0,42	Ασθενής
Ομοιογένεια 0	Θετική γραμμική	0,63	Σημαντική
Ομοιογένεια 45	Θετική γραμμική	0,59	Σημαντική
Ομοιογένεια 90	Θετική γραμμική	0,59	Σημαντική
Ομοιογένεια 135	Θετική γραμμική	0,59	Σημαντική
Εμβαδόν της πλάκας	Θετική γραμμική	0,4	Ασθενής
GSM	Αρνητική γραμμική	-0,7	Ισχυρή
Τύπος της πλάκας	Αρνητική γραμμική	-0,83	Ισχυρή

Επίσης οι συσχετίσεις του GSM με τους υπόλοιπους δείκτες οι οποίες μπορούν να θεωρηθούν στατιστικά σημαντικές ($p < 0.05$) φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 19: Οι στατιστικά σημαντικές συσχετίσεις του GSM με τους υπόλοιπους δείκτες, για εικόνες συστολής (Σύνολο 3).

Στατιστικά σημαντικές συσχετίσεις του GSM ($p < 0.05$)			
Σε επίπεδο βίντεο			
Δείκτες	Είδος συσχέτισης	Τιμή rho	Χαρακτηρισμός συσχέτισης
Ομοιογένεια 0	Αρνητική γραμμική	-0,51	Ασθενής
Ομοιογένεια 45	Αρνητική γραμμική	-0,42	Ασθενής
Ομοιογένεια 90	Αρνητική γραμμική	-0,42	Ασθενής
Ομοιογένεια 135	Αρνητική γραμμική	-0,42	Ασθενής
Τύπος της πλάκας	Θετική γραμμική	0,78	Ισχυρή
Σε επίπεδο περιστατικών			
Δείκτες	Είδος συσχέτισης	Τιμή rho	Χαρακτηρισμός συσχέτισης
Ομοιογένεια 0	Αρνητική γραμμική	-0,52	Ασθενής
Ομοιογένεια 45	Αρνητική γραμμική	-0,4	Ασθενής
Ομοιογένεια 90	Αρνητική γραμμική	-0,4	Ασθενής
Ομοιογένεια 135	Αρνητική γραμμική	-0,4	Ασθενής
Τύπος της πλάκας	Θετική γραμμική	0,73	Ισχυρή

Στο τρίτο σύνολο, για εικόνες διαστολών, οι συσχετίσεις του JBA με τους υπόλοιπους δείκτες οι οποίες μπορούν να θεωρηθούν στατιστικά σημαντικές ($p < 0.05$) φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 20: Οι στατιστικά σημαντικές συσχετίσεις του JBA με τους υπόλοιπους δείκτες, για εικόνες διαστολής (Σύνολο 3).

Στατιστικά σημαντικές συσχετίσεις του JBA ($p < 0.05$)			
Σε επίπεδο βίντεο			
Δείκτες	Είδος συσχέτισης	Τιμή rho	Χαρακτηρισμός συσχέτισης
Ενέργεια 0	Θετική γραμμική	0,51	Ασθενής
Ενέργεια 45	Θετική γραμμική	0,48	Ασθενής
Ενέργεια 90	Θετική γραμμική	0,48	Ασθενής
Ενέργεια 135	Θετική γραμμική	0,48	Ασθενής
Ομοιογένεια 0	Θετική γραμμική	0,66	Σημαντική
Ομοιογένεια 45	Θετική γραμμική	0,63	Σημαντική
Ομοιογένεια 90	Θετική γραμμική	0,63	Σημαντική
Ομοιογένεια 135	Θετική γραμμική	0,63	Σημαντική
GSM	Αρνητική γραμμική	-0,7	Ισχυρή
Τύπος της πλάκας	Αρνητική γραμμική	-0,8	Ισχυρή
Σε επίπεδο περιστατικών			
Δείκτες	Είδος συσχέτισης	Τιμή rho	Χαρακτηρισμός συσχέτισης
Ενέργεια 0	Θετική γραμμική	0,48	Ασθενής
Ενέργεια 45	Θετική γραμμική	0,45	Ασθενής
Ενέργεια 90	Θετική γραμμική	0,45	Ασθενής
Ενέργεια 135	Θετική γραμμική	0,45	Ασθενής
Ομοιογένεια 0	Θετική γραμμική	0,65	Σημαντική
Ομοιογένεια 45	Θετική γραμμική	0,61	Σημαντική
Ομοιογένεια 90	Θετική γραμμική	0,61	Σημαντική
Ομοιογένεια 135	Θετική γραμμική	0,61	Σημαντική
GSM	Αρνητική γραμμική	-0,71	Ισχυρή
Τύπος της πλάκας	Αρνητική γραμμική	-0,82	Ισχυρή

Επίσης οι συσχετίσεις του GSM με τους υπόλοιπους δείκτες οι οποίες μπορούν να θεωρηθούν στατιστικά σημαντικές ($p < 0.05$) φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 21: Οι στατιστικά σημαντικές συσχετίσεις του GSM με τους υπόλοιπους δείκτες, για εικόνες διαστολής (Σύνολο 3).

Στατιστικά σημαντικές συσχετίσεις του GSM ($p < 0.05$)			
Σε επίπεδο βίντεο			
Δείκτες	Είδος συσχέτισης	Τιμή rho	Χαρακτηρισμός συσχέτισης
Ομοιογένεια 0	Αρνητική γραμμική	-0,51	Ασθενής
Ομοιογένεια 45	Αρνητική γραμμική	-0,42	Ασθενής
Ομοιογένεια 90	Αρνητική γραμμική	-0,42	Ασθενής
Ομοιογένεια 135	Αρνητική γραμμική	-0,42	Ασθενής
Τύπος της πλάκας	Θετική γραμμική	0,77	Ισχυρή
Σε επίπεδο περιστατικών			
Δείκτες	Είδος συσχέτισης	Τιμή rho	Χαρακτηρισμός συσχέτισης
Ομοιογένεια 0	Αρνητική γραμμική	-0,52	Ασθενής
Ομοιογένεια 45	Αρνητική γραμμική	-0,4	Ασθενής
Ομοιογένεια 90	Αρνητική γραμμική	-0,4	Ασθενής
Ομοιογένεια 135	Αρνητική γραμμική	-0,4	Ασθενής
Τύπος της πλάκας	Θετική γραμμική	0,74	Ισχυρή

4.2.4 Συμπεράσματα για τους δείκτες JBA - GSM

Από τα αποτελέσματα των προηγούμενων υποενοτήτων προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα:

Το GSM έχει θετική γραμμική συσχέτιση με τον τύπο της πλάκας. Το γεγονός αυτό ήταν αναμενόμενο, καθώς όσο αυξάνει ο αριθμός του τύπου της πλάκας, τόσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των εικονοστοιχείων με υψηλή τιμή φωτεινότητας. Με αυξημένο ποσοστό εικονοστοιχείων υψηλών φωτεινοτήτων το GSM είναι εξίσου υψηλό εξ' ορισμού.

Για τον δείκτη GSM εμφανίστηκε ελάχιστη συσχέτιση με τον βαθμό στένωσης της κρωτίδας.

Το JBA έχει αρνητική γραμμική συσχέτιση με τον τύπο της πλάκας. Το γεγονός αυτό ήταν αναμενόμενο, καθώς όσο αυξάνει ο αριθμός του τύπου της πλάκας, τόσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των εικονοστοιχείων με υψηλή τιμή φωτεινότητας, άρα μειώνεται το εμβαδό των περιοχών JBA.

Το JBA έχει αρνητική γραμμική συσχέτιση με το GSM. Το γεγονός αυτό ήταν αναμενόμενο, αφού μια μεγάλη τιμή του GSM σημαίνει μικρό αριθμό εικονοστοιχείων με μικρή τιμή φωτεινότητας. Οπότε ο αριθμός αλλά και το μέγεθος των περιοχών με εικονοστοιχεία μικρής φωτεινότητας θα είναι μικρός με άμεση συνέπεια μια μικρή τιμή για το JBA.

Το JBA έχει θετική γραμμική συσχέτιση με το εμβαδόν της πλάκας. Το γεγονός αυτό ήταν αναμενόμενο, αφού μεγάλες πλάκες είναι πιο πιθανό να περιέχουν νεκρωτικό και λιπώδη ιστό, των οποίων οι χαμηλές φωτεινότητες [127] μπορεί να προσδώσουν υψηλή τιμή στο JBA.

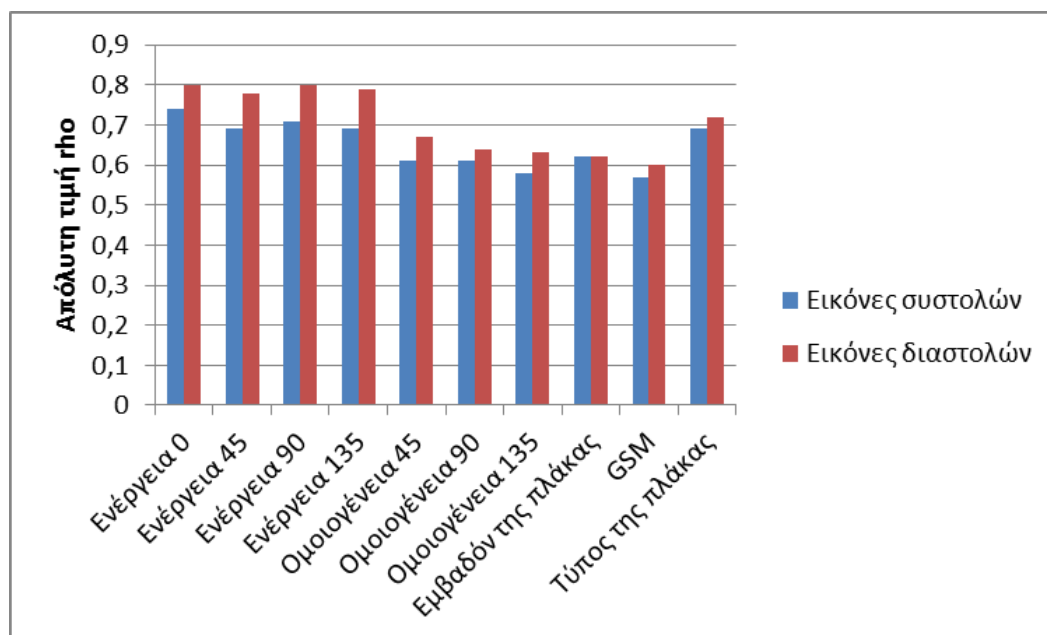
Το JBA έχει θετική γραμμική συσχέτιση με την ομοιογένεια της πλάκας. Το γεγονός αυτό φαίνεται λογικό επειδή αν η πλάκα είναι ομοιογενής σημαίνει πως περιέχει κοντινά επίπεδα φωτεινοτήτων, τα οποία αν έχουν χαμηλή τιμή, υποδηλώνουν πως η πλάκα περιέχει μεγάλες περιοχές λιπιδίων και νεκρωτικών ιστών. Οι περιοχές αυτές μπορούν να προσδώσουν υψηλό JBA. Επίσης η διεύθυνση υπολογισμού της ομοιογένειας δεν φαίνεται να επηρεάζει τα αποτελέσματα, καθώς αποδείχθηκε σημαντική συσχέτιση του JBA με την ομοιογένεια για όλες τις διευθύνσεις.

Το JBA έχει θετική γραμμική συσχέτιση με την ενέργεια της πλάκας. Το γεγονός αυτό φαίνεται λογικό επειδή αν η πλάκα έχει υψηλή ενέργεια σημαίνει πως έχει ακανόνιστες και τυχαίες τιμές φωτεινοτήτων, που υποδηλώνουν πως η πλάκα περιέχει πολλά είδη ιστών. Μέσα σε αυτά τα είδη ιστών αυξάνεται η πιθανότητα να υπάρχει νεκρωτικός και λιπώδης ιστός, των οποίων οι χαμηλές φωτεινότητες μπορεί να προσδώσουν υψηλό JBA. Επίσης η διεύθυνση υπολογισμού της ενέργειας δεν φαίνεται να επηρεάζει τα αποτελέσματα, καθώς αποδείχθηκε σημαντική συσχέτιση του JBA με την ενέργεια για όλες τις διευθύνσεις.

Από τα αποτελέσματα δεν αποδείχτηκε συσχέτιση του δείκτη JBA με εμφάνιση συμπτωμάτων, τον βαθμό στένωσης και τους δείκτες ελαστικότητας.

4.3 Μελέτη εικόνων συστολής - διαστολής

Στο πρώτο σύνολο, σε επίπεδο περιστατικών, η σύγκριση των αποτελεσμάτων των συσχετίσεων του JBA με τους υπόλοιπους δείκτες, για εικόνες συστολών και διαστολών, φαίνεται στην **Εικόνα 28**.



Εικόνα 28: Συσχέτιση του JBA με τους υπόλοιπους δείκτες ενδιαφέροντος του πρώτου συνόλου δεδομένων, σε επίπεδο περιστατικών, για εικόνες συστολών και διαστολών.

Τα άλλα δύο σύνολα ακολουθούν το ίδιο μοτίβο με το πρώτο σύνολο. Επιλέχθηκε η παρουσίαση σε επίπεδο περιστατικών επειδή φαίνεται να παρέχει ασφαλέστερα αποτελέσματα σε σχέση με τη μελέτη σε επίπεδο βίντεο.

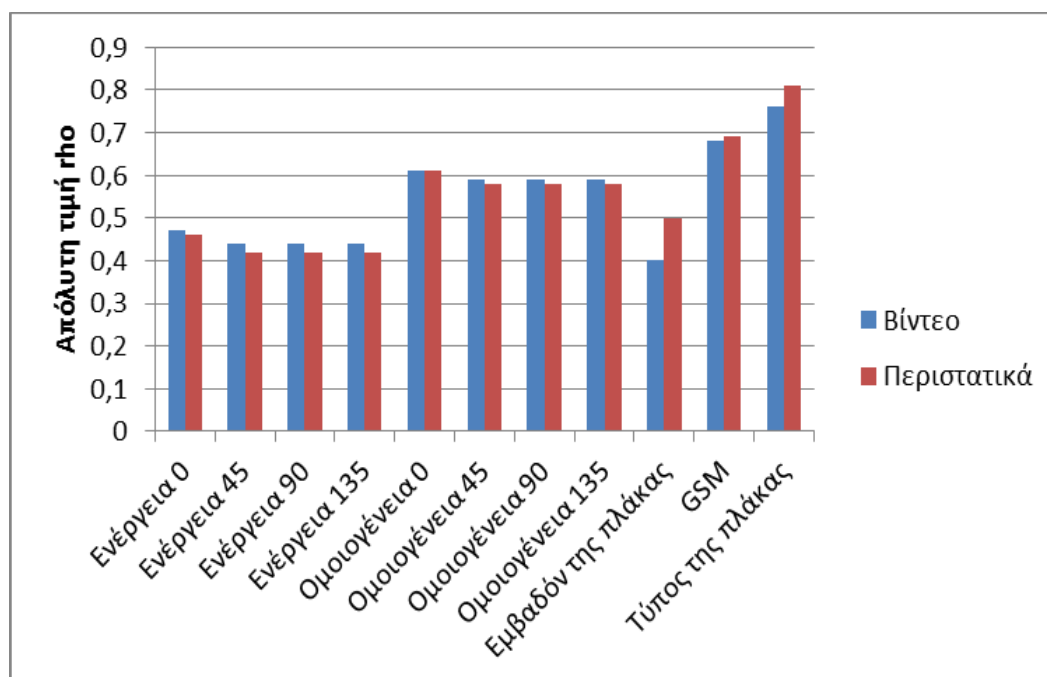
Στα αποτελέσματα της ανάλυσης που έγινε για τις εικόνες διαστολών παρατηρήθηκε σχετικά μεγαλύτερη συσχέτιση σχεδόν σε όλους τους δείκτες με τον δείκτη JBA και για τα 3 σύνολα δεδομένων, σε σχέση με τα αποτελέσματα της ανάλυσης για εικόνες συστολών.

Όσον αφορά τη συσχέτιση του δείκτη GSM με τους υπόλοιπους δείκτες δεν παρατηρήθηκε σημαντική διαφορά μεταξύ αποτελεσμάτων ανάλυσης εικόνων συστολών και διαστολών και για τα 3 σύνολα δεδομένων.

Από τις παραπάνω παρατηρήσεις φαίνεται πως οι εικόνες διαστολών είναι καταλληλότερες για την εξαγωγή δεικτών ενδιαφέροντος.

4.4 Μελέτη σε επίπεδο βίντεο – περιστατικών

Στο δεύτερο σύνολο, για εικόνες διαστολών, η σύγκριση των αποτελεσμάτων των συσχετίσεων του JBA με τους υπόλοιπους δείκτες, σε επίπεδο βίντεο και περιστατικών φαίνεται στην **Εικόνα 29**.



Εικόνα 29: Συσχέτιση του JBA με τους υπόλοιπους δείκτες ενδιαφέροντος του δεύτερου συνόλου δεδομένων, για εικόνες διαστολών, σε επίπεδο βίντεο και περιστατικών.

Το τρίτο σύνολο ακολουθεί το ίδιο μοτίβο με το δεύτερο σύνολο. Το πρώτο σύνολο δεν περιέχει αρκετά στατιστικά σημαντικά χαρακτηριστικά σε επίπεδο βίντεο για να μπορέσουν να συγκριθούν με τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά σε επίπεδο περιστατικών. Επιλέχθηκε η παρουσίαση για εικόνες διαστολών επειδή παρέχουν υψηλότερες συσχετίσεις σε σχέση με τις εικόνες συστολών.

Στη μελέτη των συνόλων ανά περιστατικό παρατηρήθηκε σχετικά αυξημένη συσχέτιση του δείκτη JBA με το GSM, τον τύπο της πλάκας και το εμβαδόν της πλάκας σε σχέση με την μελέτη των συνόλων ανά βίντεο. Στη μελέτη των συνόλων ανά βίντεο παρατηρήθηκε σχετικά αυξημένη συσχέτιση του δείκτη JBA με την ενέργεια και την ομοιογένεια της πλάκας.

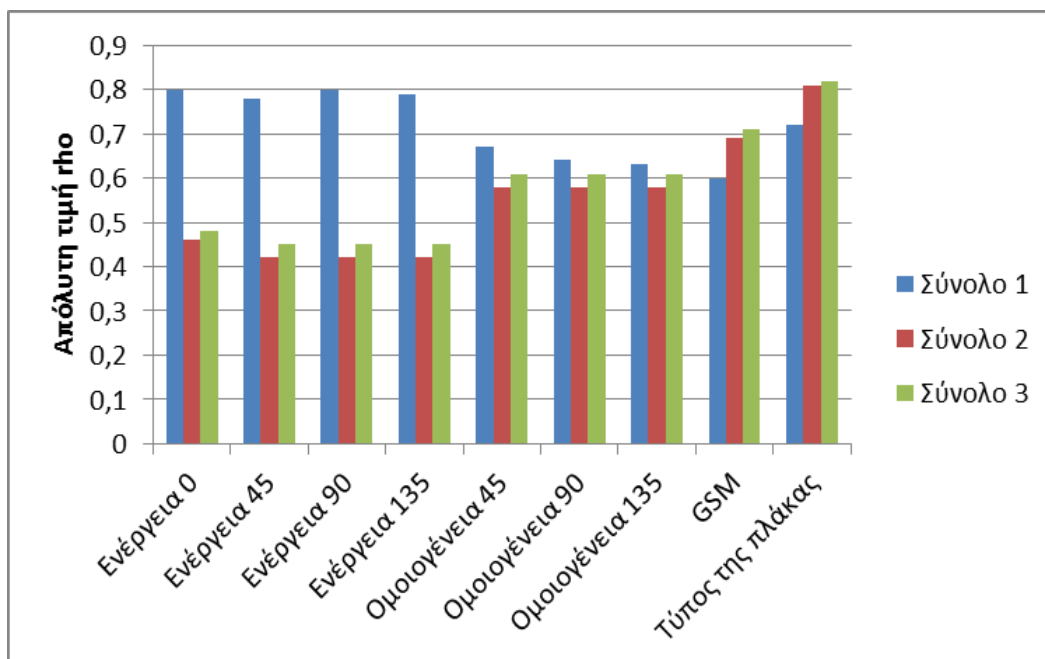
Όσον αφορά τον δείκτη GSM δεν φαίνεται να υπάρχει κάποια εμφανής τάση, εκτός από το πρώτο σύνολο, όπου έχουμε περισσότερες συσχετίσεις με δείκτες ενδιαφέροντος σε επίπεδο περιστατικών, σε σχέση με την μελέτη σε επίπεδο βίντεο.

Γενικότερα η μελέτη των εικόνων σε επίπεδο περιστατικών φαίνεται να είναι ασφαλέστερη από την μελέτη σε επίπεδο βίντεο, επειδή ο στατιστικός μέσος όρος των δεικτών ενδιαφέροντος που γίνεται σε επίπεδο περιστατικών φαίνεται να μειώνει τον θόρυβο, αλλά και να μειώνει την πιθανότητα να

υπερεκτιμηθούν οι μετρήσεις ενός περιστατικού που απεικονίζεται σε μεγάλο αριθμό βίντεο.

4.5 Συγκριτική μελέτη συνόλων δεδομένων

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων των συσχετίσεων του JBA με τους υπόλοιπους δείκτες, σε επίπεδο περιστατικών, για εικόνες διαστολών μεταξύ των τριών συνόλων φαίνεται στην **Εικόνα 30**.



Εικόνα 30: Συσχέτιση του JBA με τους υπόλοιπους δείκτες ενδιαφέροντος για τα 3 σύνολα, για εικόνες διαστολών, σε επίπεδο περιστατικών.

Επιλέχθηκε η παρουσίαση για εικόνες διαστολών επειδή παρέχουν υψηλότερες συσχετίσεις σε σχέση με τις εικόνες συστολών. Επίσης επιλέχθηκε η παρουσίαση σε επίπεδο περιστατικών επειδή φαίνεται να παρέχει ασφαλέστερα αποτελέσματα σε σχέση με τη μελέτη σε επίπεδο βίντεο.

Στο πρώτο σύνολο δεδομένων φαίνεται να υπάρχει μεγαλύτερη συσχέτιση του δείκτη JBA με την ενέργεια, την ομοιογένεια και το εμβαδόν της πλάκας σε σχέση με τα άλλα δύο 2 σύνολα.

Επίσης στο τρίτο σύνολο δεδομένων φαίνεται να υπάρχει μεγαλύτερη συσχέτιση του δείκτη JBA με το GSM και τον τύπο της πλάκας σε σχέση με τα άλλα δύο 2 σύνολα.

Όσον αφορά τον δείκτη GSM φαίνεται να εμφανίζει μεγαλύτερη συσχέτιση με τους δείκτες ενδιαφέροντος στο τρίτο σύνολο δεδομένων.

Γενικότερα, το τρίτο σύνολο φαίνεται να επαληθεύει τις περισσότερες συσχετίσεις των άλλων δύο συνόλων, ανεξαρτητοποιώντας με αυτόν τον τρόπο το αυτοματοποιημένο JBA από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του συνόλου εφαρμογής του.

4.6 Αξιολόγηση του αυτοματοποιημένου δείκτη JBA

Ο αυτοματοποιημένος δείκτης JBA φάνηκε να σχετίζεται με τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά υφής της αθηρωματικής πλάκας, χαρακτηριστικά τα οποία αποτελούν αναγνωρισμένους στη διεθνή βιβλιογραφία δείκτες και θεωρούνται χρήσιμα στην αξιολόγηση της αστάθειας της πλάκας και κατά συνέπεια στην εκτίμηση της επικινδυνότητάς της. Οπότε μπορεί να υποστηριχθεί ότι ο αυτοματοποιημένος δείκτης JBA μπορεί να αποτελέσει δείκτη για την αξιολόγηση της επικινδυνότητας της πλάκας και θα μπορούσε να ενσωματωθεί σε ένα εργαλείο υποβοήθησης της διάγνωσης ασθενών που πάσχουν από καρωτιδική αθηρωμάτωση, που θα στηρίζεται στην ανάλυση υφής εικόνων υπέρηχων B-mode.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Ο αλγόριθμος αυτοματοποιημένης εύρεσης του JBA που δημιουργήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί ένα πρώιμο στάδιο της ακριβούς, έγκυρης, και καθολικά αυτοματοποιημένης διαδικασίας εύρεσης του δείκτη JBA σε μια αθηρωματική πλάκα.

Περαιτέρω έρευνα σε αυτό το πεδίο θα μπορούσε να περιλαμβάνει:

- Την εύρεση ενός βελτιστοποιημένου κριτηρίου για το κατώφλι ελάχιστης απόστασης, που θα πρέπει να έχει μια μη ηχογενής περιοχή από τον αυλό ώστε να θεωρηθεί ως περιοχή JBA.
- Την εύρεση ενός βελτιστοποιημένου κριτηρίου για το κατώφλι ελάχιστου εμβαδού, που θα πρέπει να έχει μια μη ηχογενής περιοχή κοντά στον αυλό ώστε να θεωρηθεί ως περιοχή JBA.
- Τη μελέτη για το αν το σχήμα της υποψήφιας περιοχής JBA αποτελεί παράγοντα αύξησης της επικινδυνότητας της πλάκας.
- Τη μελέτη για την εύρεση ενός προτύπου εντοπισμού και αξιολόγησης του ηχογενούς χάσματος που μπορεί να παρεμβάλλεται μεταξύ της υποψήφιας JBA περιοχής και του αυλού.

Οι παραπάνω μελέτες θα μπορούσαν να πραγματοποιηθούν με την βοήθεια ιατρών, ώστε να βρεθεί η περιοχή JBA από την εξέταση της εικόνας του υπερήχου B-mode σε πληθώρα πλακών και στην συνέχεια με αλγορίθμους ταξινόμησης τελευταίας γενιάς να βρεθούν τα κατώφλια ενδιαφέροντος.

Σε γενικότερο πλαίσιο ένας βελτιωμένος αλγόριθμος αυτοματοποιημένης αποκοπής της αθηρωματικής πλάκας από την υπόλοιπη εικόνα υπερήχου θα βοηθούσε στην γρηγορότερη και ακριβέστερη επεξεργασία των εικόνων αθηρωματικών πλακών.

Επίσης, ιδιαίτερο ενδιαφέρον θα παρουσίαζε η συγκριτική μελέτη των αποτελεσμάτων του υπολογισμού του JBA από τον αυτοποιημένο αλγόριθμο που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία με ιστοπαθολογικά ευρήματα για τα αντίστοιχα περιστατικά. Τυχόν συσχέτισή τους θα μπορούσε να αποτελέσει βάση για τον προσδιορισμό της σύστασης της αθηρωματικής πλάκας, μέσω της ανάλυσης της υφής της από εικόνες υπερήχων B-mode, αποφεύγοντας επώδυνες και επικίνδυνες επεμβατικές μεθόδους.

Τέλος, η ανάπτυξη ενός εργαλείου υποβοήθησης της διάγνωσης ασθενών που πάσχουν από καρωτιδική αθηρωμάτωση, που θα στηρίζεται στην ανάλυση υφής εικόνων υπέρηχων B-mode και η ένταξη του αυτοματοποιημένου δείκτη JBA στο εργαλείο αυτό θα αποτελούσε σημαντικό βήμα στην γενικότερη ανάπτυξη συστημάτων υποβοηθούμενης διάγνωσης. Επίσης η χρήση υπολογιστικού νέφους θα μπορούσε να μειώσει τις υπολογιστικές απαιτήσεις χρήσης από τον εκάστοτε εξεταστή, επειδή θα μπορούσαν οι εντολές να στέλνονται σε έναν κεντρικό υπερυπολογιστή, ο οποίος θα

εκτελούσε τους απαιτητικούς αλγορίθμους αποδοτικά, εξοικονομώντας παράλληλα ενεργειακούς πόρους. Η χρήση υπολογιστικού νέφους θα προσέφερε σημαντική βοήθεια σε ασθενείς που βρίσκονται σε απομακρυσμένες περιοχές, καθώς και σε ασθενείς που νοσούν σε χώρες του τρίτου κόσμου επειδή διευκολύνεται η διάγνωση από απόσταση, η οποία υπό άλλες συνθήκες θα ήταν αδύνατη, εξαιτίας της ελλιπούς υλικοτεχνικής υποδομής στις περιοχές αυτές.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] H. Ashrafian, “*Anatomically specific clinical examination of the carotid arterial tree.*” *Anat. Sci. Int.*, 82(1): p.16–23, 2007.
- [2] A. Manbachi, Y. Hoi, B. Wasserman, E. Lakatta, D. Steinman, “*On the shape of the common carotid artery with implications for blood velocity profiles.*” *Physiol. Meas.*, 32(12): p. 1885–1897, 2011.
- [3] http://fce-study.netdna-ssl.com/2/images/upload-flashcards/92/18/19/8921819_m.jpeg
- [4] J. Krejza, M. Arkuszewski, S. Kasner, J. Weigele, A. Ustymowicz, R. Hurst, B. Cucchiara, S. Messe, “*Carotid Artery Diameter in Men and Women and the Relation to Body and Neck Size.*” *Stroke*, 37(4): p. 1103–1105, 2006.
- [5] Α. Παπαδοπούλου “*Η πρόγνωση των γνωστικών διαταραχών μετά από καρωτιδική ενδαρτηρεκτομή δια του διεγερτικού ελέγχου της εγκεφαλικής λειτουργίας*” Διδακτορική Διατριβή, Θεσσαλονίκη, 2009.
- [6] https://en.wikipedia.org/wiki/Common_carotid_artery
- [7] http://fcestudy.netdnassl.com/2/images/uploadflashcards/26/97/47/9269747_m.png
- [8] J. Clark, S. Glagov, “*Transmural organization of the arterial wall. The lamellar unit revised.*” *Arteriosclerosis*, vol. 5, p. 19–34, 1985.
- [9] A. Nicolaides, K. Beach, E. Kyriacou, C. Pattichis, “*Ultrasound and Carotid Bifurcation Atherosclerosis*” London, U.K., Springer, 2011.
- [10] <https://en.wikipedia.org/wiki/Atherosclerosis>
- [11] B. Blaus, “*Cholesterol*”, [Online], Available: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=28761812>
- [12] C. Schwartz, A. Valente, E. Sprague, J. Kelley, A. Cayatte, J. Mowery, “*Atherosclerosis. Potential targets for stabilization and regression.*” *Circulation*, 86(6): p.117–123, 1992.
- [13] J. Miller, “*Cardiovascular calcification: Orbicular origins.*” *Nature Materials*, vol. 12, p. 476-478, 2013.
- [14] S. Glagov, E. Weisenberg, C. Zarins, R. Stankunavicius, G. Kolettis, “*Compensatory enlargement of human atherosclerotic coronary arteries*” *N. Engl. J. Med.*, 316(22): p. 1371–5, 1987.
- [15] Npatchett, “*Atherosclerosis disease progression*”, [Online], Available: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?curid=46223676>

- [16] J. Wang, T. Michelitsch, A. Wunderlin, R. Mahadeva, “Aging as a consequence of Misrepair –a novel theory of aging”, 2011.
- [17] J. Wang, T. Michelitsch, “Aging as a process of accumulation of Misrepairs”, 2015.
- [18] J. Wang, T. Michelitsch, “Misrepair mechanism in the development of atherosclerotic plaques”, 2015.
- [19] Arrhythmia, Heart and Stroke Foundation, 2011, [Online], Available: <http://www.heartandstroke.com/site/c.ikIQLcMWJtE/b.3484057/>
- [20] N. Sims, H. Muderman, “Mitochondria, oxidative metabolism and cell death in stroke.” *Biochimica et Biophysica Acta*, vol. 1802: p. 80–91, 2010.
- [21] M. Nichols, N. Townsend, R. Luengo-Fernandez, J. Leal, P. Scarborough, M. Rayner, “European cardiovascular disease statistics.” European Heart Network, 2012.
- [22] V. Roger, A. Go, D. Lloyd-Jones, “Heart disease and stroke statistics - 2012 update.” *American Heart Association*, 125(1): p. 2–220, 2012.
- [23] KS. Nikita, “Atherosclerosis: the evolving role of vascular image analysis.” *Comput. Med. Imaging Graph.*, 37(1): p. 1-3, 2013.
- [24] M. Tendera, V. Aboyans, “ESC Guidelines on the diagnosis and treatment of peripheral artery diseases: Document covering atherosclerotic disease of extracranial carotid and vertebral, mesenteric, renal, upper and lower extremity arteries: the Task Force on the Diagnosis and Treatment of Peripheral Artery Diseases of the European Society of Cardiology (ESC).” *European Heart Journal*, 32(22): p. 2851–906, 2011.
- [25] N. Kadoglou, G. Sfyroeras, A. Spathis, C. Gkekas, A. Gastouniote, G. Mantas, KS. Nikita, P. Karakitsos, C. Liapis, “Galectin-3, Carotid Plaque Vulnerability, and Potential Effects of Statin Therapy.” *European Journal of Vascular and Endovascular Surgery*, 2014.
- [26] P. Rothwell, “Current status of carotid endarterectomy and stenting for symptomatic carotid stenosis.” *Cerebrovascular Disease*, 24(1): p. 116–125, 2007.
- [27] Γ. Ασιμομήτης, “Ανάπτυξη συστήματος υποστήριξης διάγνωσης καρωτιδικής αθηρωμάτωσης μέσω ταξινόμησης ασβεστοποιημένων και μη ασβεστοποιημένων πλακών – ολοκληρωμένη διαδικτυακή πλατφόρμα.” Διπλωματική Εργασία, Αθήνα, 2015.
- [28] Α. Γαστουνιώτη, “Υπολογιστική ανάλυση μηχανικών χαρακτηριστικών του αρτηριακού τοιχώματος από απεικονιστικές καταγραφές με στόχο την υποβοήθηση της διάγνωσης της καρωτιδικής αθηρωμάτωσης.” Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα, 2014.

- [29] A. Gastounioti, V. Koliass, S. Golemati, N. Tsiaparasa, A. Matsakoua, J. Stoitsis, N. Kadoglou, C. Gkekas, J. Kakasis, C. Liapis, P. Karakitsos, I. Sarafis, P. Angelidis, K. Nikita, “*CAROTID – A web-based platform for optimal personalized management of atherosclerotic patients*” comp. meth. and prog. in biom., vol. 114: p. 183–193, 2014.
- [30] https://en.wikipedia.org/wiki/Medical_ultrasound
- [31] <http://www.angiologist.com/wp-content/uploads/2012/02/Common-carotid-b-mode-duplex.jpg>
- [32] <https://youoverallhealthandimaging.files.wordpress.com/2013/04/3d-ultrasound-machine-cft-5003.jpg>
- [33] <http://big.cs.bris.ac.uk/wp-content/uploads/2012/08/Screen-Shot-2012-08-10-at-12.20.121.png>
- [34] <http://www.northamerica.bcftechnology.com/learning/farm-animal/technologyexplained/~~/media/LEARNING%20ZONE/Articles/Bovine%20articles/Images/How%20ult%20works%201.jpg?h=286&w=460>
- [35] P. Wells, “*Medical ultrasound: imaging of soft tissue strain and elasticity.*” Journal of the Royal Society, 8(64): p. 1521–1549, 2011.
- [36] A. Sarvazyan, T. Hall, M. Urban, M. Fatemi, S. Aglyamov, B. Garra, “*Overview of elastography—an emerging branch of medical imaging.*” Current Medical Imaging Reviews, 7(4): p. 255-282, 2011.
- [37] J. Ophir, I. Céspedes, H. Ponnekanti, X. Li, “*Elastography: A quantitative method for imaging the elasticity of biological tissues.*” Ultrasonic Imaging, 13(2): p. 111–134, 1991.
- [38] K. Parker, M. Doyley, D. Rubens, “*Imaging the elastic properties of tissue: the 20 year perspective.*” Physics in Medicine and Biology, 56(2): p. 513, 2011.
- [39] <http://www.hindawi.com/journals/ije/2012/340974.fig.001.jpg>
- [40] A. Depeursinge, A. Foncubierta-Rodriguez, D. Van De Ville, H. Müller, “*Three-dimensional solid texture analysis in biomedical imaging: Review and opportunities.*” Medical image analysis, vol. 18: p. 176-196, 2014.
- [41] A. Ahmadvand, M. Daliri, “*A Review on Texture Analysis Methods in Biomedical Image Processing.*” OMICS J. Radiol., vol. 5: p. 136, 2016.
- [42] A. Gastounioti, S. Makrodimitris, S. Golemati, N. Kadoglou, C. Liapis, K.S. Nikita, “*A novel computerized tool to stratify risk in carotid atherosclerosis using kinematic features of the arterial wall.*” IEEE J. Biomed Health Inform., 19(3), 2015.

- [43] S. Golemati, S. Lehareas, N. Tsiaparas, KS. Nikita, A. Chatziioannou, D. Perrea, “*Ultrasound-image-based Texture Variability along the Carotid Artery Wall in Asymptomatic Subjects with Low and High Stenosis Degrees: Unveiling Morphological Phenomena of the Vulnerable Tissue.*” *Physics Procedia.*, vol. 70: p. 1208 – 1211, 2015.
- [44] S. Golemati, A. Gastounioti, KS. Nikita, N. Tsiaparas, “*Bilateral Asymmetry of Ultrasound-Image-Based Mechanical and Textural Features in Subjects with Asymptomatic Carotid Artery Disease.*” *IEEE-EMBS International Conferences on Biomedical and Health Informatics (BHI).* Valencia, Spain, 2014.
- [45] N. Tsiaparas, S. Golemati, I. Andreadis, J. Stoitsis, I. Valavanis, KS. Nikita, “*Assessment of carotid atherosclerosis from B-mode ultrasound images using directional multiscale texture features.*” *Meas. Sci. Technol.*, vol. 23, 2012.
- [46] N. Tsiaparas, S. Golemati, I. Andreadis, J. Stoitsis, I. Valavanis, KS. Nikita, “*Comparison of multiresolution features for texture classification of carotid atherosclerosis from B-mode ultrasound.*” *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, vol. 15: p. 130-137, 2011.
- [47] U. Acharya, “*Atherosclerotic Risk Stratification Strategy for Carotid Arteries Using Texture-Based Features*” *Ultrasound in Medicine and Biology*, 38(6): p. 899 – 915, 2012.
- [48] S. Golemati, J. Stoitsis, KS. Nikita, “*Potential carotid atherosclerosis biomarkers based on ultrasound image analysis.*” *Handbook of Biomedical Imaging*, Springer, p. 501-511, 2015.
- [49] S. Golemati, A. Gastounioti, K. Nikita, “*Toward novel noninvasive and low-cost markers for predicting strokes in asymptomatic carotid atherosclerosis: the role of ultrasound image analysis.*” *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* , 60(3): p. 652-658, 2013.
- [50] S. Kakkos, “*The size of juxtaluminal hypoechoic area in ultrasound images of asymptomatic carotid plaques predicts the occurrence of stroke*” *Journal of Vascular Surgery*, 57(3): p. 609 – 618, 2013.
- [51] Special Issue on Digital Picture Processing, *Proc, IEEE*, vol. 60: p. 763-922, 1972.
- [52] H. Andrews, A. Tescher, and R. Kruger, “*Image processing by digital computer*” *IEEE Spectrum*, vol. 9: p. 20-32, 1972.
- [53] <https://staff.fnwi.uva.nl/r.vandenboomgaard/IPC/PointOperators/HistogramEqualization-1.hires.png>
- [54] M. Jacobolus, “*Color icon gray v2*”, [Online], Available: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=10509947>

- [55] R. Haralick, K. Shanmugam,, H. Dinstein, “*Textural Features for Image Classification*” IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS, MAN AND CYBERNETICS, 3(6): p. 610- 621, 1973.
- [56] R. Haralick, “Statistical and Structural Approaches to Texture” Proc. IEEE, 67(5): p. 786-804, 1979.
- [57] M. Levine, “Vision in Man and Machine” New York, McGraw-Hill, 1985.
- [58] J. Weszka, C. Deya, A. Rosenfeld, “*A Comparative Study of Texture Measures for Terrain Classification*” IEEE Trans. System, Man and Cybernetics, vol. 6: p. 269-285, 1976.
- [59] B. Julesz, “*Experiments in the Visual Perception of Texture*” Scientific American, 232(4): p. 34-43, 1975.
- [60] H. Niemann, “*Pattern Analysis*” New York, Springer-Verlag, 1981.
- [61] R. Lerski, K. Straughan, L. Shad, D. Boyce, S. Bluml, I. Zuna, “*MR Image Texture Analysis – An Approach to Tissue Characterisation*” Magnetic Resonance Imaging, vol. 11: p. 873-887, 1993.
- [62] M. Strzelecki, “*Segmentation of Textured Biomedical Images Using Neural Networks*” PhD Thesis, Technical University of Łódź, Poland, 1995.
- [63] K. Valkealathi, E. Oja, “*Reduced Multidimensional Co-Occurrence Histograms in Texture Classification*” IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 20(1): p. 90-94, 1998.
- [64] G. Cross, A. Jain, “*Markov Random Field Texture Models*” IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 5(1): p. 25-39, 1983.
- [65] A. Pentland, “*Fractal-Based Description of Natural Scenes*” IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 6(6): p. 661-674, 1984.
- [66] R. Chellappa, S. Chatterjee, “*Classification of Textures Using Gaussian Markov Random Fields*”, IEEE Trans. Acoustic, Speech and Signal Processing, 33(4): p. 959-963, 1985.
- [67] H. Derin and H. Elliot, “*Modeling and Segmentation of Noisy and Textured Images Using Gibbs Random Fields*” IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 9(1):p. 39- 55, 1987.
- [68] B. Manjunath and R. Chellappa, “*Unsupervised Texture Segmentation Using Markov Random Fields*” IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 13(5): p. 478-482, 1991.
- [69] A. Pentland, “*Fractal-Based Description of Natural Scenes*” IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 6(6): p. 661-674, 1984.

- [70] M. Strzelecki, A. Materka, “*Markov Random Fields as Models of Textured Biomedical Images*” Proc. 20th National Conf. Circuit Theory and Electronic Networks KTOiUE '97, p. 493-498, Poland, 1997.
- [71] B. Chaudhuri and N. Sarkar, “*Texture Segmentation Using Fractal Dimension*” IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 17(1): p. 72-77, 1995.
- [72] L. Kaplan, C. Kuo, “*Texture Roughness Analysis and Synthesis via Extended Self-Similar (ESS) Model*” IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 17(11): p. 1043-1056, 1995.
- [73] P. Cichy, A. Materka, J. Tuliszkiewicz, “*Computerized Analysis of X-ray Images For Early Detection of Osteoporotic Changes in the Bone*” Proc. Conf. Information Technology in Medicine TIM '97, p. 53-61, Poland, 1997.
- [74] A. Rosenfeld, J. Weszka, “*Picture Recognition*” Digital Pattern Recognition, Berlin, Germany, Springer-Verlag, p. 135-166, 1980.
- [75] J. Daugman, “*Uncertainty Relation for Resolution in Space, Spatial Frequency and Orientation Optimized by Two-Dimensional Visual Cortical Filters*” Journal of the Optical Society of America, vol. 2: p. 1160-1169, 1985.
- [76] A. Bovik, M. Clark, W. Giesler, “*Multichannel Texture Analysis Using Localised Spatial Filters*” IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 12: p. 55-73, 1990.
- [77] S. Mallat, “*Multifrequency Channel Decomposition of Images and Wavelet Models*”, IEEE Trans. Acoustic, Speech and Signal Processing, 37(12): p. 2091-2110, 1989.
- [78] A. Laine, J. Fan, “*Texture Classification by Wavelet Packet Signatures*” IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 15(11): p. 1186-1191, 1993.
- [79] C. Lu, P. Chung, C. Chen, “*Unsupervised Texture Segmentation via Wavelet Transform*” Pattern Recognition, 30(5): p. 729-742, 1997.
- [80] N. Tsiaparass, A. Gastouniotti, S. Golemati, KS. Nikita, “*Multiscale motion analysis of the carotid artery wall from B-mode ultrasound: investigating the optimal wavelet parameterization.*” 13th IEEE International Conference on BioInformatics and BioEngineering (BIBE 2013), Chania, Greece, 2013.
- [81] W. Lam, C. Li, “*Rotated Texture Classification by Improved Iterative Morphological Decomposition*” IEE Proc. – Visual Image Signal Processing, 144(3): p. 171-179, 1997.
- [82] M. Brady and Z. Xie, “*Feature Selection for Texture Segmentation*”, Advances in Image Understanding, IEEE Computer Society Press, 1996.

- [83] http://www.cb.uu.se/~gustaf/texture/fig_sample
- [84] A. Papoulis, “*Probability, Random Variables and Stochastic Processes*” New York, McGraw-Hill, 1965.
- [85] M. Levine, “*Vision in Man and Machine*” New York, McGraw-Hill, 1985.
- [86] W. Pratt, “*Digital Image Processing*” New Jersey, Wiley, 1991.
- [87] G. Lowitz, “*Can a Local Histogram Really Map Texture Information?*” *Pattern Recognition*, 16(2): p. 141-147, 1983.
- [88] A. Materka, M. Strzelecki, “*Texture Analysis Methods – A Review*” Technical University of Lodz, Institute of Electronics, COST B11 report, Brussels, 1998.
- [89] L. Alparone, F. Argenti and G. Benelli, “*Fast Calculation of Co-Occurrence Matrix Parameters For Image Segmentation*” *Electronics Letters*, 26(1): p. 23-24, 1990.
- [90] F. Argenti, L. Alparone and G. Benelli, “*Fast Algorithms for Texture Analysis Using Co- Occurrence Matrices*” *IEEE Proceedings*, 137(6): p. 443-448, 1990.
- [91] V. Kovalev, M. Petrou, “*Multidimensional Co-Occurrence Matrices for Object Recognition and Matching*” *GMIP*, 58(3): p. 187-197, 1996.
- [92] K. Valkealathi, E. Oja, “*Reduced Multidimensional Co-Occurrence Histograms in Texture Classification*” *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 20(1): p. 90-94, 1998.
- [93] P. Torr. A. Zisserman, “*Feature Based Methods for Structure and Motion Estimation*” *ICCV Workshop on Vision Algorithms*, p. 278-294, 1999.
- [94] M. Irani, P. Anandan, “*About Direct Methods*” *ICCV Workshop on Vision Algorithms*, p. 267-277, 1999.
- [95] https://en.wikipedia.org/wiki/Motion_estimation
- [96] S. Golemati, S. Lehareas, A. Chatziioanou, D. Perrea, A. Gastounioti, KS. Nikita, “*Variation of longitudinal strain along the arterial wall adjacent to the asymptomatic carotid plaque.*” *Ultrasonics Symposium (IUS), IEEE International*, 2015.
- [97] A. Gastounioti, S. Douma, V. Koliass, KS. Nikita, “*A TOOLBOX FOR IN SILICO EVALUATION OF MOTION ESTIMATORS FOR THE ARTERIAL WALL.*” *36th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 2014.

- [98] A. Gastouniotti, S. Golemati, J. Stoitsis, KS. Nikita, “*Carotid artery wall motion analysis from B-mode ultrasound using adaptive block matching: in silico evaluation and in vivo application.*” *Physics in Medicine and Biology*, vol. 58: p. 8647–8661, 2013.
- [99] S. Golemati, J. Stoitsis, A. Gastouniotti, A. Dimopoulos, V. Koropouli, KS. Nikita, “*Comparison of Block Matching and Differential Methods for Motion Analysis of the Carotid Artery Wall From Ultrasound Images.*” *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 16(5): p. 852-8, 2012.
- [100] S. Golemati, I. Apostolakis, A. Gastouniotti, N. Tsiaparas, KS. Nikita, “*Using optical flow and multiscale image analysis to produce displacement and strain maps of the healthy and diseased arterial wall.*” *RSNA 98th Scientific Assembly and Annual Meeting*. Chicago, Illinois, USA, 2012.
- [101] A. Gastouniotti, S. Golemati, J. Stoitsis, KS. Nikita “*Comparison of Kalman-filter-based approaches for block matching in arterial wall motion analysis from B-mode ultrasound.*” *IEEE TRANSACTIONS ON INFORMATION TECHNOLOGY IN BIOMEDICINE*, 16(5), 2012.
- [102] A. Gastouniotti, A. Sotiras, N. Paragios, KS. Nikita, “*Graph-based Motion-driven Carotid Segmentation in 2D Ultrasound Sequences.*” *18th International Conference on Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention, MICCAI, Munich, 2015.*
- [103] Γ. Χαραλαμπίδης, Α. Γαστουγιώτη, Μ. Ξενικού, Μ. Τζώρτζη, Κ. Νικήτα, Σ. Γολεμάτη, Γ. Δέδες, Δ. Μάρας, Ν. Λιάσης, “*Ο ΡΟΛΟΣ ΤΗΣ ΕΛΑΣΤΟΓΡΑΦΙΑΣ ΑΓΓΕΙΩΝ ΣΤΗΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΘΗΡΩΜΑΤΙΚΩΝ ΑΛΛΟΙΩΣΕΩΝ ΤΗΣ ΚΑΡΩΤΙΔΑΣ*” 14ο Συνέδριο της Πανελληνίας Αγγειολογικής Εταιρείας, Αθήνα, 2015.
- [104] Α. Γαστουγιώτη, Σ. Γολεμάτη, Β. Κόλιας, “*Ανάπτυξη Υπολογιστικού Συστήματος Υποστήριξης Ιατρικών Αποφάσεων*” κωδικός έργου: 09ΣΥΝ-12-1054 ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΤΙΚΟΤΗΤΑ & ΕΠΙΧΕΙΡΗΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ, p. 7, Αθήνα, 2015.
- [105] M. Graebe, S. Pedersen, L. Højgaard, A. Kjaer, H. Sillesen. “*18FDG PET and ultrasound echolucency in carotid artery plaques*” *JACC. Cardiovascular Imaging*, vol. 3: p. 289-295, 2010.
- [106] T. Elatrozy, A. Nicolaides, T. Tegos, M. Griffin, “*The objective characterisation of ultrasonic carotid plaque features.*” *European Journal of Vascular and Endovascular Surgery*, vol. 16: p. 223-230, 1998.
- [107] N. El-barghouty, G. Geroulakos, A. Nicolaides, A. Androulakis, V. Bahal, “*Computer assisted carotid plaque characterisation.*” *European Journal of Vascular and Endovascular Surgery*, vol. 9: p. 389-393, 1995.
- [108] N. El-barghouty, G. Geroulakos, A. Nicolaides, A. Androulakis, “*The identification of the high risk carotid plaque.*” *European Journal of Vascular and Endovascular Surgery*, vol. 11: p. 470-478, 1996.

- [109] M. Sabetai, T. Tegos, A. Nicolaides, S. Dhanjil, G. Pare, M. Stevens, “*Reproducibility of computer-quantified carotid plaque echogenicity: can we overcome the subjectivity?*” *Stroke*, vol. 31: p. 2189-2196, 2010.
- [110] G. Ruiz, B. Fuentes, P. Martínez, M. Martínez, E. Díez, “*Utility of the assessment of echogenicity in the identification of symptomatic carotid artery atheroma plaques in ischemic stroke patients.*” *Cerebrovascular Diseases*, vol. 32: p. 535-541, 2012.
- [111] G. Biasi, A. Froio, E. Diethrich, G. Deleo, S. Galimberti, P. Mingazzini P, “*Carotid plaque echolucency increases the risk of stroke in carotid stenting: the Imaging*” *Carotid Angioplasty and Risk of Stroke* vol. 110: p. 756-762, 2004.
- [112] B. Kanber, “*IDENTIFYING THE VULNERABLE CAROTID PLAQUE BY MEANS OF DYNAMIC ULTRASOUND IMAGE ANALYSIS*”, PhD Thesis, University of Leicester, 2014.
- [113] G. Geroulakos, J. Domjan, A. Nicolaides, J. Stevens, N. Labropoulos, G. Ramaswami, “*Ultrasonic carotid artery plaque structure and the risk of cerebral infarction on computed tomography.*” *Journal of Vascular Surgery*. vol. 20: p. 263-266, 1994.
- [114] G. Biasi, A. Sampaolo, P. Mingazzini, P. De Amicis, N. El-barghouty, A. Nicolaides, “*Computer analysis of ultrasonic plaque echolucency in identifying high risk carotid bifurcation lesions.*” *European Journal of Vascular and Endovascular Surgery*, vol. 17: p. 476-479, 1999.
- [115] T. Tegos, P. Stavropoulos, M. Sabetai, P. Khodabakhsh, A. Sassano, A. Nicolaides, “*Determinants of carotid plaque instability: echoicity versus heterogeneity.*” *European Journal of Vascular and Endovascular Surgery*, vol. 22: p. 22-30, 2001.
- [116] S. Golemati, T. Tegos, A. Sassano, K. Nikita, A. Nicolaides, “*Echogenicity of B- mode sonographic images of the carotid artery: work in progress.*” *Journal of Ultrasound in Medicine.*, vol. 23:p. 659-669, 2004.
- [117] M. Rosenkranz, O. Wittkugel, C. Waiblinger, G. Thomalla, A. Krutzmann, S. Havemeister, “*Cerebral embolism during carotid artery stenting: role of carotid plaque echolucency.*” *Cerebrovascular Diseases*, vol. 27: p. 443-449, 2009.
- [118] M. Salem, R. Sayers, M. Bown, K. West, D. Moore, A. Nicolaides, “*Patients with recurrent ischemic events from carotid artery disease have a large lipid core and low GSM.*” *European Journal of Vascular and Endovascular Surgery*. vol. 43: p. 147-153, 2012.
- [119] Y. Irie, N. Katakami, H. Kaneto, M. Takahara , M. Nishio, R. Kasami, “*The utility of ultrasonic tissue characterization of carotid plaque in the prediction of cardiovascular events in diabetic patients.*” *Atherosclerosis*, vol. 230: p. 399-405, 2013.

- [120] C. Steffen, A. Gray-Weale, K. Byrne, “*Carotid atheroma: ultrasound appearance in symptomatic and asymptomatic vessels.*” *Aust. NZ J. Surg.*, vol. 59: p. 529-34, 1989.
- [121] G. Geroulakos, G. Ramaswami, A. Nicolaides, K. James, N. Labropoulos, G. Belcaro M. Holloway, “*Characterization of symptomatic and asymptomatic carotid plaques using high-resolution real-time ultrasonography*” *Br. J. Surg.*, vol. 80: p. 1274-1 277, 1993.
- [122] J. Seeger, N. Klingman, “*The relationship between carotid plaque composition and neurological symptoms.*” *J. Surg. Res.* vol. 43: p. 78-85, 1987.
- [123] M. Wolverson, H. Bashiti, G. Peterson, “*Ultrasonic tissue characterisation of atheromatous plaques using a high resolution real time scanner.*” *Ultrasound Med. Biol.*, vol. 9: p. 599-609, 1989.
- [124] M. Salem, M. Bown, Sayers, K. West, D. Moore, A. Nicolaides, T. Robinson, A. Naylor, “*Identification of Patients with a Histologically Unstable Carotid Plaque Using Ultrasonic Plaque Image Analysis*” *Eur. J. Vasc. Endovasc. Surg.*, 48(2): p. 118-25, 2014.
- [125] D. Spence, M. Eliasziw, M. DiCicco, D. Hackam, R. Galil, T. Lohmann, “*Carotid Plaque Area A Tool for Targeting and Evaluating Vascular Preventive Therapy*” *Stroke*, 33(12): p. 2916-22, 2002.
- [126] E. Mathiesen, S. Johnsen, T. Wilsgaard, K. Bønaa, M. Løchen, I. Njølstad, “*Carotid Plaque Area and Intima-Media Thickness in Prediction of First-Ever Ischemic Stroke*” *Stroke*, vol. 42: p. 972-978, 2011.
- [127] M. Griffin, E. Kyriacou, C. Pattichis, D. Bond, S. Kakkos, M. Sabetai, “*Juxtaluminal hypoechoic area in ultrasonic images of carotid plaques and hemispheric symptoms.*” *J. Vasc. Surg.*, 52(1): p. 69-76, 2010.
- [128] A. Nicolaides, S. Kakkos, E. Kyriacou, M. Griffin, D. Thomas, G. Geroulakos, “*Asymptomatic internal carotid artery stenosis and cerebrovascular risk stratification.*” *J. Vasc. Surg.*, vol. 52: p. 1486-96, 2010.
- [129] H. Bassiotmy, Y. Sakaguchi, S. Mikucki, J. McKinsey, G. Piano, B. Gewertz, S. Glagov, “*Juxtalumenal location of plaque necrosis and neof ormation in symptomatic carotid stenosis*” *J. Vasc. Surg.*, vol. 26: p. 585-94, 1997.
- [130] S. Kakkos, M. Griffin, A. Nicolaides, E. Kyriacou, M. Sabetai, T. Tegos, G. Makris, D. Thomas, G. Geroulakos, “*The size of juxtaluminal hypoechoic area in ultrasound images of asymptomatic carotid plaques predicts the occurrence of stroke*” *J. Vasc. Surg.*, vol. 57: p. 609-18, 2013.
- [131] A. Naylor , T. Schroeder, H. Sillesen, “*Clinical and Imaging Features Associated with an Increased Risk of Late Stroke in Patients with*

Asymptomatic Carotid Disease” Eur. J. Vasc. Endovasc. Surg., vol. 48: p. 633-640, 2014.

[132] A. Nicolaides et al., “*CAROTID PLAQUE IDENTIFICATION METHOD*” Patent, No: US 2010/0106022 A1, 2010.

[133] Skbkekak, “*Spearman*”, [Online], Available: https://commons.wikimedia.org/wiki/File%3ASpearman_fig4.svg

[134] A. Lehman, “*Jmp For Basic Univariate And Multivariate Statistics: A Step-by-step Guide.*” London, U.K., SAS Press, 2005.

[135] https://en.wikipedia.org/wiki/Spearman%27s_rank_correlation_coefficient

[136] B. Bhattacharya, D. Habtzghi, “*Median of the p value under the alternative hypothesis*” The American Statistician, 56 (3): p. 202–6, 2002.

[137] R. Hubbard, “*Blurring the Distinctions Between p’s and a’s in Psychological Research*” Theory Psychology, 14:3 p. 295-327, 2004.

[138] R. Nuzzo, “*Scientific method: Statistical errors*” Nature 506 (7487): p.150–152, 2014.

[139] C. Rao, R. Chakraborty, “*Statistical Methods in Biological and Medical Sciences.*” Amsterdam, North-Holland, Elsevier, 1991.

[140] <https://en.wikipedia.org/wiki/P-value>

[141] C. Liao, Repapetito, “*Value in statistical significance testing*”, [Online], Available: https://commons.wikimedia.org/wiki/File%3AP-value_in_statistical_significance_testing.svg