

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Η/Υ

Τομέας Συστημάτων Μετάδοσης Πληροφορίας και Τεχνολογίας Υλικών

Εργαστήριο Βιοϊατρικών Προσομοιώσεων και Απεικονιστικής Τεχνολογίας



Διπλωματική εργασία του:

Ιωάννη Σ. Γούσια

Θέμα:

Ανάλυση της υφής αθηρωματικής πλάκας καρωτίδας

από εικόνες υπερήχων β-σάρωσης

Επίβλεψη: Αναπλ. Καθ. Κ. Νικήτα

Δρ. Σπ. Γολεμάτη



Αθήνα, Φεβρουάριος 2003

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Η/Υ

Τομέας Συστημάτων Μετάδοσης Πληροφορίας και Τεχνολογίας Υλικών

Εργαστήριο Βιοϊατρικών Προσομοιώσεων και Απεικονιστικής Τεχνολογίας

Διπλωματική εργασία του

Ιωάννη Σ. Γούσια

Θέμα:

*Ανάλυση της υφής αθηρωματικής πλάκας καρωτίδας
από εικόνες υπερήχων β-σάρωσης*

Επίβλεψη: Αναπλ. Καθ. Κ. Νικήτα

Δρ Σπ. Γολεμάτη

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 25^η Φεβρουαρίου 2003.

.....
Κ. Νικήτα
Αν. Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

.....
Ν. Ουζούνoglou
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Δ. Κουτσούρης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2003

.....
Ιωάννης Σ. Γούσιας

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

Copyright © Ιωάννης Σ. Γούσιας,, 2003

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.

Στον Αλβέρτο μου

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Βιοϊατρικών Προσομοιώσεων και Απεικονιστικής Τεχνολογίας της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, υπό την επίβλεψη της αναπληρώτριας καθηγήτριας Κωνσταντίνας Νικήτα και της Δρ. Σπυρέττας Γολεμάτη. Για την ολοκλήρωσή της θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου προς τις επιβλέπουσες, κυρίες Κωνσταντίνα Νικήτα και Σπυρέτα Γολεμάτη, για τη συνεχή και ακούραστη καθοδήγησή τους, για τις συμβουλές που με μεγάλη προθυμία μου προσέφεραν σε οποιαδήποτε δυσκολία ή προβληματισμό αντιμετώπισα, καθώς και για την εμπιστοσύνη με την οποία με περιέβαλαν. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την υπονήφια διδάκτορα Σταυρούλα Μουγιακάκου για την ουσιαστική βοήθειά της στην πορεία της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Ακόμη, ευχαριστώ τα μέλη της τριμελούς επιτροπής κύριο Δημήτριο Κουτσούρη και κύριο Νικόλαο Ουζούνογλου, καθηγητές της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Η/Υ του Ε.Μ.Π. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου και τη φίλη μου Μαριτίνα Δρεπανιώτη για την ανοχή, την ηθική και ψυχολογική υποστήριξή τους, καθώς και τον αδερφό μου Βάιο για την ανεκτίμητη συμβολή του στην ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας.

Θέμα της εργασίας είναι η ανάλυση της υφής της αθηρωματικής πλάκας στην καρωτίδα από εικόνες υπερήχων β-σάρωσης. Σε αυτήν υλοποιείται η μέθοδος ανάλυσης της υφής μέσω της ενέργειας (Laws 1980, 1985) και υπολογίζονται οι στατιστικές παράμετροι υφής 1^{ης} τάξης σε περιοχές ενδιαφέροντος που αντιστοιχούν σε συμπτωματικές αθηρωματικές πλάκες, ασυμπτωματικές αθηρωματικές πλάκες και υγιείς ιστούς. Στόχος της εργασίας είναι η εξαγωγή κατάλληλων χαρακτηριστικών υφής, με βάση τα οποία είναι δυνατή η διάκριση μεταξύ ασθενών με αθηρωματική πλάκα και υγιών ατόμων, καθώς και η ταξινόμηση των ασθενών σε συμπτωματικούς και ασυμπτωματικούς ασθενείς.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στην αθηρωμάτωση της καρωτίδας και την απεικόνιση με εικόνες υπερήχων β-σάρωσης. Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύεται η έννοια της υφής και επιχειρείται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση των μεθόδων ανάλυσης υφής από ψηφιακές εικόνες, με έμφαση στη μέθοδο του Laws. Επίσης, γίνεται αναφορά σε μεθόδους επιλογής χαρακτηριστικών και αναλύονται οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία. Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μέθοδος ανάλυσης της υφής της αθηρωματικής πλάκας στην καρωτίδα από εικόνες υπερήχων β-σάρωσης, με χρήση των μητρώων του Laws. Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η εφαρμογή της μεθόδου σε υγιή άτομα και ασθενείς με συμπτωματική ή ασυμπτωματική αθηρωματική πλάκα καρωτίδας, δίνοντας έμφαση στα χαρακτηριστικά υφής με τη μεγαλύτερη αξία ταξινόμησης. ενώ τέλος στο πέμπτο κεφάλαιο τα συμπεράσματα με βάση τα αποτελέσματα.

Στο Παράρτημα Α παρατίθεται ο κώδικας του βασικού προγράμματος, που υλοποιήθηκε και χρησιμοποιήθηκε για την επεξεργασία των εικόνων, σε Matlab.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

σελ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΑΘΗΡΩΜΑΤΩΣΗ ΣΤΗΝ ΚΑΡΩΤΙΔΑ ΚΑΙ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΜΕ ΥΠΕΡΗΧΟΥΣ

1.1.	Η αθηρωμάτωση στην καρωτίδα.....	13
1.1.1.	Αθηρωμάτωση.....	13
1.1.2.	Ανατομία και φυσιολογία.....	13
1.1.3.	Η αστάθεια της αθηρωματικής πλάκας στην καρωτίδα.....	15
1.2.	Απεικόνιση της καρωτίδας με χρήση υπερήχων.....	15
1.2.1.	Φυσικές αρχές υπερήχων.....	15
1.2.2.	Αλληλεπίδραση υπερήχων με βιολογικούς ιστούς.....	16
1.2.3.	Μέθοδοι απεικόνισης υπερήχων.....	18
1.2.4.	Αρτηριακές υπερηχοτομογραφικές μετρήσεις.....	19
1.2.4.1.	Βαθμός στένωσης.....	19
1.2.4.2.	Αιμοδυναμικές παράμετροι.....	20
1.2.4.3.	Μορφολογία πλάκας.....	20
1.3.	Υπερηχοτομογραφικές μελέτες αθηρωμάτωσης καρωτίδας...	21
1.3.1.	Μελέτες συσχέτισης με ιστολογία.....	21
1.3.2.	Μελέτες ταξινόμησης.....	22

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΑΝΑΛΥΣΗ ΥΦΗΣ ΚΑΙ ΕΠΙΛΟΓΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΣΕ ΙΑΤΡΙΚΕΣ ΕΙΚΟΝΕΣ

2.1.	Ορισμός της υφής.....	25
2.2.	Μέθοδοι ανάλυσης της υφής	25

2.2.1. Στατιστικές μέθοδοι 1 ^{ης} τάξης (First-order statistics).....	25
2.2.2. Μητρώα συνεμφάνισης (Co-occurrence matrices).....	27
2.2.3. Στατιστικές μέθοδοι 2 ^{ης} τάξης (Second-order statistic).....	30
2.2.4. Φάσμα ισχύος Fourier (Fourier Power Spectrum).....	32
2.2.5. Αυτοσυσχέτιση (Auto-correlation).....	33
2.2.6. Εκτίμηση κλασματικής διάστασης.....	35
2.2.6.1. Κλασματική διάσταση (Fractal dimension).....	35
2.2.6.2. Μοντέλο κλασματικής Brownian κίνησης.....	35
2.2.6.3. Εκτίμηση κλασματικής διάστασης.....	36
2.2.6.4. Χρησιμότητα μεθόδου.....	38
2.2.7. Ενέργεια υφής (Textural energy).....	38
2.3. Επιλογή χαρακτηριστικών (Feature selection).....	41
2.3.1. Ομάδες μεθόδων επιλογής χαρακτηριστικών.....	42
2.3.2. Μέθοδοι επιλογής χαρακτηριστικών.....	44
2.3.3. TTEST.....	46
2.3.4. Συντελεστής συσχέτισης (Correlation coefficient).....	46
2.3.5. Στατιστική μέθοδος ANOVA (Analysis of variance).....	47

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΥΦΗΣ ΑΘΗΡΩΜΑΤΙΚΗΣ ΠΛΑΚΑΣ ΣΤΗΝ ΚΑΡΩΤΙΔΑ

3.1. Τα άτομα του δείγματος.....	49
3.2. Διαδικασία καταγραφής εικόνων.....	50
3.3. Ανάλυση της υφής της αθηρωματικής πλάκας στην καρωτίδα με χρήση της μεθόδου του Laws.....	51
3.4. Ανάλυση της υφής του περιβάλλοντος ιστού στην καρωτίδα με χρήση της μεθόδου του Laws.....	54

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΕΠΙΛΟΓΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΥΦΗΣ ΓΙΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟ / ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΟΥ ΙΣΤΟΥ ΤΗΣ ΚΑΡΩΤΙΔΑΣ

4.1.	Σύγκριση αθηρωματικών πλακών και υγιών ιστών.....	71
4.1.1.	Συγκριτικά αποτελέσματα TTEST σε αθηρωματικές πλάκες- ιστούς.....	71
4.1.2.	Επιλογή χαρακτηριστικών για διαχωρισμό αθηρωματικών πλακών- υγιών ιστών.....	85
4.2.	Σύγκριση συμπτωματικών-ασυμπτωματικών αθηρωματικών πλακών.....	85
4.2.1.	Συγκριτικά αποτελέσματα TTEST σε συμπτωματικές- ασυμπτωματικές πλάκες.....	85
4.2.2.	Αποτελέσματα συντελεστή συσχέτισης.....	96
4.2.3.	Αποτελέσματα ANOVA.....	99
4.2.4.	Επιλογή χαρακτηριστικών διάκρισης συμπτωματικών- ασυμπτωματικών αθηρωματικών πλακών.....	100

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

5.1.	Δυνατότητες ταξινόμησης με βάση χαρακτηριστικά υφής.....	102
5.2.	Μελλοντική έρευνα.....	108
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....		109
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.....		124

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	126
--------------------------	------------

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΑΘΗΡΩΜΑΤΩΣΗ ΣΤΗΝ ΚΑΡΩΤΙΔΑ ΚΑΙ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΜΕ ΥΠΕΡΗΧΟΥΣ

Στις περισσότερες βιομηχανοποιημένες χώρες, τα εγκεφαλικά επεισόδια παραμένουν η τρίτη συνηθέστερη αιτία θανάτου μετά τα καρδιακά επεισόδια και τον καρκίνο. Πολλοί είναι οι ασθενείς που έχοντας υποστεί εγκεφαλικό επεισόδιο αποκτούν αναπηρίες, οι οποίες δημιουργούν προβλήματα τόσο κατά την επανένταξή τους στο εργασιακό περιβάλλον, όσο και κατά την αντιμετώπιση των καθημερινών αναγκών τους. Το 20% με 30% των εγκεφαλικών επεισοδίων πιστεύεται ότι προκαλείται από εμβολή που οφείλεται στην παρουσία αθηρωμάτωσης στην καρωτίδα [1]. Τελευταίες μελέτες έχουν δείξει ότι ο κίνδυνος εγκεφαλικού μειώνεται σε ποσοστό μεγαλύτερο του 50% με χειρουργική αφαίρεση των αθηρωματικών πλακών (ενδαρτηρεκτομή), οι οποίες συνέβαλαν σε μείωση της διαμέτρου της καρωτιδικής αρτηρίας κατά 70% [2], [3] υπολογισμένης από αγγειογραφία. Μάλιστα, τα οφέλη της ενδαρτηρεκτομής στην καρωτίδα είναι περισσότερα για τους συμπτωματικούς ασθενείς μεγαλύτερης ηλικίας με βαθμό στένωσης της καρωτίδας 50-99% [4]. Δεδομένου ότι δεν προκαλούν εγκεφαλικά επεισόδια όλες οι αθηρωματικές πλάκες στην καρωτίδα και επειδή η ενδαρτηρεκτομή είναι μία επικίνδυνη επέμβαση, η προσεκτική επιλογή των ασθενών που θα υποβληθούν σε χειρουργική επέμβαση είναι πολύ σημαντική [1].

Η απεικόνιση των καρωτίδων με τεχνολογία υπερήχων χρησιμοποιείται ευρέως στη διάγνωση της αθηρωμάτωσης. Η απεικόνιση αυτή βασίζεται στην αλληλεπίδραση υπερήχων με βιολογικούς ιστούς και έχει συμβάλει στην εκτίμηση παραμέτρων στις οποίες βασίζεται η επιλογή των ασθενών που πρέπει να υποβληθούν

σε χειρουργική επέμβαση, όπως ο βαθμός της στένωσης και η ηχωγένεια της αθηρωματικής πλάκας [5]. Η ανάγκη για προσδιορισμό επιπρόσθετων παραμέτρων για καλύτερη διάγνωση και επιλογή των ασθενών προς επέμβαση, διεύρυνε τη χρήση των υπερήχων στην εκτίμηση παραμέτρων όπως η μορφολογία και η υφή της πλάκας και η ελαστικότητα του αγγείου. Σε αυτή την εργασία μελετήθηκε η υφή της αθηρωματικής πλάκας στην καρωτίδα με τη μέθοδο Laws [6], [7], [8], με σκοπό τον προσδιορισμό παραμέτρων που θα υποβοηθήσουν την ακριβή και έγκαιρη διάγνωση της νόσου.

1.1. Η αθηρωμάτωση στην καρωτίδα

1.1.1. Αθηρωμάτωση

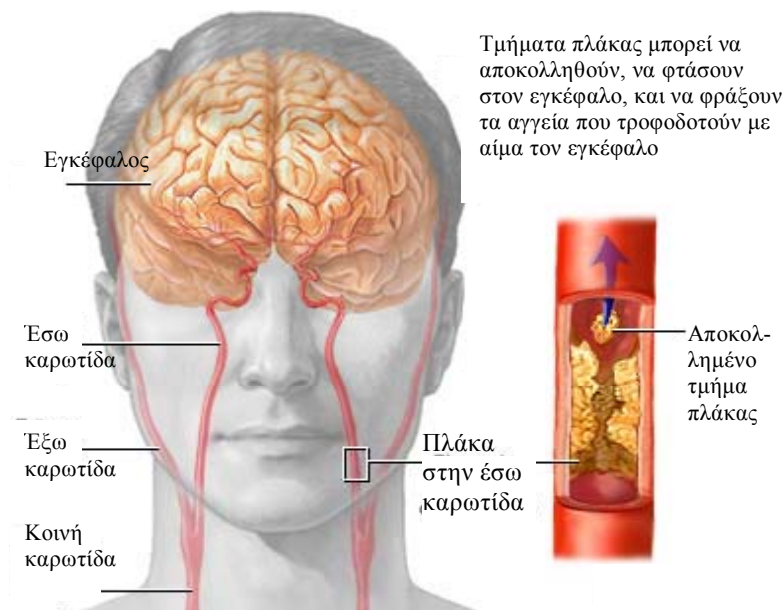
Η αθηρωμάτωση μπορεί να οριστεί ως μία αρτηριακή αλλοίωση που χαρακτηρίζεται από μορφολογικές αλλαγές του εσωτερικού στρώματος του αρτηριακού τοιχώματος (intima) [5]. Σε αυτές τις αλλαγές περιλαμβάνονται η ταχεία ανάπτυξη λείων μυϊκών κυττάρων, η εναπόθεση λιπιδίων και η συσσώρευση συνδετικού ιστού [9]. Οι αθηρωματικές πλάκες, που συναντούνται συνήθως σε μεγάλου και μεσαίου μεγέθους ελαστικές και μυϊκές αρτηρίες, μπορεί να οδηγήσουν σε καρδιακή ή εγκεφαλική ισχαιμία [10].

1.1.2. Ανατομία και φυσιολογία

Η δεξιά και αριστερή καρωτίδα είναι υπεύθυνες για την τροφοδότηση του εγκεφάλου με αίμα [11] (Σχήμα 1-1). Βρίσκονται μέσα στους ιστούς του λαιμού και μπορούν να ψηλαφιστούν αν πιέσουμε ελαφρά κατά μήκος κάθε πλευράς της τραχείας μέχρι να αισθανθούμε παλμό. Κάθε κοινή καρωτίδα χωρίζεται σε δύο διακλαδώσεις, την έξω και την έσω καρωτίδα. Οι έξω καρωτίδες τροφοδοτούν με αίμα το λαιμό, το φάρυγγα, το λάρυγγα, την κάτω σιαγόνα και το πρόσωπο. Οι έσω καρωτίδες εισέρχονται στην κρανιακή χώρα και τροφοδοτούν με αίμα τον εγκέφαλο [5].

Η παρουσία αθηρωμάτωσης στις καρωτίδες μπορεί να επιφέρει διαταραχές στην ομαλή κυκλοφορία του αίματος και στην τροφοδότηση του εγκεφάλου με αυτό.

Η αθηρωμάτωση στην καρωτίδα (Σχήμα 1-2) μπορεί να προκαλέσει στένωση της καρωτίδας με πιθανότητες πρόκλησης θρομβοεμβολής. Η στένωση υποβοηθάει τη συγκόλληση των ερυθρών αιμοσφαιρίων και τη δημιουργία μικρών εμβόλων τα οποία με τη ροή του αίματος εισχωρούν και είναι πιθανό να φράξουν κάποια μικρότερη αρτηρία. Αν ο θρόμβος είναι μικρού μεγέθους η εμπλοκή μπορεί να καθαρίσει γρήγορα προκαλώντας ένα παροδικό ισχαιμικό επεισόδιο ή ένα ήπιο εγκεφαλικό. Σε αντίθετη περίπτωση μπορεί να έχουμε ένα σοβαρό εγκεφαλικό επεισόδιο με πρόκληση μόνιμων προβλημάτων, όπως παράλυση και απώλεια ομιλίας [5].



Σχήμα 1-1 Η τροφοδοσία του εγκεφάλου με αίμα, μέσω της κοινής καρωτίδας.



Παράδειγμα απεικόνισης αθηρωματικής πλάκας στην κοινή καρωτίδα.



Παράδειγμα απεικόνισης αθηρωματικής πλάκας στην έσω καρωτίδα.

Σχήμα 1-2. Παραδείγματα απεικονίσεων με υπερήχους β-σάρωσης.

1.1.3. Η αστάθεια της αθηρωματικής πλάκας στην καρωτίδα

Η στένωση της καρωτίδας αποτελεί το σημαντικότερο γνωστό παράγοντα πρόκλησης εγκεφαλικής ισχαιμίας στην έσω καρωτίδα. Εντούτοις, μόνο ένα πολύ μικρό ποσοστό των ασθενών με αθηρωμάτωση στην καρωτίδα έχουν προειδοποιητικά συμπτώματα, αφού στην πλειοψηφία τους τα εγκεφαλικά επεισόδια προκαλούνται από ασυμπτωματικές πλάκες στην καρωτίδα [12]. Η διάκριση μεταξύ συμπτωματικών, ή ασταθών, και ασυμπτωματικών, ή ευσταθών, αθηρωματικών πλακών είναι σημαντική για την πρόληψη εγκεφαλικών επεισοδίων.

Η αστάθεια της πλάκας στην καρωτίδα μπορεί να καθοριστεί από παράγοντες όπως ο βαθμός στένωσης του αγγείου [13], [14] και τα χαρακτηριστικά των εικόνων υπερήχων [15]. Σχετίζεται με την παρουσία εμφράγματος στην υπολογιστική τομογραφία εγκεφάλου [16], ενώ στένωση της διαμέτρου του εσωτερικού της αρτηρίας μεγαλύτερη του 70% σχετίζεται με αυξημένο κίνδυνο εμφάνισης εγκεφαλικού επεισοδίου. Επιπλέον, σε ασυμπτωματικούς ασθενείς ηλικίας μεγαλύτερης των 65 ετών, οι πλάκες με χαμηλή φωτεινότητα σε εικόνες υπερήχων β-σάρωσης συνδέονται με εμφάνιση εγκεφαλικού επεισοδίου [5].

1.2. Απεικόνιση της καρωτίδας με χρήση υπερήχων

Η χρήση των υπερήχων στην ιατρική διάγνωση βασίζεται στην εκτίμηση χαρακτηριστικών των ανακλώμενων ή διερχόμενων ηχητικών κυμάτων.

.1.2.1. Φυσικές αρχές υπερήχων

Οι ήχοι είναι διαμήκη ελαστικά κύματα που δημιουργούνται από την περιοδική μεταβολή της πυκνότητας του υλικού μέσου εντός του οποίου διαδίδονται. Ανάλογα με τη συχνότητά τους f διακρίνονται σε υπόηχους ($f < 20\text{Hz}$), ακουστούς ήχους ($20\text{Hz} < f < 20000\text{Hz}$) και υπέρηχους ($f > 20000\text{Hz}$). Οι διαγνωστικοί υπέρηχοι έχουν συχνότητες στην περιοχή 1-50MHz. Η μικροσκοπία υπερήχων χρησιμοποιεί συχνότητες μέχρι την περιοχή των 200MHz για την εξέταση δομών μέσα στα κύτταρα [17].

1.2.2. Αλληλεπίδραση υπερήχων με βιολογικούς ιστούς

Οι υπέρηχοι αλληλεπιδρούν με τους βιολογικούς ιστούς με ποικίλους τρόπους και τα αποτελέσματα αυτών των αλληλεπιδράσεων καθορίζουν τον τύπο των ηχητικών κυμάτων που καταγράφονται για διάγνωση [18]. Στις αλληλεπιδράσεις αυτές περιλαμβάνονται φαινόμενα ανάκλασης, σκέδασης, απόσβεσης, παρεμβολής, απόκλισης και απορρόφησης. Με εξαίρεση την παρεμβολή, η οποία μπορεί να αυξήσει ή να μειώσει την ένταση του παλμού, σε όλες τις υπόλοιπες αλληλεπιδράσεις η ένταση του παλμού μειώνεται. Το φαινόμενο αυτό καλείται εξασθένηση. Η εξασθένηση της έντασης του παλμού μειώνεται με αύξηση του βάθους διείσδυσης μέσω του τύπου [18]:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x} \quad (1.1)$$

όπου I είναι η ένταση του υπέρηχου στο υπό εξέταση σημείο, I_0 η αρχική ένταση, x η απόσταση που διανύει ο παλμός και μ ο συντελεστής εξασθένησης. Ο συντελεστής εξασθένησης εξαρτάται από το υλικό του ιστού, οπότε για διαφορετικά υλικά έχουμε διαφορετικό ποσοστό εξασθένησης της έντασης του παλμού. Επίσης, η εξασθένηση του παλμού, από την οποία καθορίζεται το βάθος διείσδυσης του υπερηχητικού κύματος, εξαρτάται από τη συχνότητα του κύματος. Όσο υψηλότερη είναι η συχνότητα του υπερηχητικού κύματος τόσο μεγαλύτερη είναι η εξασθένηση που αυτό υφίσταται και μικρότερο το βάθος διείσδυσης [5].

Στις πιο σημαντικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ διαγνωστικών υπερήχων και βιολογικών ιστών περιλαμβάνονται η ανάκλαση και η σκέδαση. Η ανάκλαση συμβαίνει όταν ένα υπερηχητικό κύμα προσκρούει σε μία διεπιφάνεια της οποίας η χαρακτηριστική διάσταση είναι μεγαλύτερη από το μήκος κύματος του κύματος [18]. Οι διεπιφάνειες αυτές ονομάζονται φασματικοί ανακλαστήρες και είναι υπεύθυνες για την απεικόνιση των περιγραμμάτων βασικών οργάνων στις διαγνωστικές υπερηχητικές εξετάσεις. Η σκέδαση συμβαίνει όταν ένας παλμός υπέρηχου προσπίπτει σε επιφάνειες με διαστάσεις μικρότερες από το μήκος κύματος του υπέρηχου [18]. Κάθε μεμονωμένη διεπιφάνεια λειτουργεί σαν νέα, ξεχωριστή πηγή ήχου, ενώ ο ήχος ανακλάται προς όλες τις κατευθύνσεις. Στη σκέδαση οφείλουμε τη δυνατότητα απεικόνισης της εσωτερικής υφής των οργάνων [18].

Το ποσοστό του ήχου που ανακλάται από τη διεπιφάνεια εξαρτάται από την ακουστική εμπέδηση των δύο υλικών που διαχωρίζονται από τη διεπιφάνεια. Η ακουστική εμπέδηση ενός υλικού δίνεται από τον τύπο:

$$Z = \rho \cdot u \quad (1.2)$$

όπου Z η ακουστική εμπέδηση, ρ η πυκνότητα του υλικού και u η ταχύτητα του ήχου διαμέσου του υλικού. Η εμπέδηση αποτελεί ένα μέτρο της αντίστασης που συναντά ο ήχος κατά τη διέλευσή του από ένα υλικό [5]. Ο συντελεστής ανάκλασης πλάτους R_A (ή ενέργειας R_I) ορίζεται ως το ποσοστό του πλάτους (ή της ενέργειας) της προσπίπτουσας δέσμης που ανακλάται και εξαρτάται από το λόγο των ακουστικών εμπεδήσεων των δύο μέσων [8]:

$$R_A = \frac{1 - Z_1/Z_2}{1 + Z_1/Z_2} \quad (1.3)$$

$$R_I = \left(\frac{1 - Z_1/Z_2}{1 + Z_1/Z_2} \right)^2 \quad (1.4)$$

Πίνακας 1-1

Χαρακτηριστικές παράμετροι

Υλικό Μέσο	Ταχύτητα Διάδοσης (m/sec)	Ακουστική Εμπέδηση (106 kgr/m.sec)	Εξασθένιση (dB/cm για 1MHz)
Αέρας	330	0,0004	12
Νερό	1480	1,48	0,002
Λίπος	1450	1,38	0,63
Αίμα	1570	1,61	0,18
Μαλακοί Ιστοί	1540	1,63	0,70
Μύες	1580	1,70	1,3-3,3
Οστά	4080	7,80	15

Στην περίπτωση των αθηρωματικών πλακών, οι υπέρηχοι μας παρέχουν μία οπτικοποιημένη εκδοχή των εσωτερικών και εξωτερικών τοιχωμάτων της αρτηρίας [5].

1.2.3. Μέθοδοι απεικόνισης υπερήχων

Τα κύματα υπερήχων χαρακτηρίζονται από το πλάτος και τη συχνότητά τους. Οι τεχνικές υπερηχητικής απεικόνισης αναλύουν κυρίως το πλάτος, ενώ τα εργαλεία που στηρίζονται στο φαινόμενο Doppler αναλύουν τη συχνότητα των αντηχήσεων [5].

Η απλούστερη μέθοδος παρουσίασης των αντηχήσεων είναι η A-mode (Amplitude mode), στην οποία ο άξονας x του παλμογράφου αντιπροσωπεύει το βάθος διείσδυσης και ο άξονας y το πλάτος των λαμβανόμενων σημάτων. Η μέθοδος αυτή παρέχει πληροφορίες κατά μήκος μίας «ακτίνας» και χρησιμοποιείται για τη μέτρηση βασικών ανατομικών χαρακτηριστικών με γραμμικές διαστάσεις [17].

Στη μέθοδο B-mode (Brightness mode), το πλάτος μίας αντήχησης αντιπροσωπεύεται από ένα σημείο ανάλογης φωτεινότητας ή απόχρωσης του γκρι (gray scale display) στην αντίστοιχη γεωμετρική του θέση, με αποτέλεσμα την απεικόνιση μίας τομής του σώματος [17].

Η τεχνική M-mode (Motion mode) αποτελεί συνδυασμό των δύο προηγούμενων μεθόδων. Η απόσταση μέσα στον ασθενή αντιπροσωπεύεται από την κάθετη ακτίνα και το πλάτος της αντήχησης από ένα σημείο κατάλληλης φωτεινότητας. Η κάθετη ακτίνα μετακινείται κατά μήκος της οριζόντιας διάστασης με σταθερή ταχύτητα, με αποτέλεσμα οι ακίνητες δομές να προκαλούν ανακλάσεις στο ίδιο σημείο, ενώ οι κινούμενες δομές να παράγουν ένα γράφημα της κίνησής τους [17].

Τα συστήματα Doppler των υπερήχων εκμεταλλεύονται το φαινόμενο Doppler, δηλαδή τη μεταβολή της παρατηρούμενης συχνότητας ενός κύματος λόγω της σχετικής κίνησης πομπού-δέκτη. Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της ταχύτητας και του όγκου της ροής του αίματος στην καρδιά και τα αγγεία. Οι κυριότεροι ανακλαστές των υπερήχων στο αίμα είναι τα ερυθρά αιμοσφαίρια, η κατανομή της ταχύτητας των οποίων μπορεί να προσδιοριστεί με την εκτίμηση της συχνότητας μετατόπισης Doppler. Στην απεικόνιση με χρήση του φαινομένου Doppler χρησιμοποιούμε συνεχές κύμα για καταγραφή πολύ μικρών ταχυτήτων και παλμικό Doppler για εκτίμηση της κατανομής της ταχύτητας του

αίματος. Τέλος, στην έγχρωμη απεικόνιση Doppler τοποθετούνται πύλες κατά μήκος της δέσμης σε ολόκληρο το πεδίο σάρωσης και κωδικοποιώντας με χρώματα τις μετρούμενες ταχύτητες επιτυγχάνεται η έγχρωμη απεικόνιση της αιματικής ροής σε πραγματικό χρόνο, με τη σύγχρονη απεικόνιση της ανατομίας των περιβαλλόντων ιστών (εικόνα B-mode) [17].

1.2.4. Αρτηριακές υπερηχοτομογραφικές μετρήσεις

1.2.4.1. Βαθμός στένωσης

Η υπερηχοτομογραφική απεικόνιση μας επιτρέπει να εκτιμήσουμε έναν αριθμό παραμέτρων οι οποίες σχετίζονται με την αθηρωματική πλάκα. Σε αυτές περιλαμβάνονται ο βαθμός της στένωσης, οι αιμοδυναμικές παράμετροι και η μορφολογία της πλάκας. Ο βαθμός μίας μικρής, ενδιάμεσης ή σοβαρής στένωσης μπορεί να υπολογιστεί από μία εικόνα υπερήχων β-σάρωσης ή από μετρήσεις της ταχύτητας του αίματος στην περιοχή όπου έχουμε τη μεγαλύτερη στένωση του εσωτερικού της αρτηρίας. Προβλήματα μπορεί να υπάρξουν κατά τη διαφορική διάγνωση ενός υψηλού βαθμού στένωσης από πλήρες έμφραγμα. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιείται έγχρωμη απεικόνιση Doppler, όπου μπορεί να επισημανθεί μία πολύ χαμηλή ροή αίματος [5].

Ο βαθμός της στένωσης μπορεί να προσδιορίσει την πιθανότητα που έχει μία αθηρωματική πλάκα στην καρωτίδα να προκαλέσει ένα εγκεφαλικό επεισόδιο (σύμπτωμα) [19], [20], θεωρώντας πλάκες που προκαλούν υψηλό βαθμό στένωσης επίφοβες για πρόκληση συμπτωμάτων. Εντούτοις, οι περισσότεροι ασθενείς με νευρολογικά συμπτώματα παρουσιάζουν στένωση μικρότερη του 50% στην καρωτίδα [21]. Επίσης, η πλειοψηφία των ασυμπτωματικών ασθενών με υψηλό βαθμό στένωσης παραμένει ασυμπτωματική [22]. Διαφαίνεται συνεπώς η ανάγκη καθορισμού επιπρόσθετων παραμέτρων χαρακτηρισμού και κατηγοριοποίησης των αθηρωματικών πλακών.

1.2.4.2. Αιμοδυναμικές παράμετροι

Οι αιμοδυναμικές παράμετροι μπορούν να υπολογιστούν από ηχοτομογραφία Doppler. Σε αυτές περιλαμβάνονται η κατεύθυνση της ροής, η διαταραχή της ροής και η ταχύτητα της ροής. Επιπρόσθετες παράμετροι μπορούν να προκύψουν από το φάσμα Doppler. Ο όγκος ροής μπορεί να καθοριστεί αν πολλαπλασιάσουμε το εμβαδόν της εγκάρσιας τομής του εσωτερικού μέρους της αρτηρίας με τη μέση τιμή της ταχύτητας, ενώ η περιφερειακή αντίσταση μπορεί επίσης να εκτιμηθεί από το φάσμα Doppler και γνώση της πίεσης του αίματος [5].

1.2.4.3. Μορφολογία πλάκας

Η υπερηχοτομογραφία β-σάρωσης είναι πολύ χρήσιμη στην εκτίμηση της μορφολογίας της αθηρωματικής πλάκας. Σε συνδυασμό με το βαθμό της στένωσης αποτελεί παράγοντα καθοριστικής σημασίας για την εκτίμηση της σοβαρότητας της αλλοίωσης. Η μορφολογία της πλάκας μπορεί να εκτιμηθεί από τις παρακάτω παραμέτρους:

- **Ομοιογένεια / ετερογένεια της πλάκας.** Οι ομογενείς πλάκες χαρακτηρίζονται από ενιαίας τιμής αντηχήσεις υψηλού ή μεσαίου επιπέδου, ενώ οι ετερογενείς από συνδυασμό υψηλών, μεσαίων ή χαμηλών επιπέδων. Συχνά υπάρχει μία περιοχή μέσα στην πλάκα η οποία έχει την ίδια ηχογένεια με το αίμα [23].
- **Ηχογένεια / Μη-ηχογένεια της πλάκας.** Οι ηχογενείς πλάκες αντανακλούν ισχυρά το σήμα του υπερήχου, ενώ οι μη-ηχογενείς έχουν μειωμένη ανακλαστική ικανότητα. Η ηχογένεια σχετίζεται με την παρουσία ινώδους ιστού και ασβέστωσης μέσα στην πλάκα, ενώ η μη-ηχογένεια με την παρουσία λιπιδίων και θρόμβων [12], [24].
- **Ανάλυση υφής της πλάκας.** Η ανάλυση της υφής αναφέρεται στην κατηγοριοποίηση συγκεκριμένων χαρακτηριστικών της ψηφιακής εικόνας και την εκτίμηση στατιστικών παραμέτρων οι οποίες σχετίζονται με το σχήμα και την οριοθέτηση αυτών των χαρακτηριστικών [6].

- **Χαρακτηριστικά επιφάνειας της πλάκας.** Η παρουσία ρωγμών στην επιφάνεια της πλάκας αποτελεί ένδειξη ύπαρξης σύνθετης ή ενισχυμένης αλλοίωσης [9]. Υπερηχοτομογραφικώς, μία τομή είναι μία ανωμαλία ή μία ρωγμή στην ηχοανακλαστική επιφάνεια της πλάκας [24].

Γενικά, μπορούμε να πούμε ότι λείες επιφάνειες, ηχωγένεια και ομογενής υφή χαρακτηρίζουν σταθερές πλάκες, ενώ ανώμαλες επιφάνειες, μη-ηχωγένεια και ετερογενής υφή τις εν δυνάμει ασταθείς πλάκες [25].

1.3. Υπερηχοτομογραφικές μελέτες αθηρωμάτωσης καρωτίδας

Οι μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί μέχρι τώρα και σχετίζονται με την αθηρωματική πλάκα στην καρωτίδα τείνουν σε δύο αρκετά γενικές αλλά διακριτές κατευθύνσεις. Στην πρώτη κατεύθυνση εντάσσονται αυτές που αφορούν την ανάλυση της μορφολογίας της πλάκας και προσπαθούν να εξαγάγουν δεδομένα τα οποία σχετίζονται με την ιστολογία της. Γίνεται δηλαδή σύγκριση των υπολογισμών πάνω στην ομοιογένεια, την ηχωγένεια και την υφή της πλάκας με τα ιστολογικά αποτελέσματα της ενδαρτηρεκτομής.

1.3.1. Μελέτες συσχέτισης με ιστολογία

Οι El-Barghouty et al. [26] βρήκαν ότι υπάρχει άμεση συσχέτιση μεταξύ της ενδιάμεσης ηχωγένειας της αθηρωματικής πλάκας και του περιεχόμενου ινώδους ιστού, καθώς και μία αντίστροφη σχέση συσχέτισης με τα περιεχόμενα μαλακά υλικά [1].

Στη μελέτη των J.E.Wilhjelm et al. [1] δε φάνηκε να υπάρχει σημαντική συσχέτιση μεταξύ των στατιστικών παραμέτρων υφής πρώτης και δεύτερης τάξης με την ιστολογία. Τα αποτελέσματα σχετίζονταν με σφάλματα τα οποία ήταν συγκρίσιμα με τη μεταβολή των υλικών που περιείχαν οι διάφορες πλάκες. Επιπλέον, ο μικρός αριθμός εικόνων, η ελλιπής πρόσβαση σε δεδομένα υπερήχων πρωτογενούς επεξεργασίας και οι περιορισμοί της απεικόνισης με υπερήχους β-σάρωσης

(γεωμετρικές επιπτώσεις, σκέδαση κτλ.) δεν συνέβαλαν στην πρόβλεψη μαλακών και ασβεστούχων όγκων.

Στη μελέτη των Rakebrandt et al. [27] έγινε προσπάθεια να συσχετιστούν διαφορετικοί τύποι υφής με τα περιεχόμενα των ιστολογικών χαρτών της πλάκας, στους οποίους φαίνεται η χωρική κατανομή των συστατικών της. Βάσει της υφής ενός τμήματος της πλάκας και της αντιστοιχίας του σε κάποιο υλικό, στοιχειοθετούνται πέντε κατηγορίες υφής ανάλογες της ελαστινής, των ζωικών ινών, του ασβεστίου, της αιμορραγίας και των λιπιδίων, λαμβάνοντας έτσι ποιοτικά αποτελέσματα ως προς τη σημασία της υφής για την πρόβλεψη της χωρικής κατανομής των συστατικών της πλάκας. Χρησιμοποιήθηκαν στατιστικές μετρήσεις και μετρήσεις υφής, συμπεριλαμβανομένων των στατιστικών παραμέτρων 1^{ης} και 2^{ης} τάξης.

Τέλος, οι Sayed et al. [28] αναζήτησαν τη συσχέτιση που υπάρχει ανάμεσα στη μέση τιμή του επιπέδου φωτεινότητας και την ιστολογία της πλάκας, προβαίνοντας και σε κατηγοριοποίηση των περιπτώσεων. Η μελέτη τους συνδυάζει τις δύο γενικές κατευθύνσεις έρευνας.

1.3.2. Μελέτες ταξινόμησης

Στη δεύτερη κατεύθυνση ανήκουν οι μελέτες εκείνες που στόχο έχουν τη διαφοροποίηση των περιπτώσεων των ασθενών σε συμπτωματικούς και ασυμπτωματικούς, ενταγμένες στην προσπάθεια πρόληψης εγκεφαλικών επεισοδίων. Στη μελέτη των Christodoulou et al. [25], σε δείγμα 76 συμπτωματικών πλακών και 90 ασυμπτωματικών, υπολογίστηκε απευθείας από την υπερηχοτομογραφική εικόνα της κάθε πλάκας ένας μεγάλος αριθμός χαρακτηριστικών υφής (Στατιστικές Παράμετροι 1^{ης} Τάξης, Μητρώα Χωρικής Εξάρτησης των Επιπέδων του Γκρι, Στατιστικές Παράμετροι Διαφορών των Επιπέδων του Γκρι, Μητρώα Στατιστικών Χαρακτηριστικών, Μετρήσεις Ενέργειας Υφής του Laws, Ανάλυση Υφής Κλασματικής Διάστασης, Φάσμα Ισχύος Fourier), ο οποίος υπέστη επεξεργασία μέσω νευρωνικού δικτύου και επιχειρήθηκε ταξινόμηση σε διαφορετικές ομάδες.

Ποσοτικοί υπολογισμοί σε εικόνες υπερήχων, με έμφαση στις στατιστικές παραμέτρους $1^{η}$, έχουν καταγραφεί ως επιτυχείς στον αντικειμενικό χαρακτηρισμό αθηρωματικών πλακών σε αρκετές μελέτες [29], [30]. Οι Mazzone et al. [31] έχουν στηρίξει την τελική ταξινόμηση στις παραμέτρους της μέσης τιμής, της σταθερής απόκλισης, της λοξότητας, της κύρτωσης και της εντροπίας ($2^{η}$ τάξης), επιχειρώντας σε ένα πρώτο επίπεδο την ταξινόμηση της πλάκας συναρτήσει της ομοιογένειάς της. Οι Biasi et al. [32] επικεντρώνονται σε ταξινόμηση με βάση την ενδιάμεση τιμή της κλίμακας φωτεινότητας, η οποία μάλιστα έδωσε καλύτερα αποτελέσματα από το βαθμό στένωσης. Σε αυτή την παράμετρο στηρίζονται και οι Tegos et al. [33], οι οποίοι συσχετίζουν τη χαμηλή ενδιάμεση τιμή με τα συμπτωματικά δεδομένα, καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι οι συμπτωματικές αθηρωματικές πλάκες στην καρωτίδα τείνουν να είναι πιο ομογενείς σε σχέση με τις ασυμπτωματικές. Επιπλέον, η ταξινόμηση μπορεί να έχει καλύτερα αποτελέσματα αν πραγματοποιηθεί κανονικοποίηση (normalization) των εικόνων υπερήχων [34].

Οι Asvestas et al. [35] χρησιμοποίησαν στην έρευνά τους την κλασματική διάσταση της πλάκας, επιτυγχάνοντας σημαντική διαφοροποίηση μεταξύ των δύο κατηγοριών (συμπτωματικοί – ασυμπτωματικοί), αφού επισήμαναν την ιδιαίτερος χαμηλή τιμή της κλασματικής διάστασης στις περιπτώσεις των ασυμπτωματικών ατόμων.

Οι El-Barghouty et al. [36] υπολόγισαν την ηχωγένεια που σχετίζεται με την πλάκα και βρήκαν ότι οι πλάκες με χαμηλή ενδιάμεση τιμή φωτεινότητας (gray-scale median) σχετίζονταν με συχνότερη εμφάνιση εγκεφαλικών εμφράκτων, που διαπιστώθηκαν με απεικόνιση υπολογιστικής τομογραφίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΑΝΑΛΥΣΗ ΥΦΗΣ ΚΑΙ ΕΠΙΛΟΓΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΣΕ ΙΑΤΡΙΚΕΣ ΕΙΚΟΝΕΣ

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται, κατά τον ορισμό της έννοιας της υφής ψηφιακών εικόνων, οι πιο σημαντικές μέθοδοι ανάλυσης της υφής και εξαγωγής χαρακτηριστικών παραμέτρων. Επιπλέον, παρουσιάζονται οι σημαντικότερες μέθοδοι επιλογής χαρακτηριστικών, με έμφαση στις μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία για την εκλογή των βέλτιστων χαρακτηριστικών υφής για τη διάκριση μεταξύ συμπτωματικών και ασυμπτωματικών πλακών καρωτίδας (Κεφάλαιο 4).

2.1. Ορισμός της υφής

Η έννοια της υφής στην καθημερινή ζωή σχετίζεται με την αίσθηση που δημιουργείται από την επαφή μας με κάποιο υλικό σώμα. Αποτελεί χαρακτηριστική ιδιότητα της επιφάνειας ενός υλικού και καθορίζεται από τη δομή της επιφάνειας.

Στις ψηφιακές εικόνες δεν υπάρχει αυστηρός ορισμός της έννοιας της υφής. Η υφή σε αυτές σχετίζεται με τις διάφορες τιμές φωτεινότητας και τη χωρική κατανομή των αντιστοιχών εικονοστοιχείων (pixels), με τρόπο τέτοιο ώστε η διάταξη των διαφόρων σχημάτων να μας δίνει την αίσθηση του τρισδιάστατου και του ανάγλυφου της υφής της επιφανείας. Σε προσπάθεια εύρεσης ενός πιο σαφή ορισμού, η υφή προσδιορίστηκε μέσω των εξής παραμέτρων [6] [37]:

- Αδρότητα (Coarseness)
- Αντίθεση (Contrast)
- Τραχύτητα (Roughness)
- Κανονικότητα (Regularity)
- Περιοδικότητα (Periodicity)
- Ινώδες (Line-lightness)
- Κατευθυντικότητα (Directionality)

Η υφή των ψηφιακών εικόνων είναι άμορφη και κυτταρική. Το είδος αυτό της υφής το εξετάζουμε σαν ένα φαινόμενο οργανωμένης περιοχής της εικόνας. Όταν το εξετάσουμε μικροσκοπικά, έχει δύο βασικές διαστάσεις βάσει των οποίων μπορεί να περιγραφεί. Η πρώτη διάσταση αφορά τους πρωταρχικούς σχηματισμούς επιπέδων φωτεινότητας / επιπέδων του γκρι (gray level primitives) ή τις τοπικές ιδιότητες που στοιχειοθετούν την υφή. Η δεύτερη διάσταση αφορά τη χωρική οργάνωση των πρωταρχικών σχηματισμών των επιπέδων φωτεινότητας. Η υφή δεν μπορεί να αναλυθεί αν δεν υπάρχει ένα πλαίσιο αναφοράς όπου ένας πρωταρχικός σχηματισμός των επιπέδων φωτεινότητας αναφέρεται ή υπονοείται. Όταν σε μία μικρή περιοχή της εικόνας υπάρχει μικρή διαφοροποίηση των σχηματισμών αυτών, το κυρίαρχο στοιχείο της περιοχής είναι το επίπεδο φωτεινότητας. Όταν στην περιοχή υπάρχει μεγάλη διαφοροποίηση των σχηματισμών, το κυρίαρχο στοιχείο είναι η υφή [6].

2.2. Μέθοδοι ανάλυσης της υφής

2.2.1. Στατιστικές μέθοδοι 1^{ης} τάξης (First-order statistics)

Οι στατιστικές μέθοδοι 1^{ης} τάξης αφορούν μεγέθη όπως η μέση τιμή, η μεσαία τιμή, η τυπική απόκλιση και οι ροπές 1^{ης}, 2^{ης} και 3^{ης} τάξης. Βασίζονται στην κατανομή των εικονοστοιχείων στις διάφορες τιμές φωτεινότητας. Το πλεονέκτημα της χρησιμοποίησης του ιστογράμματος της εικόνας είναι η απλότητα στους υπολογισμούς. Εντούτοις, οι στατιστικές αυτές μέθοδοι δεν παρέχουν περιγραφή της αλληλεπίδρασης μεταξύ των εικονοστοιχείων. Οι στατιστικές παράμετροι 1^{ης} τάξης είναι οι εξής [1]:

- Ελάχιστη τιμή φωτεινότητας (*Minimal gray level*)

$$f_1 = \min \{I(x, y)\} \quad (2.1)$$

- Μέγιστη τιμή φωτεινότητας (*Maximal gray level*)

$$f_2 = \max\{I(x, y)\} \quad (2.2)$$

- Ενδιάμεση τιμή φωτεινότητας (*Median gray level*)

$$f_3 \text{ τέτοιο ώστε } \sum_{g=0}^{f_3} H(g) = 0,5 \quad (2.3)$$

- Μέση τιμή φωτεινότητας (*Mean gray level*)

$$f_4 = \sum_g gH(g) \quad (2.4)$$

- Σταθερή απόκλιση φωτεινότητας (*Standard deviation of gray levels*)

$$f_5 = \sqrt{\sum_g (g - f_4)^2 H(g)} \quad (2.5)$$

- Συντελεστής απόκλισης (*Coefficient of variation*)

$$f_6 = \frac{f_5}{f_4} \quad (2.6)$$

- Λοξότητα επιπέδων του γκρι / φωτεινοτήτων (*Gray level skewness*)

$$f_7 = \frac{1}{f_5^3} \sum_g (g - f_4)^3 H(g) \quad (2.7)$$

- Κύρτωση επιπέδων του γκρι / φωτεινοτήτων (*Gray level kurtosis*)

$$f_8 = \frac{1}{f_5^4} \sum_g (g - f_4)^4 H(g) - 3 \quad (2.8)$$

- Ενέργεια επιπέδων του γκρι / φωτεινοτήτων (*Gray level energy*)

$$f_9 = \sum_g H(g)^2 \quad (2.9)$$

- Εντροπία επιπέδων του γκρι / φωτεινοτήτων (*Gray level entropy*)

$$f_{10} = -\sum_g H(g) \ln(H(g)) \quad (2.10)$$

▪ Ποσοστά

$$f_{11} \text{ τέτοιο ώστε } \sum_{g=0}^{f_{11}} H(g) = 0,1 \quad (2.11)$$

$$f_{12} \text{ τέτοιο ώστε } \sum_{g=0}^{f_{12}} H(g) = 0,25 \quad (2.12)$$

$$f_{13} \text{ τέτοιο ώστε } \sum_{g=0}^{f_{13}} H(g) = 0,5 \quad (2.13)$$

$$f_{14} \text{ τέτοιο ώστε } \sum_{g=0}^{f_{14}} H(g) = 0,75 \quad (2.14)$$

$$f_{15} \text{ τέτοιο ώστε } \sum_{g=0}^{f_{15}} H(g) = 0,9 \quad (2.15)$$

▪ Πλάτος ιστογράμματος (*Histogram width*)

$$f_{16} = f_{15} - f_{11} \quad (2.16)$$

Τα μεγέθη g και $H(g)$ που εμφανίζονται στους παραπάνω τύπους αντιστοιχούν σε τιμές φωτεινότητας ($0 \leq g \leq 255$) και στο ποσοστό το οποίο αντιστοιχεί στον αριθμό των εικονοστοιχείων μιας τιμής φωτεινότητας, αντίστοιχα.

2.2.2. Μητρώα συνεμφάνισης (Co-occurrence matrices)

Η συνεμφάνιση των επιπέδων φωτεινότητας μπορεί να προσδιοριστεί σε ένα πίνακα από σχετιζόμενες συχνότητες P_{ij} , όπου σημειώνονται οι εμφανίσεις δύο εικονοστοιχεία με τιμές φωτεινότητας i και j αντίστοιχα, τα οποία απέχουν μεταξύ τους απόσταση d . Τέτοιοι πίνακες χωρικά εξαρτώμενων συχνοτήτων επιπέδων φωτεινότητας είναι συμμετρικοί και αποτελούν μία συνάρτηση της γωνιακής σχέσης δύο γειτονικών εικονοστοιχείων, καθώς και μία συνάρτηση της απόστασης μεταξύ αυτών. Για γωνιακή σχέση 0° , προκύπτει ο μέσος όρος της πιθανότητας μίας μετάβασης από τα αριστερά προς τα δεξιά, από ένα επίπεδο φωτεινότητας i σε ένα επίπεδο φωτεινότητας j αντίστοιχα.

(1,1)	(1,2)	(1,3)	(1,4)
(2,1)	(2,2)	(2,3)	(2,4)
(3,1)	(3,2)	(3,3)	(3,4)
(4,1)	(4,2)	(4,3)	(4,4)

$$L_x = \{1,2,3,4\}, L_y = \{1,2,3,4\}$$

$$\begin{aligned}
 R_H = & \{((k,l), (m,n)) \in (L_y \times L_x) \times (L_y \times L_x) \mid k-m=0, \mid l-n \mid = 1\} \\
 = & \{((1,1),(1,2)), ((1,2),(1,1)), ((1,2),(1,3)), ((1,3),(1,2)), \\
 & ((1,3),(1,4)), ((1,4),(1,3)), ((2,1),(2,2)), ((2,2),(2,1)), \\
 & ((2,2),(2,3)), ((2,3),(2,2)), ((2,3),(2,4)), ((2,4),(2,3)), \\
 & ((3,1),(3,2)), ((3,2),(3,1)), ((3,2),(3,3)), ((3,3),(3,2)), \\
 & ((3,3),(3,4)), ((3,4),(3,3)), ((4,1),(4,2)), ((4,2),(4,1)), \\
 & ((4,2),(4,3)), ((4,3),(4,2)), ((4,3),(4,4)), ((4,4),(4,3))\}
 \end{aligned} \tag{2.17}$$

Σχήμα 2-1. Σύνολο γειτονικών κελιών με μοναδιαία οριζόντια απόσταση σε εικόνα με μέγεθος 4x4

Για γωνίες κβαντισμένες σε τμήματα των 45° (Σχήμα 2-2) οι μη-κανονικοποιημένες συχνότητες καθορίζονται από τις εξής σχέσεις:

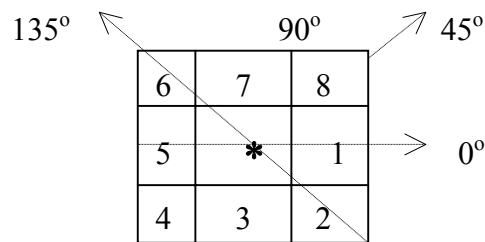
$$\begin{aligned}
 P(i,j,d,0^\circ) = & \# \{[(k,l), (m,n)] \mid \\
 & k-m=0, \mid l-n \mid = d \\
 & I(k,l) = i, I(m,n) = j\}
 \end{aligned} \tag{2.18}$$

$$\begin{aligned}
 P(i,j,d,45^\circ) = & \# \{[(k,l), (m,n)] \mid \\
 & (k-m=d, l-n=-d) \\
 & \text{ή } (k-m=-d, l-n=d) \\
 & I(k,l) = i, I(m,n) = j\}
 \end{aligned} \tag{2.19}$$

$$\begin{aligned}
 P(i,j,d,90^\circ) = & \# \{[(k,l), (m,n)] \mid \\
 & \mid k-m \mid = d, \mid l-n \mid = 0 \\
 & I(k,l) = i, I(m,n) = j\}
 \end{aligned} \tag{2.20}$$

$$\begin{aligned}
 P(i,j,d,135^\circ) = & \# \{[(k,l), (m,n)] \mid \\
 & (k-m=d, l-n=d) \\
 & \text{ή } (k-m=-d, l-n=-d) \\
 & I(k,l) = i, I(m,n) = j\}
 \end{aligned} \tag{2.21}$$

όπου με # συμβολίζεται ο αριθμός των στοιχείων του συνόλου.



Σχήμα 2-2. Τα κελιά ανάλυσης 1 και 5 είναι τα πλησιέστερα γειτονικά σε γωνία 0° (οριζόντια) ως προς το κελί ανάλυσης *. τα κελιά ανάλυσης 2 και 6 είναι τα πλησιέστερα γειτονικά σε γωνία 135° . τα κελιά ανάλυσης 3 και 7 είναι τα πλησιέστερα γειτονικά σε γωνία 90° . και τα κελιά ανάλυσης 4 και 8 είναι τα πλησιέστερα γειτονικά σε γωνία 90° .

Οι πίνακες αυτοί είναι συμμετρικοί, $P(i,j;d,a) = P(i,j;a,d)$. Η μετρική απόσταση ρ σε αυτές τις εξισώσεις μπορεί να καθοριστεί από την εξίσωση $\rho[(k,l),(m,n)] = \max\{|k-m|, |l-n|\}$. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν και άλλες μετρικές αποστάσεις όπως η Ευκλείδεια.

Χρησιμοποιώντας χαρακτηριστικά που υπολογίστηκαν από τα μητρώα συνεμφάνισης, οι Haralick και Bosley [38] πραγματοποίησαν μία σειρά πειραμάτων προσδιορισμού γήινων επιφανειών, με ποσοστά σωστών αποτελεσμάτων 82%-89%.

Το βασικό πλεονέκτημα της προσέγγισης μέσω συνεμφάνισης των επιπέδων του γκρι είναι ότι χαρακτηρίζει τις χωρικές ενδοσχέσεις των επιπέδων του γκρι σε ένα σχέδιο υφής, με τέτοιο τρόπο που να παραμένουν αμετάβλητες μετά από μετασχηματισμούς μονοτονικού επιπέδου του γκρι. Το μειονέκτημα της προσέγγισης είναι ότι δε συλλαμβάνει το θέμα τους σχήματος των πρωταρχικών σχηματισμών των επιπέδων φωτεινότητας. Αυτός είναι και ο λόγος που δεν λειτουργεί καλά σε υφές που συνθέτονται από μεγάλου μεγέθους πρωταρχικούς σχηματισμούς. Επίσης δεν μπορεί να συλλάβει τη χωρική σχέση μεταξύ των πρωταρχικών σχηματισμών, όταν αυτοί είναι περιοχές μεγαλύτερες από ένα εικονοστοιχείο.

0	0	1	1
0	0	1	1
0	2	2	2
2	2	3	3

(α)

Gray Level				
	0	1	2	3
0	#(0,0)	#(0,1)	#(0,2)	#(0,3)
1	#(1,0)	#(1,1)	#(1,2)	#(1,3)
2	#(2,0)	#(2,1)	#(2,2)	#(2,3)
3	#(3,0)	#(3,1)	#(3,2)	#(3,3)

(β)

$$\begin{aligned}
 0^\circ \quad P_H &= \begin{pmatrix} 4 & 2 & 1 & 0 \\ 2 & 4 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 6 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 2 \end{pmatrix} \quad (\gamma) & \quad 90^\circ \quad P_V &= \begin{pmatrix} 6 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 4 & 2 & 0 \\ 2 & 2 & 2 & 2 \\ 0 & 0 & 2 & 0 \end{pmatrix} \quad (\delta) \\
 135^\circ \quad P_{LD} &= \begin{pmatrix} 2 & 1 & 3 & 0 \\ 1 & 2 & 1 & 0 \\ 3 & 1 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 2 & 0 \end{pmatrix} \quad (\epsilon) & \quad 45^\circ \quad P_{SD} &= \begin{pmatrix} 4 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 2 & 0 \\ 0 & 2 & 4 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (\zeta)
 \end{aligned}$$

Σχήμα 2-3. (α) Εικόνα 4x4 με τέσσερις τιμές φωτεινότητας (επίπεδα του γκρι) από 0 έως 3. (β) Γενική μορφή μήτρας χωρικής εξάρτησης των φωτεινότητων για εικόνα με τιμές φωτεινότητας 0-3. Το #(i,j) συμβολίζει τον αριθμό των περιπτώσεων όπου βρίσκονται σε γειτονικές θέσεις φωτεινότητες τιμών i και j. (γ)-(ζ) Υπολογισμός των τεσσάρων μήτρων χωρικής εξάρτησης των επιπέδων του γκρι με μοναδιαία απόσταση.

2.2.3. Στατιστικές μέθοδοι 2^{ης} τάξης (Second-order statistics)

Οι στατιστικές μέθοδοι 2^{ης} τάξης στηρίζονται στα μητρώα συνεμφάνισης των επιπέδων του γκρι. Σε αντίθεση με τις μεθόδους 1^{ης} τάξης, οι μέθοδοι 2^{ης} τάξης δηλώνουν τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ γειτονικών εικονοστοιχείων. Τα χαρακτηριστικά 2^{ης} τάξης φαίνονται παρακάτω [1].

- Ενέργεια (Energy)

$$f_{17} = \sum \sum C(i, j)^2 \quad (2.22)$$

- Εντροπία (*Entropy*)

$$f_{18} = -\sum \sum C(i, j) \ln(C(i, j)) \quad (2.23)$$

- Μέγιστη πιθανότητα (*Maximum probability*)

$$f_{19} = \max(C(i, j)) \quad (2.24)$$

- Συσχέτιση (*Correlation*)

$$f_{20} = \sum \sum \frac{(i - \mu_j)(j - \mu_i)C(i, j)}{\sigma_i \sigma_j} \quad (2.25)$$

- Διαγώνια ροπή (*Diagonal moment*)

$$f_{21} = \sum \sum |i - j| (i + j - \mu_j - \mu_i) C(i, j) \quad (2.26)$$

- Αντίθεση (*Contrast*)

$$f_{22} = \sum \sum (i - j)^2 C(i, j) \quad (2.27)$$

- Τοπική ομοιογένεια (*Local homogeneity*)

$$f_{23} = \sum \sum \frac{C(i, j)}{1 + (i - j)^2} \quad (2.28)$$

Στη σχέση της εντροπίας (2.23) αγνοούμε όλα τα στοιχεία για τα οποία ισχύει $C(i, j) = 0$. Το μέγεθος $C(i, j)$, το οποίο αντιπροσωπεύει ένα δεδομένο στοιχείο στο μητρώο συνεμφάνισης των επιπέδων του γκρι, καθορίζει πόσα ζευγάρια των δύο εικονοστοιχείων με φωτεινότητες i και j χωρίζονται από το διάνυσμα απόστασης d . Τα μεγέθη $\mu_i, \mu_j, \sigma_i, \sigma_j$ αντιπροσωπεύουν τις μέσες τιμές και τις σταθερές αποκλίσεις των φωτεινοτήτων i και j αντίστοιχα.

Ο Haralick [39] έχει επίσης εξάγει μία σειρά στατιστικών μεγεθών 2^{15} τάξης από τα μητρώα συνεμφάνισης των διαφόρων τιμών φωτεινότητας. Μερικά από αυτά τα μεγέθη σχετίζονται με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά υφής της εικόνας όπως η ομοιογένεια, η αντίθεση, και η παρουσία οργανωμένων δομών εντός της εικόνας. Άλλα μεγέθη χαρακτηρίζουν την πολυπλοκότητα και τη φύση των μεταβάσεων από

μία φωτεινότητα σε κάποια άλλη που συμβαίνουν στην εικόνα. Εντούτοις, είναι δύσκολο να προσδιοριστεί ποιο μέγεθος αντιστοιχεί σε κάθε μεμονωμένο χαρακτηριστικό υφής.

2.2.4. Φάσμα ισχύος Fourier (Fourier Power Spectrum)

Ο μετασχηματισμός Fourier μίας εικόνας $f(x, y)$ καθορίζεται από τον τύπο [40]:

$$F(u, v) \equiv \int \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) e^{-2\pi j(ux+vy)} dx dy \quad (2.29)$$

και το φάσμα ισχύος Fourier από τη σχέση:

$$|F|^2 = FF^* \quad (2.30)$$

Η ακτινική κατανομή των τιμών της $|F|^2$ είναι ευαίσθητη στην αδρότητα της υφής στην f . Μία αδρή υφή θα έχει υψηλές τιμές στο φάσμα ισχύος συγκεντρωμένες στην πηγή προέλευσής τους. Αντίθετα μία πιο έντονη υφή θα έχει πιο διεσπαρμένες τιμές στο φάσμα ισχύος. Η αδρότητα της υφής μπορεί να αναλυθεί μέσω των μέσων όρων της $|F|^2$ σε δακτυλιοειδείς περιοχές, με κέντρο την πηγή προέλευσης. Τα χαρακτηριστικά θα έχουν τύπο της μορφής [11]:

$$\phi_r \equiv \int_0^{2\pi} |F(r, \theta)|^2 d\theta \quad (2.31)$$

για διάφορες τιμές της ακτίνας r του δακτυλίου.

Η γωνιακή κατανομή των τιμών της $|F|^2$ είναι ευαίσθητη στην κατευθυντικότητα της υφής στην f . Μία υφή με πολλές ακμές ή γραμμές σε μία δεδομένη κατεύθυνση θ θα έχει υψηλές τιμές στο φάσμα ισχύος συγκεντρωμένες γύρω από την κάθετη κατεύθυνση $\theta+(\pi/2)$. Αντίθετα σε μία υφή χωρίς κατευθυντικότητα, δεν θα υπάρχει κατευθυντικότητα και στις τιμές του φάσματος ισχύος. Η κατευθυντικότητα της υφής μπορεί να αναλυθεί μέσω των μέσων όρων της $|F|^2$ σε σφηνοειδείς περιοχές, με αρχή την πηγή προέλευσης. Τα χαρακτηριστικά θα έχουν τύπο της μορφής [40]:

$$\phi_\theta \equiv \int_0^{\infty} |F(r, \theta)|^2 dr \quad (2.32)$$

Στις ψηφιακές εικόνες χρησιμοποιείται ο διακριτός μετασχηματισμός Fourier, ο οποίος ορίζεται από τη σχέση [41]:

$$F(u, v) = \frac{1}{n^2} \sum_{x, y=0}^{n-1} f(x, y) e^{-2\pi j(ux+vy)/n} \quad (2.33)$$

Το βασικό σύνολο των χαρακτηριστικών υφής που βασίζονται στα δείγματα δακτυλιοειδούς σχήματος του φάσματος ισχύος του διακριτού μετασχηματισμού Fourier προσδιορίζεται από τον τύπο [40]:

$$\phi_{r_1 r_2} = \sum_{\substack{r_1^2 \leq u^2 + v^2 < r_2^2 \\ 0 \leq u, v < n-1}} |F(u, v)|^2 \quad (2.34)$$

για διάφορες τιμές του εσωτερικού και εξωτερικού δακτυλίου με ακτίνες r_1 και r_2 αντίστοιχα. Ομοίως, τα χαρακτηριστικά εκείνα που βασίζονται σε δείγματα σφηνοειδούς σχήματος προσδιορίζονται από τον τύπο [40]:

$$\phi_{\theta_1 \theta_2} = \sum_{\substack{\theta_1 \leq \tan^{-1}(v/u) < \theta_2 \\ 0 < u, v \leq n-1}} |F(u, v)|^2 \quad (2.35)$$

Σημειώνουμε ότι στο τελευταίο σύνολο χαρακτηριστικών, η DC συνιστώσα (u, v)=(0,0) έχει παραληφθεί, αφού είναι κοινή σε όλα τα σφηνοειδή.

Τα βασικά αυτά χαρακτηριστικά είναι ευαίσθητα στο μέγεθος (χωρική συχνότητα) μόνο, ή στην οριοθέτηση μόνο, αλλά όχι και στα δύο ταυτόχρονα [40]. Επίσης, ο διακριτός μετασχηματισμός Fourier αντιμετωπίζει την εικόνα εισόδου $f(x, y)$ ως περιοδική (π.χ. σαν να επαναλαμβανόταν η αριστερότερη στήλη της εικόνας στο δεξί μέρος της δεξιότερης στήλης της και η πρώτη γραμμή της αμέσως μετά την τελευταία). Οι επαναλήψεις όμως αυτές, λόγω της διαφορετικότητας των γραμμών και των στηλών, δημιουργούν αναπάντεχες ακμές στην εικόνα εισόδου. Οι ακμές επηρεάζουν ισχυρά το φάσμα και εμφανίζονται σαν σχέδια σταυροειδούς σχήματος ιδιαίτερης σημασίας, γεγονός το οποίο μειώνει τη χρησιμότητα των χαρακτηριστικών υφής που υπολογίζονται από το φάσμα [41].

2.2.5. Αυτοσυσχέτιση (Auto-correlation)

Η υφή σχετίζεται με το χωρικό μέγεθος των πρωταρχικών σχηματισμών των επιπέδων του γκρι. Οι μεγάλοι σχηματισμοί είναι ενδεικτικοί μίας πιο αδρής υφής,

ενώ οι πιο μικροί μίας πιο έντονης υφής. Η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης είναι ένα χαρακτηριστικό που περιγράφει που περιγράφει το μέγεθος αυτών των σχηματισμών [6].

Η μελέτη της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης γίνεται με τη βοήθεια ενός πειράματος. Θεωρούμε δύο διαφάνειες μίας εικόνας, οι οποίες είναι ακριβή αντίγραφα η μία της άλλης. Εναποθέτουμε τη μία διαφάνεια πάνω στην άλλη και με μία ισοκατανεμημένη πηγή φωτός μετράμε το μέσο όρο του φωτός που διαδίδεται μέσα από τις δύο διαφάνειες. Στη συνέχεια αντιστοιχίζουμε τη μία διαφάνεια ως «συγγενική» της άλλης και μετράμε μόνο το μέσο όρο του φωτός που διέρχεται μέσα από το κομμάτι εκείνο της εικόνας όπου η μία διαφάνεια επικαλύπτει τις (x,y) θέσεις της συγγενικής εικόνας. Η δισδιάστατη συνάρτηση αυτοσυσχέτισης της διαφάνειας της εικόνας είναι ο μέσος όρος κανονικοποιημένος ως προς το $(0,0)$ της συγγενικής διαφάνειας [6].

Ορίζουμε $I(u,v)$ τη διάδοση μέσω μίας διαφάνειας της εικόνας στη θέση (u,v) . Θεωρούμε ότι έξω από μία περιοχή σχήματος ορθογωνίου $0 \leq u \leq L_x$ και $0 \leq v \leq L_y$, η διάδοση είναι μηδενική. Ορίζουμε (x,y) τις αντιστοιχίες των x και y . Η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης δίνεται από τον τύπο:

$$p(x,y) = \frac{\frac{1}{(L_x - |x|)(L_y - |y|)} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I(u,v) I(u+x, v+y) du dv}{\frac{1}{L_x L_y} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I^2(u,v) du dv} \quad \text{με } |x| < L_x, |y| < L_y \quad (2.36)$$

Αν οι πρωταρχικοί σχηματισμοί είναι σχετικά μεγάλοι, η αυτοσυσχέτιση μειώνεται αργά ως προς την απόσταση. Αν είναι μικροί, τότε η αυτοσυσχέτιση μειώνεται γρήγορα ως προς την απόσταση. Σε περίπτωση που οι σχηματισμοί είναι χωρικά περιοδικοί, η αυτοσυσχέτιση αυξάνεται και μειώνεται με περιοδικό τρόπο. Σημειώνουμε ότι η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης είναι ο αντίστροφος μετασχηματισμός Fourier της συνάρτησης φάσματος ισχύος [6].

Στο μοντέλο της αυτοσυσχέτισης, οι πρωταρχικοί σχηματισμοί των επιπέδων του γκρι είναι τα ίδια τα επίπεδα του γκρι. Η χωρική οργάνωση χαρακτηρίζεται από το συντελεστή συσχέτισης, ο οποίος αποτελεί μέτρο της γραμμικής εξάρτησης ενός εικονοστοιχείου από κάποιο άλλο.

2.2.6. Εκτίμηση κλασματικής διάστασης

2.2.6.1. Κλασματική διάσταση (Fractal dimension)

Ο ορισμός της κλασματικής διάστασης ακολουθεί τον ορισμό της διάστασης του Hausdorff [42]. Αν ένα αντικείμενο X μπορεί να οριστεί σε ένα χώρο m διαστάσεων, όπου m είναι ακέραιος, και ο m -διάστατος χώρος είναι ο μικρότερος χώρος ακέραιης διάστασης μεταξύ όλων των πιθανών χώρων ακέραιης διάστασης που μπορεί να εμπεριέχει το X , και $N(\varepsilon)$ είναι ο αριθμός των m -διάστατων σφαιρών διαμέτρου ε που χρειάζονται για να καλύψουν το X , και αν

$$N(\varepsilon) \propto \left(\frac{1}{\varepsilon}\right)^D, \text{ καθώς } \varepsilon \rightarrow 0 \quad (2.37)$$

μπορούμε να πούμε ότι το X έχει τη διάσταση Hausdorff D . Αν το D είναι πολύ μικρό, το D ονομάζεται κλασματική διάσταση.

Αν υποθέσουμε ότι υπάρχει μία m -διάστατη σφαίρα αναφοράς μοναδιαίας διαμέτρου η οποία καλύπτει ακριβώς το αντικείμενο X , τότε η διάμετρος ε μπορεί να θεωρηθεί μία κλιμακωτή αναλογία αναφοράς σε σχέση με τη διάμετρο αναφοράς. Ο τύπος (2.37) μπορεί να γραφτεί:

$$N(\varepsilon) = \left(\frac{1}{\varepsilon}\right)^D \quad (2.38)$$

Πιο εκτενής ανάλυση των τύπων (2.37), (2.38) μπορεί να βρεθεί στο Voss [43].

2.2.6.2. Μοντέλο κλασματικής Brownian κίνησης (Fractional Brownian Motion .Model)

Μία κλασματική επιφάνεια Brownian κίνησης $I(x,y)$ πρέπει να ικανοποιεί την ακόλουθη σχέση:

$$E\left(|I(x_2, y_2) - I(x_1, y_1)|\right) \propto \left(\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}\right)^H \quad (2.39)$$

Αν θέσουμε $\Delta I_{\Delta r} = |I(x_2, y_2) - I(x_1, y_1)|$, $\Delta r = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$ τότε

$$E(\Delta I_{\Delta r}) \propto \Delta r^H \quad (2.40)$$

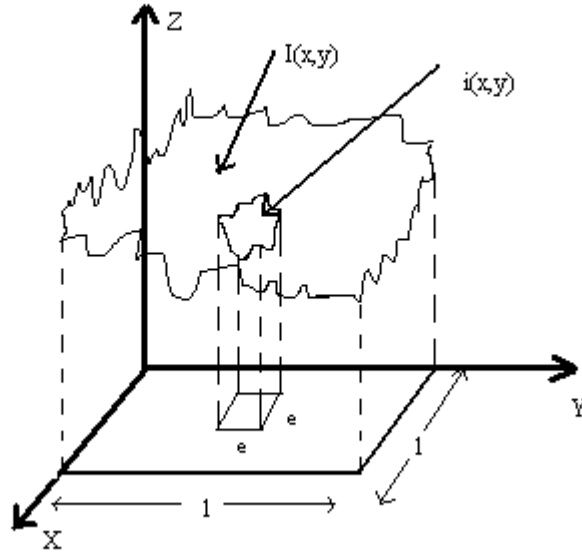
Αυτή η κλασματική επιφάνεια Brownian κίνησης εσωκλείεται σε ένα χώρο τριών διαστάσεων (Σχήμα 2-4). Συνεπώς, είναι δυνατή η χρήση ενός τρισδιάστατου κύβου με ακμή ε για να μετρηθεί η διάσταση της κλασματικής επιφάνειας, καλύπτοντας την επιφάνεια με τον ελάχιστο αριθμό κύβων.

Θεωρώντας ότι N είναι ο συνολικός αριθμός των κύβων με ακμή ε ($= \varepsilon$) που καλύπτουν την κλασματική επιφάνεια, $N = N_1 \cdot N_2 = (l/\varepsilon)^{3-H}$. Συγκρίνοντας την τελευταία σχέση με την (2.38), προκύπτει ότι η κλασματική διάσταση μίας πολύ μικρής επιφάνειας Brownian κίνησης δίνεται από τον τύπο:

$$D_s = 3 - H \quad (2.41)$$

2.2.6.3. Εκτίμηση κλασματικής διάστασης (Fractal dimension estimation)

Από θεωρητικής άποψης, αν μία επιφάνεια είναι μία τέλεια κλασματική επιφάνεια, τότε η κλασματική διάσταση θα παραμείνει σταθερή σε όλο το εύρος των κλιμάκων. Στην πράξη, υπήρχαν περιορισμοί του εύρους κλίμακας των κλασματικών διαστάσεων εξαιτίας της περιορισμένης υπακοής των ιατρικών εικόνων στους συλλογισμούς του μοντέλου κλασματικής Brownian κίνησης. Παραδείγματος χάριν, το όριο ανάλυσης των συστημάτων απεικόνισης θέτει ένα κατώτερο όριο στη συμπεριφορά της κλασματικής κλίμακας. Ένα ανώτερο όριο μπορεί να τεθεί από το μέγεθος του οργάνου ή της δομής που εξετάζεται, ή από μία μικρότερη δομή εντός του οργάνου. Μία πραγματική επιφάνεια θα είναι κλασματική σε ένα εύρος κλιμάκων, όχι όμως και σε όλες τις κλίμακες. Οι περιορισμένες αυτές κλίμακες μπορούν να εκφραστούν σαν ανώτερο (Δr_{max}) και κατώτερο (Δr_{min}) όριο αποκοπής κλίμακας [44].



Σχήμα 2-4. Τμήμα μίας κλασματικής επιφάνειας Brownian κίνησης $I(x,y)$ καλύπτει ένα μοναδιαίο τετράγωνο ($\Delta x=1$, $\Delta y=1$) και κάθετη απόσταση $\Delta I=1$. Υπολογίζουμε ότι υπάρχει ένας κύβος αναφοράς με μοναδιαία ακμή ο οποίος καλύπτει ακριβώς αυτή την κλασματική επιφάνεια. Το e είναι η κλιμακωτή αναλογία των αξόνων X και Y , ενώ χωρίζει το επίπεδο xy σε $Nl=(1/e)^2$ τετράγωνα. Σε κάθε τέτοιο τετράγωνο αντιστοιχεί ένα μικρό κομμάτι $i(x,y)$ το οποίο έχει κάθετο πλάτος $\Delta I_{\Delta x} = \Delta x^H \cdot \Delta x = e$ και $\Delta I_{\Delta y} = \Delta y^H \cdot \Delta y = e$. Δεδομένου ότι $\Delta I_{\Delta x} = \Delta I_{\Delta y}$, κάθε κομμάτι $i(x,y)$ καλύπτεται από $N2(= \Delta I_{\Delta x} / \Delta x = e^{H-1})$ κύβους.

Αν ξαναγράψουμε τη (2.40) ως $E(\Delta I_{\Delta r}) = K \Delta r^H$, όπου K σταθερά, τότε μπορούμε να εφαρμόσουμε τη λογαριθμική συνάρτηση και στις δύο πλευρές της εξίσωσης, παίρνοντας τη σχέση:

$$\log(E(\Delta I_{\Delta r})) = H \log(\Delta r) + \text{σταθερά} \quad (2.42)$$

Από τη σχέση (2.42) καταλήγουμε σε μία διαδικασία υπολογισμού της κλασματικής διάστασης της επιφάνειας μίας εικόνας. Αρχικά υπολογίζουμε την ποσότητα $E(\Delta I_{\Delta r})$ για διάφορα Δr . Στη συνέχεια, υπολογίζουμε τους λογαρίθμους των μεγεθών $E(\Delta I_{\Delta r})$ και Δr και σχεδιάζουμε τη γραφική συνάρτηση του $\log(E(\Delta I_{\Delta r}))$ ως προς το $\log(\Delta r)$. Τέλος, διαλέγουμε τα Δr_{max} και Δr_{min} και χρησιμοποιώντας γραμμική μείωση ελαχίστων τετραγώνων υπολογίζουμε την κλίση της καμπύλης, η οποία θα είναι η H τιμή επί της επιλεγμένης κλίμακας. Από το H και τη (2.41) υπολογίζουμε την κλασματική διάσταση D_s [44].

2.2.6.4. Χρησιμότητα μεθόδου

Η μέθοδος της εκτίμησης της κλασματικής διάστασης έχει δύο βασικές εφαρμογές: την κατηγοριοποίηση και την ανίχνευση και ενδυνάμωση των ακμών. Στην περίπτωση της κατηγοριοποίησης, υπολογίζεται ως χαρακτηριστικό διάνυσμα της κανονικοποιημένης κλασματικής Brownian κίνησης. Αυτό αντιπροσωπεύει τον κανονικοποιημένο μέσο όρο της διαφοράς των απολύτων τιμών έντασης / φωτεινότητας σε κάθε ζευγάρι εικονοστοιχείων σε μία επιφάνεια, σε διαφορετικές κλίμακες (αποστάσεις ζευγαριών εικονοστοιχείων). Στην περίπτωση της ανίχνευσης, λαμβάνεται μία μετασχηματισμένη εικόνα, υπολογίζοντας την κλασματική διάσταση του κάθε εικονοστοιχείου επί του συνόλου της ιατρικής εικόνας [44].

Σε μία εικόνα, η κλασματική διάσταση είναι ένας κλασματικός αριθμός μεταξύ του 2 και του 3, ο οποίος αποτελεί μέτρο της αδρότητας της επιφάνειας φωτεινότητας. Πειράματα έχουν δείξει ότι η κλασματική διάσταση είναι υψηλά συσχετιζόμενη με την ανθρώπινη αντίληψη της υφής σε μία ψηφιακή εικόνα. Όσο πιο αδρή είναι η εμφάνιση της υφής, τόσο μεγαλύτερη είναι η κλασματική διάσταση [35].

Το μοντέλο κλασματικής Brownian κίνησης, το οποίο είναι μία στατιστική τεχνική 2^{ης} τάξης, προσφέρει το θεωρητικό υπόβαθρο της ανάλυσης με το φάσμα ισχύος Fourier[44].

2.2.7. Ενέργεια υφής (Textural energy)

Στην προσέγγιση της υφής μέσω της ενέργειας (Laws) [45], [46], η εικόνα αρχικά συνελίσσεται με διάφορους πυρήνες. Αν I είναι η εικόνα εισόδου και $g_1, \dots, g_N$ οι πυρήνες, υπολογίζονται οι εικόνες $J_n = I * g_n$, $n=1, \dots, N$. Στη συνέχεια, κάθε συνελιχθείσα εικόνα υπόκειται σε επεξεργασία με ένα μη γραμμικό τελεστή, προκειμένου να καθοριστεί η συνολική ενέργεια στη γειτονιά διαστάσεων 7×7 του κάθε εικονοστοιχείου. Η ενέργεια της εικόνας που αντιστοιχεί στον g_n πυρήνα καθορίζεται από τον τύπο:

$$S_n(r, c) = \frac{1}{49} \sum_{i=-3}^3 \sum_{j=-3}^3 |J_n(r+1, c+1)| \quad (2.43)$$

Για κάθε εικονοστοιχείο που βρίσκεται στη θέση (r,c) προκύπτει ένα διάνυσμα χαρακτηριστικών υφής $[S_I(r,c), \dots, S_N(r,c)]$ [17].

Η προσέγγιση της υφής μέσω της ενέργειάς της βρίσκεται πολύ κοντά στο πνεύμα της προσέγγισης μέσω μετασχηματισμού στο πεδίο της συχνότητας, αλλά χρησιμοποιεί μικρότερα παράθυρα ή γειτονικά εικονοστοιχεία υποστήριξης. Οι πυρήνες του Laws υποστηρίζουν 3×3 , 5×5 και 7×7 γειτονικές περιοχές εικονοστοιχείων. Οι μονοδιάστατοι τύποι φαίνονται στο Σχήμα 2-5. Οι δισδιάστατοι τύποι προκύπτουν από τον πολλαπλασιασμό των μονοδιάστατων διανυσμάτων μεταξύ τους. Αν τα k_1 , k_2 είναι διανύσματα-γραμμές με K στήλες, το γινόμενο $k_1^T \cdot k_2$ αποτελεί έναν πυρήνα $K \times K$.

$$\begin{aligned}
 L3 &= [1 \ 2 \ 1] \\
 E3 &= [-1 \ 0 \ 1] \\
 S3 &= [-1 \ 2 \ -1] \\
 \\
 L5 &= [1 \ 4 \ 6 \ 4 \ 1] \\
 E5 &= [-1 \ -2 \ 0 \ 2 \ 1] \\
 S5 &= [-1 \ 0 \ 2 \ 0 \ -1] \\
 W5 &= [-1 \ 2 \ 0 \ -2 \ 1] \\
 R5 &= [1 \ -4 \ 6 \ -4 \ 1] \\
 \\
 L7 &= [1 \ 6 \ 15 \ 20 \ 15 \ 6 \ 1] \\
 E7 &= [-1 \ -4 \ -5 \ 0 \ 5 \ 4 \ 1] \\
 S7 &= [-1 \ -2 \ 1 \ 4 \ 1 \ -2 \ -1] \\
 W7 &= [-1 \ 0 \ 3 \ 0 \ -3 \ 0 \ 1] \\
 R7 &= [1 \ -2 \ -1 \ 4 \ -1 \ -2 \ 1] \\
 O7 &= [-1 \ 6 \ -15 \ 20 \ -15 \ 6 \ -1]
 \end{aligned}$$

Σχήμα 2-5. Μονοδιάστατοι πυρήνες ενέργειας υφής. Το L (Level) αντιστοιχεί στο επίπεδο, το E (Edge) στην ακμή, το S (Shape) στο σχήμα, το W (Wave) στον έντονο κυματισμό, το R (Ripple) στον ελαφρύ κυματισμό και το O (Oscillation) στην ταλάντωση.

Τα μονοδιάστατα διανύσματα $L3$, $E3$ και $S3$ αντιπροσωπεύουν τους μονοδιάστατους τελεστές του κεντραρισμένου τοπικού μέσου όρου, της συμμετρικής πρώτης διαφοροποίησης για εντοπισμό ακμών και της δεύτερης διαφοροποίησης για τον εντοπισμό κουκίδων αντίστοιχα. Τα διανύσματα αυτά συνελισσόμενα μεταξύ τους μας δίνουν τα πέντε διανύσματα μήκους 5, όπου το $L5$ εξάγει τον τοπικό μέσο όρο, τα $S5$ και $E5$ τον εντοπισμό ακμών και κουκίδων αντίστοιχα, και τα $R5$ και $W5$ τον εντοπισμό ελαφρού ή έντονου κυματισμού. Η περιγραφή της υφής της εικόνας επιτυγχάνεται με τη συνέλιξη των масκών αυτών και τη χρήση στατιστικών μεγεθών, τα οποία εκλαμβάνονται ως ιδιότητες υφής [8].

Οι δύο πιο σημαντικές και χρήσιμες μάσκες είναι οι $L5^T E5$ και $L5^T S5$ [27]. Ακολουθούν οι $E5^T S5$ και $R5^T R5$ [7].

$$L^T E \rightarrow \begin{vmatrix} -1 & -2 & 0 & 2 & 1 \\ -4 & -8 & 0 & 8 & 4 \\ -6 & -12 & 0 & 12 & 6 \\ -4 & -8 & 0 & 8 & 4 \\ -1 & -2 & 0 & 2 & 1 \end{vmatrix} \quad (1^{\text{η}} \text{ Μάσκα})$$

$$L^T S \rightarrow \begin{vmatrix} -1 & 0 & 2 & 0 & -1 \\ -4 & 0 & 8 & 0 & -4 \\ -6 & 0 & 12 & 0 & -6 \\ -4 & 0 & 8 & 0 & -4 \\ -1 & 0 & 2 & 0 & -1 \end{vmatrix} \quad (2^{\text{η}} \text{ Μάσκα})$$

$$E^T S \rightarrow \begin{vmatrix} -1 & 0 & 2 & 0 & -1 \\ -2 & 0 & 4 & 0 & -2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & -4 & 0 & 2 \\ 1 & 0 & -2 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (3^{\text{η}} \text{ Μάσκα})$$

$$R^T R \rightarrow \begin{vmatrix} 1 & -4 & 6 & -4 & 1 \\ -4 & 16 & -24 & 16 & -4 \\ 6 & -24 & 36 & -24 & 6 \\ -4 & 16 & -24 & 16 & -4 \\ 1 & -4 & 6 & -4 & 1 \end{vmatrix} \quad (4^{\text{η}} \text{ Μάσκα})$$

Τα πιο χρήσιμα στατιστικά μεγέθη είναι το άθροισμα των τετραγώνων των τιμών ή των απολύτων τιμών στις εικόνες που προκύπτουν μετά τη συνέλιξη της αρχικής εικόνας με κάποια μάσκα. Το άθροισμα των τετραγώνων δικαιολογεί την ορολογία «μετρήσεις ενέργειας υφής», αν και το άθροισμα των απολύτων τιμών είναι προτιμότερο, επειδή έχει χαμηλότερες υπολογιστικές απαιτήσεις [7].

Ο Laws έδειξε με μία σειρά πειραμάτων με ορισμένα δείγματα υφής ότι η προσέγγιση με την ενέργεια της υφής οδήγησε σε διαχωρισμό ανάμεσα σε οκτώ δείγματα υφής με ακρίβεια προσδιορισμού 94%, ενώ η χωρική συνεμφάνιση των επιπέδων του γκρι είχε ακρίβεια μόνο 72% [6].

Ολοκληρώνοντας τη μέθοδο του Laws, που υλοποιούμε στο τέταρτο κεφάλαιο και η οποία δεν έχει εφαρμοστεί στην κατηγοριοποίηση αθηρωματικών πλακών, σημειώνουμε ότι ο Laws εισήγαγε μία κατηγορία χαρακτηριστικών υφής τα οποία βασίζονται στους μέσους βαθμούς ταύτισης της γειτονικής περιοχής ενός εικονοστοιχείου με ένα σύνολο σταθερών μασκών. Αυτός είναι και ο λόγος που τα χαρακτηριστικά αυτά έχουν καλύτερες επιδόσεις στη κατηγοριοποίηση υφής σε σχέση με τα κλασικά χαρακτηριστικά που βασίζονται σε ζευγάρια εικονοστοιχείων [7].

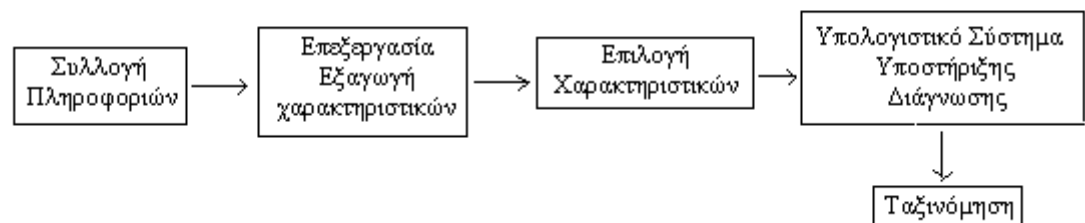
2.3. Επιλογή χαρακτηριστικών (Feature selection)

Τα υπολογιστικά συστήματα υποβοήθησης διάγνωσης (ή συστήματα υποβοήθησης ιατρικής απόφασης) [47] είναι υπολογιστικά προγράμματα σχεδιασμένα για να βελτιώσουν τη διαδικασία και τα αποτελέσματα της λήψης αποφάσεων σε ιατρικά ζητήματα. Τα συστήματα υποβοήθησης ευφυούς απόφασης χρησιμοποιούν τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης για να βοηθήσουν το ιατρικό προσωπικό να κάνει τη βέλτιστη δυνατή επιλογή διάγνωσης και θεραπείας, όταν οι πληροφορίες είναι ελλιπείς ή

αβέβαιες σχετικά με την ταξινόμηση του περιστατικού[48]. Παραδείγματα τέτοιων συστημάτων είναι τα Quick Medical Reference (QMR) και Dxplain [49].

Η επιλογή χαρακτηριστικών στην είσοδο ενός συστήματος ταξινόμησης (pattern classifier) αποσκοπεί στη δημιουργία ενός ικανοποιητικού υποσυνόλου χαρακτηριστικών, που θα αποτελέσουν τελικά τα χαρακτηριστικά που θα εισαχθούν στο σύστημα. Η χρήση του πλήρους συνόλου των χαρακτηριστικών όχι μόνο σχετίζεται με αυξημένο κόστος συλλογής / υπολογισμών των χαρακτηριστικών, αλλά και δεν εξασφαλίζει τη μεγιστοποίηση του σχεδιαζόμενου συστήματος ταξινόμησης, σε περίπτωση που το προς ταξινόμηση δείγμα είναι μικρό σε μέγεθος [50].

Η ανάγκη επιλογής χαρακτηριστικών γίνεται εμφανής όταν υπάρχουν χαρακτηριστικά τα οποία εισάγουν μόνο θόρυβο και περιορίζουν την επίδοση ενός συστήματος ταξινόμησης, αντί να τη βελτιώνουν. Μεταξύ άλλων, είναι προτιμότερη η χρήση ενός μικρότερου συνόλου χαρακτηριστικών λόγω οικονομικών και τεχνικών περιορισμών [51], [52].



Σχήμα 2-6. Block διάγραμμα λειτουργίας ενός υπολογιστικού συστήματος υποστήριξης διάγνωσης. Τα επιλεγμένα χαρακτηριστικά αποτελούν την είσοδο του συστήματος.

2.3.1. Ομάδες μεθόδων επιλογής χαρακτηριστικών

Υπάρχουν δύο ομάδες μεθόδων επιλογής χαρακτηριστικών στις διάφορες εφαρμογές. Κάθε ομάδα ασχολείται με ένα συγκεκριμένο αντικείμενο και οδηγεί σε ένα διακριτό τύπο βελτιστοποίησης.

Η πρώτη ομάδα μεθόδων στοχεύει σε ένα βέλτιστο υποσύνολο με δεδομένο έναν προκαθορισμένο αριθμό χαρακτηριστικών και δημιουργεί το χαμηλότερο ποσοστό σφάλματος στο σύστημα ταξινόμησης [50]. Η κατηγορία αυτή έχει να αντιμετωπίσει ένα συνδυαστικό πρόβλημα βελτιστοποίησης με περιορισμούς. Στηρίζεται στην κοινή μεταβλητότητα (univariance) και στοχεύει στην επιλογή των χαρακτηριστικών εκείνων που μεγιστοποιούν την επιθυμητή ιδιότητα, δηλαδή τη μέγιστη ικανότητα διάκρισης μεταξύ κατηγοριών. Οι μέθοδοι της ομάδας αυτής είναι απλές και γρήγορες, αλλά μειονεκτούν στο γεγονός ότι δεν συνυπολογίζεται η αλληλεπίδραση μεταξύ των χαρακτηριστικών [51]. Επίσης, οι μέθοδοι που ανήκουν σε αυτήν την ομάδα ονομάζονται μέθοδοι ανοιχτής επανάληψης (open-loop methods), διότι το κριτήριο επιλογής δεν αφορά στην επίδοση ενός χαρακτηριστικού σε σχέση με τη συνολική διαδικασία επίδοσης του αλγορίθμου, αλλά στη μεμονωμένη συμμετοχή του στη βέλτιστη επίδοση και την ικανότητα διάκρισης διαφορετικών τάξεων από το υποσύνολο. Η ικανότητα αυτή συνήθως καθορίζεται από τις διάφορες τάξεις (classes), τις συμμεταβλητότητες των τάξεων (class covariances) και συνδυασμούς των παραπάνω [53].

Η δεύτερη ομάδα μεθόδων επιλογής χαρακτηριστικών στοχεύει στην ανεύρεση του μικρότερου δυνατού υποσυνόλου χαρακτηριστικών, για το οποίο το ανεκτό ποσοστό σφάλματος ταξινόμησης είναι μικρότερο μιας δοσμένης τιμής κατωφλίου. Το πρόβλημα που έχει να αντιμετωπίσει αυτή η ομάδα μεθόδων είναι ένα συνδυαστικό πρόβλημα βελτιστοποίησης με περιορισμούς, που αποσκοπεί κυρίως στην εύρεση του μικρότερου δυνατού υποσυνόλου χαρακτηριστικών, ενώ το ποσοστό σφάλματος λειτουργεί σαν περιορισμός [50]. Οι μέθοδοι της ομάδας αυτής είναι μέθοδοι πολλαπλής μεταβολής, ονομάζονται δε και μέθοδοι κλειστής επανάληψης (closed-loop methods). Η επιλογή των χαρακτηριστικών σε αυτές γίνεται με τη χρήση μιας επίδοσης πρόβλεψης, η οποία λειτουργεί ως κριτήριο για την επιλογή του υποσυνόλου, αν και εφόσον αυτό είναι αποδοτικότερο σε σχέση με κάποιο άλλο υποσύνολο [53].

Αν συμβολίσουμε με $error(\mathcal{S})$ το ανεκτό ποσοστό σφάλματος ή άλλες μετρήσεις επίδοσης, όπως η διαχωριστικότητα της τάξης (π.χ. απόσταση Mahalanobis [50]), όταν το $\mathcal{S}$ χρησιμοποιείται για το σχεδιασμό του συστήματος ταξινόμησης, οι δύο ομάδες μεθόδων μπορούν να εκφραστούν από τις σχέσεις [50]:

- 1^η ομάδα. Μέθοδοι ανοιχτής επανάληψης:

$$\min J(\mathbf{S}) = \text{error}(\mathbf{S}) \quad (2.44)$$

υπό τον περιορισμό $\mathbf{S} \subset \mathbf{F}$, $|\mathbf{S}|=m$, $m < n$

- 2^η ομάδα. Μέθοδοι κλειστής επανάληψης:

$$\min J(\mathbf{S}) = |\mathbf{S}| \quad (2.45)$$

υπό τον περιορισμό $\mathbf{S} \subseteq \mathbf{F}$, $\text{error}|\mathbf{S}| < t$

2.3.2. Μέθοδοι επιλογής χαρακτηριστικών

- **Μέθοδοι ανοιχτής επανάληψης**

Οι μέθοδοι τις πρώτης ομάδας μεθόδων επιλογής χαρακτηριστικών είναι κατά κανόνα στατιστικές μέθοδοι οι οποίες εξετάζουν τη μεμονωμένη ικανότητα διάκρισης / ταξινόμησης ενός χαρακτηριστικού. Στις μεθόδους αυτές συγκαταλέγονται το TTEST, ο συντελεστής συσχέτισης και το ANOVA, τα οποία χρησιμοποιούνται στην παρούσα διπλωματική προκειμένου να κάνουμε επιλογή χαρακτηριστικών και τα οποία αναλύονται στην § 2.3.3.

- **Μέθοδοι κλειστής επανάληψης**

Οι μέθοδοι επιλογής χαρακτηριστικών της δεύτερης ομάδας είναι πιο εξελιγμένες και πιο πολύπλοκες. Στηρίζονται στη συνεισφορά των διαφόρων χαρακτηριστικών στη βελτίωση της ικανότητας διάκρισης και ταξινόμησης ενός υποσυνόλου συνόλου, όπου και ανήκει το χαρακτηριστικό. Χαρακτηριστικές μέθοδοι εξαγωγής χαρακτηριστικών είναι ανάλυση βασικού στοιχείου (principal component analysis-PCA) [54], [55], και η ανάλυση γραμμικής ταξινόμησης (linear discriminant analysis-LDA) [55]. Οι τεχνικές αυτές έχουν στόχο τη μείωση της διάστασης των δεδομένων (dimensionality reduction) δημιουργώντας νέα χαρακτηριστικά τα οποία αποτελούν γραμμικούς συνδυασμούς των αρχικών.

Ο αλγόριθμος branch and bound (BB) [56] μπορεί να εγγυηθεί μία βέλτιστη λύση αν πληρείται μία συνάρτηση-κριτήριο στην οποία επιβάλλεται περιορισμός

μονοτονίας. Η ταχύτητά του εξαρτάται ιδιαιτέρως από τα δεδομένα [52], και δυστυχώς η συνθήκη μονοτονίας πληρείται σπάνια. Επίσης, κι αν ακόμα το 99,9% της εξοικονόμησης υπολογιστικού κόστους γίνεται από τον BB, η υπολογιστική πολυπλοκότητα παραμένει εκθετικής μορφής [50]. Έτσι ο BB είναι ακατάλληλος για μεγάλο αριθμό δεδομένων.

Οι μέθοδοι της σειριακής πρόσθιας επιλογής (sequential forward selection-SFS) και της σειριακής όπισθεν επιλογής (sequential backward selection-SBS) [57], καθώς και οι γενικευμένες εκδοχές τους [52], ξεκινούν με ένα υποσύνολο χαρακτηριστικών και προσθέτουν ή αφαιρούν χαρακτηριστικά αντίστοιχα, μέχρι να εκπληρωθεί κάποιο κριτήριο τερματισμού. Το μειονέκτημα αυτών των μεθόδων είναι ότι τα απορριπτέα χαρακτηριστικά δεν μπορούν να επανεπιλεγούν, ενώ τα επιλεγμένα δεν μπορούν να απορριφθούν αργότερα.

Τα νευρωνικά δίκτυα αποδεικνύονται επίσης ένα πολύ χρήσιμο και εξελιγμένο εργαλείο στην εξαγωγή και επιλογή χαρακτηριστικών. Έχουν τη ικανότητα να λύσουν ένα πρόβλημα με μικρότερο αριθμό χαρακτηριστικών. Η ικανότητα αυτή αναπτύσσεται κατά την εκπαίδευση του νευρωνικού, η οποία περιλαμβάνει εξαγωγή χαρακτηριστικών, επιλογή αυτών και ταξινόμηση [58].

Σημαντική μέθοδος επιλογής είναι επίσης η μέθοδος απαγορευμένης αναζήτησης (Tabu search) που προτάθηκε από το Glover [59], [60]. Η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση συνδυαστικών προβλημάτων βελτιστοποίησης. Η διαφορά της με τις τοπικές τεχνικές αναζήτησης είναι η δυνατότητα να κινείται προς μία νέα λύση η οποία χειροτερεύει την αντικειμενική συνάρτηση με την ελπίδα ότι αυτή δεν θα εγκλωβιστεί σε τοπικές λύσεις βελτιστοποίησης [50].

Τέλος, επισημαίνουμε τους γενετικούς αλγόριθμους (genetic algorithms-GA) [61], οι οποίοι κατά τον Goldberg [62] διαθέτουν την ικανότητα αποτελεσματικής αναζήτησης σε μεγάλους χώρους με πολύ λίγα δεδομένα. Έχουν δε την ικανότητα να βελτιστοποιούν ένα σύνολο με χαρακτηριστικά χρησιμοποιώντας μια διαδικασία τεχνητής εξέλιξης [51].

2.3.3. TTEST

Το TTEST αποτελεί έναν έλεγχο μεταξύ δύο σειρών μετρήσεων· αν και κατά πόσο αυτές ανήκουν στους ίδιους ή σε διαφορετικούς πληθυσμούς. Υποθέτοντας ότι οι δύο σειρές μετρήσεων ανήκουν στον ίδιο πληθυσμό, το TTEST επιστρέφει την πιθανότητα του αληθούς αυτής της υποθέσεως. Για πιθανότητες μεγαλύτερες του 0,05 οι σειρές μετρήσεων αποδίδονται στον ίδιο πληθυσμό, ενώ για μικρότερες τιμές πιθανότητας πρόκειται για δύο διαφορετικούς πληθυσμούς. Στη μέθοδο ανάλυσης της υφής θεωρούμε ως διαφορετικούς πληθυσμούς τις περιοχές αθηρωμάτωσης και τις περιοχές υγιών ιστών, όπως επίσης τις περιπτώσεις συμπτωματικών και ασυμπτωματικών πλακών, ενώ οι σειρές μετρήσεων αφορούν στις στατιστικές παραμέτρους. Συνεπώς το TTEST αποτελεί εργαλείο επιλογής χαρακτηριστικών και κατηγοριοποίησης, βάσει μετρήσεων και στατιστικών, των δύο διαφορετικών ειδών περιοχών που εξετάζουμε κάθε φορά [63].

2.3.4. Συντελεστής συσχέτισης (Correlation coefficient)

Χρησιμοποιώντας ανάλυση στατιστικής συσχέτισης (statistical correlation analysis) μπορούμε να δούμε τη γραμμική σχέση και την κατεύθυνση της σχέσης μεταξύ δύο μεταβλητών. Ο συντελεστής συσχέτισης r λαμβάνει τιμές από -1 έως 1 , έτσι ώστε τα δεδομένα που διανέμονται κοντά στη ρέπουσα προς τη θετική κατεύθυνση (+) γραμμή να έχουν θετικούς συντελεστές και τα δεδομένα κοντά στη ρέπουσα προς την αρνητική κατεύθυνση (-) γραμμή αρνητικούς. Αν έχουμε δύο διανύσματα X και Y , τα οποία περιέχουν N στοιχεία, ο συντελεστής συσχέτισης του Pearson δίνεται από τον τύπο [64]:

$$r_{Pearson} = \frac{\sum XY - \frac{\sum X \sum Y}{N}}{\sqrt{\left(\sum X^2 - \frac{(\sum X)^2}{N}\right) \left(\sum Y^2 - \frac{(\sum Y)^2}{N}\right)}} \quad (2.46)$$

Τα X και Y για το εκάστοτε χαρακτηριστικό της μεθόδου ανάλυσης της υφής της αθηρωματικής πλάκας αποτελούν τις κατηγορίες των συμπτωματικών και των ασυμπτωματικών πλακών αντίστοιχα.

2.3.5. Στατιστική μέθοδος ANOVA (Analysis of variance)

Η ανάλυση μεταβλητότητας [65], [66] χρησιμοποιεί ένα υποθετικό τεστ προκειμένου να καθορίσει αν το φασματικό περιεχόμενο της εικόνας ανήκει στο φασματικό περιεχόμενο της ομάδας αναφοράς. Σε αυτό το τεστ υπάρχουν δύο εναλλακτικές οι οποίες βασίζονται στο συντελεστή κλίσης της γραμμικής μείωσης:

$$H_0: \beta = 0 \quad (2.47)$$

$$H_1: \beta \neq 0 \quad (2.48)$$

Η υποθετική ανάλυση μπορεί να έχει δύο τύπος σφάλματος:

- Σφάλμα τύπου I- απορρίπτουμε την H_0 και η H_0 είναι σωστή,
- Σφάλμα τύπου II- αποδεχόμαστε την H_0 και η H_0 είναι εσφαλμένη.

Η πιθανότητα εμφάνισης σφάλματος τύπου I αναφέρεται, στο υποθετικό τεστ, ως επίπεδο σημαντικότητας (α). Επίπεδο σημαντικότητας 10% σημαίνει ότι υπάρχει πιθανότητα 10% επί του συνόλου των δεδομένων να έχουν $\beta=0$, ενώ έχουν θεωρηθεί ως $\beta \neq 0$.

Το F τεστ χρησιμοποιείται για να εγκυροποιήσει (ή όχι) την υπόθεση. Ο υπολογισμός του F γίνεται μέσω του τύπου:

$$F = \frac{MSr}{MSd} \quad (2.49)$$

όπου MSr-Άθροισμα των τετραγώνων της μέσης μείωσης

MSd- Άθροισμα των τετραγώνων της μέσης απόκλισης

Το τεστ απορρίπτει την υπόθεση (H_0) για όλες τις τιμές του F που είναι ίσες ή μεγαλύτερες από την τιμή που περιέχεται μέσα σε ένα πίνακα του F ο

οποίος εξαρτάται από το βαθμό ελευθερίας και το επίπεδο σημαντικότητας του αριθμητή και του παρονομαστή [67]. Οι συνθήκες της μεθόδου είναι οι βαθμοί ελευθερίας του παρονομαστή (1 ή 2), του αριθμητή (1) και το επίπεδο σημαντικότητας (2,5%, 5% και 10%).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΥΦΗΣ ΑΘΗΡΩΜΑΤΙΚΗΣ ΠΛΑΚΑΣ ΣΤΗΝ ΚΑΡΩΤΙΔΑ

Στο Κεφάλαιο αυτό παρουσιάζουμε τη μεθοδολογία μελέτης της υφής αθηρωματικής πλάκας καρωτίδας. Δίνονται στοιχεία για τις υπερηχοτομογραφικές εικόνες β-σάρωσης των περιστατικών του δείγματος και στη συνέχεια περιγράφεται η διαδικασία επεξεργασίας των εικόνων. Κατά την επεξεργασία γίνεται χρήση των μητρώων του Laws, με τα οποία μετασχηματίζονται οι εικόνες. Τελικός στόχος είναι η εξαγωγή των στατιστικών παραμέτρων 1^{ης} τάξης για περιοχές που αντιστοιχούν σε συμπτωματικές αθηρωματικές πλάκες, ασυμπτωματικές αθηρωματικές πλάκες και περιοχές υγιών ιστών. Τέλος, επιχειρείται επιλογή χαρακτηριστικών, προκειμένου να εντοπιστούν τα χαρακτηριστικά που συντελούν σε βέλτιστη ταξινόμηση του ιστού της καρωτίδας και των τύπων αθηρωματικών πλακών.

3.1. Τα άτομα του δείγματος

Οι εικόνες υπερήχων που χρησιμοποιήθηκαν προέρχονται από το Irvine Laboratory του St.Mary's Hospital του Πανεπιστημίου του Λονδίνου και έχουν ληφθεί όλες με κοινές ρυθμίσεις στο μηχάνημα των υπερήχων. Το σύνολο των περιστατικών που μελετήθηκαν ήταν 24, προερχόμενες από τους ασθενείς του νοσοκομείου. Από αυτούς, τα 20 με αθηρωματική πλάκα στο εσωτερικό αρτηριακό τοίχωμα της καρωτίδας, ενώ τα 4 αντιστοιχούσαν σε καρωτίδες χωρίς αθηρωματική πλάκα. Μεταξύ των 20 περιστατικών με αθηρωματική πλάκα, τα 11 αντιστοιχούσαν σε συμπτωματικούς ασθενείς (ηλικίας 50-85 ετών, μέσης ηλικίας 67,9 έτη, 2 γυναίκες) και τα 9 σε ασυμπτωματικούς ασθενείς (ηλικίας 52-90 ετών, μέσης ηλικίας 66,7 έτη,

6 γυναίκες). Οι συμπτωματικές περιπτώσεις είχαν ιστορικό εγκεφαλικού επεισοδίου πριν την εξέταση. Τα συμπτώματα μεταξύ άλλων ήταν εγκεφαλικά επεισόδια και παροδικά ισχαιμικά επεισόδια σε ποσοστό 30% και 40% αντίστοιχα. Οι ασθενείς αυτοί δεν είχαν ιστορικό καρδιακού επεισοδίου. Αντίθετα, οι ασυμπτωματικές περιπτώσεις δεν είχαν ιστορικό εγκεφαλικού επεισοδίου πριν την εξέταση. Δεν υπήρχε σημαντική διαφορά στο βαθμό της στένωσης της αρτηρίας μεταξύ των ομάδων των δύο περιπτώσεων με αθηρωματική πλάκα (t -test, $p = 0,96$). Η πλειοψηφία των υπό εξέταση πλακών εντοπιζόνταν στην έσω καρωτίδα, πολύ κοντά ή ακριβώς στην περιοχή του καρωτιδικού βολβού [35].

Η επιλογή των ασθενών βασίστηκε σε κριτήρια όπως η ηχωγένεια της πλάκας (echogenicity) και ο βαθμός στένωσης που προκαλείται από την παρουσία της πλάκας. Στη συγκεκριμένη μελέτη χρησιμοποιήθηκαν μόνο πλάκες ενδιάμεσης ηχωγένειας (intermediate). Οι εντελώς ανηχωικές πλάκες (anechoic) παράγουν μία εικόνα β-σάρωσης πάρα πολύ σκοτεινή, που είναι δύσκολο να εντοπιστεί οπτικά. Οι υπερβολικά ηχωγενείς πλάκες, αντίστοιχα, δημιουργούν μία ακουστική σκιά η οποία δεν μας επιτρέπει να δούμε καθαρά πίσω από την επιφάνεια της αθηρωματικής πλάκας. Η μείωση της διαμέτρου της καρωτίδας ήταν μεγαλύτερη από 50%, έτσι ώστε οι πλάκες να προεξέχουν προς το εσωτερικό της αρτηρίας. Ο βαθμός της στένωσης υπολογίστηκε, με βάση μετρήσεις ταχύτητας στην περιοχή της πλάκας, από τον εξεταστή / ιατρό κατά τη διάρκεια της εξέτασης [35].

3.2. Διαδικασία καταγραφής εικόνων

Για κάθε ξεχωριστή περίπτωση καταγράφηκε μία ακολουθία σάρωσης της περιοχής ενδιαφέροντος με τη βοήθεια ενός ATL Ultramark 4 (Advanced Technology Laboratory) με γραμμική κεφαλή σάρωσης υψηλής ανάλυσης 7,5-MHz. Κάθε αθηρωματική πλάκα εξετάστηκε υπό μία γωνία, ενώ διερευνήθηκαν τουλάχιστον 10 εικόνες, οι οποίες αντιστοιχούσαν σε ένα καρδιακό κύκλο, σε κάθε περίπτωση. Η καταγραφή της ακολουθίας έγινε με ρυθμό 25 εικόνες / δευτερόλεπτο (Hz) για χρονική διάρκεια 3 δευτερολέπτων, οπότε και οι ασθενείς κρατούσαν την αναπνοή τους [35].

Κατά την επεξεργασία των εικόνων και ειδικότερα κατά τη σύγκριση των στατιστικών παραμέτρων 1^{ης} τάξης μεταξύ περιστατικών με αθηρωματική πλάκα και υγιών ατόμων, επιλέξαμε τυχαία μία εικόνα από την ακολουθία. Αντίθετα, κατά τη σύγκριση μεταξύ συμπτωματικών – ασυμπτωματικών περιστατικών επιλέξαμε 6 εικόνες για το κάθε περιστατικό, κατανεμημένες στον καρδιακό κύκλο (συστολή – διαστολή).

3.3. Ανάλυση της υφής της αθηρωματικής πλάκας στην καρωτίδα με χρήση της μεθόδου του Laws

Στο σχήμα 3-2 παρουσιάζεται η υπερηχοτομογραφική εικόνα της καρωτίδας ενός εκ των ασθενών που μελετήθηκαν. Σε αυτή διακρίνονται το άνω και το κάτω τοίχωμα του αγγείου, ο περιβάλλων το αγγείο ιστός, ο αυλός όπου ρέει το αίμα, καθώς και μία περιοχή όπου εμφανίζεται αθηρωμάτωση. Στην αρχική αυτή εικόνα αναγράφονται πληροφορίες, όπως το όνομα του ασθενούς, η ημερομηνία και ο τόπος όπου πραγματοποιήθηκε η εξέταση, καθώς και πληροφορίες σχετικές με τα χαρακτηριστικά και τις ρυθμίσεις του μηχανήματος των υπερήχων.

▪ Προ-επεξεργασία εικόνας

Η περιοχή της εικόνας στην οποία αναγράφονται αυτές οι πληροφορίες αποκόπτεται ώστε να απομονωθεί η απεικονιζόμενη περιοχή του αγγείου (Σχήμα 3-3). Το επόμενο βήμα περιλαμβάνει την επιλογή της περιοχής ενδιαφέροντος στην οποία θα εκτιμηθεί η υφή. Επειδή η αντίθεση (contrast) μίας υπερηχοτομογραφικής εικόνας είναι σχετικά χαμηλή, η επιλογή μίας περιοχής ενδιαφέροντος (π.χ. αθηρωματική πλάκα) και η διαφοροποίησή της από τον περιβάλλοντα ιστό ή τον αυλό είναι δύσκολη. Για να διευκολύνουμε την επιλογή της περιοχής ενδιαφέροντος εφαρμόζουμε εξισορρόπηση ιστογράμματος (histogram equalization), ώστε να βελτιώσουμε την αντίθεση της εικόνας (Σχήμα 3-4). Η διαδικασία αυτή επιτυγχάνεται με το μετασχηματισμό του ιστογράμματος της εικόνας με τέτοιο τρόπο ώστε να ταιριάζει ικανοποιητικά με ένα πρότυπο ιστόγραμμα το οποίο αντιστοιχεί στην αύξηση της αντίθεσης [63].

▪ Επιλογή περιοχής ενδιαφέροντος

Στη συνέχεια, επιλέγουμε και απομονώνουμε την περιοχή ενδιαφέροντος (Σχήμα 3-5). Η περιοχή αυτή διαφέρει μεταξύ των περιπτώσεων των ασθενών. Το τυχαίου σχήματος τμήμα της εικόνας που επιλέγουμε, οριοθετώντας το με μία τεθλασμένη γραμμή, αντιστοιχεί στην αθηρωματική πλάκα. Προσπαθούμε όσο το δυνατό αυτό να ταυτίζεται με τα όρια της πλάκας, προκειμένου να μειωθεί ο παράγοντας σφάλματος στις μετέπειτα μετρήσεις, αφού τόσο οι περιοχές με ιστό, όσο και οι περιοχές με αίμα αλλοιώνουν τις μετρήσεις στην πλάκα. Επιπλέον, προσπαθούμε να αποφύγουμε τις περιοχές με θόρυβο, ο οποίος σε ορισμένες περιοχές προσομοιάζεται με πλάκα. Η επιλογή της περιοχής της πλάκας γίνεται οπτικά και βασίζεται στη διαφοροποίηση της πλάκας από τα τμήματα της εικόνας που αντιστοιχούν σε ιστό ή αίμα, ενώ η επιλογή του μεγέθους της περιοχής ενδιαφέροντος εξαρτάται από τη μορφολογία και το μέγεθος της πλάκας. Πρέπει να σημειώσουμε πως η επιλογή της πλάκας μετά την εξισορρόπηση ιστογράμματος δημιουργεί μία δυαδική μήτρα της περιοχής ενδιαφέροντος, με την οποία πολλαπλασιάζουμε την αρχική εικόνα, πριν την εφαρμογή της εξισορρόπησης. Συνεπώς, οι μετρήσεις αφορούν την αρχική εικόνα και όχι την εξισορροπημένη.

▪ Εκτίμηση στατιστικών παραμέτρων 1^{ης} τάξης

Ακολουθώντας, υπολογίζουμε το ιστόγραμμα της περιοχής ενδιαφέροντος και πραγματοποιούμε μία πρώτη σειρά μετρήσεων ώστε να εκτιμήσουμε τις στατιστικές παραμέτρους 1^{ης} τάξης πριν την εφαρμογή των масκών. Σημειώνουμε πως το άθροισμα των απολύτων τιμών (BB) και το άθροισμα των τετραγώνων των τιμών (BS) έχουν διαιρεθεί με το συνολικό αριθμό των εικονοστοιχείων κάθε εικόνας, ώστε να έχουμε αντικειμενικά αποτελέσματα.

Από το ιστόγραμμα υπολογίζονται τα ακόλουθα μεγέθη:

- Άθροισμα απολύτων τιμών/# Εικονοστοιχείων

$$BB = \frac{1}{N} \sum_x \sum_y |I(x, y)| \quad (3.1)$$

Το μέγεθος $I(x, y)$ αντιστοιχεί στην τιμή της φωτεινότητας κάθε εικονοστοιχείο με συντεταγμένες x, y και το N στο πλήθος των εικονοστοιχείων.

- Άθροισμα τετραγώνων των τιμών/ # Εικονοστοιχείων

$$BS = \frac{1}{\#Εικονοστοιχείων} \sum_x \sum_y (I(x,y))^2 \quad (3.2)$$

Επίσης, υπολογίζονται τα μεγέθη των σχέσεων (2.1)-(2.16).

▪ Μέθοδος Laws

Στη συνέχεια, υλοποιούμε τις τέσσερις πιο σημαντικές μάσκες της μεθόδου του Laws. Οι μάσκες αυτές προκύπτουν από τη συνέλιξη των διανυσμάτων διάστασης 1x5 του σχήματος 2-5.

Οι τέσσερις πιο σημαντικές μάσκες [17], [25], [27], (§2.2.7.) είναι οι εξής:

$$L^T E$$

$$L^T S$$

$$E^T S$$

$$R^T R$$

Ακολουθώντας, μετά από συνέλιξη των масκών του Laws με την περιοχή ενδιαφέροντος προκύπτουν οι εικόνες K1, K2, K3 και K4 (Σχήμα 3-6).

Οι εικόνες που προκύπτουν μετά την εφαρμογή των масκών(5x5) έχουν μέγεθος ((A+5-1)x(B+5-1)), αν το μέγεθος της περιοχής ενδιαφέροντος είναι (AxB). Επιπλέον, οι τιμές που προκύπτουν για τις φωτεινότητες δεν είναι στα όρια 0-255 της αρχικής εικόνας, αλλά αρκετά μεγαλύτερες, καθώς και αρνητικές (-3078,8 – 3075,8).

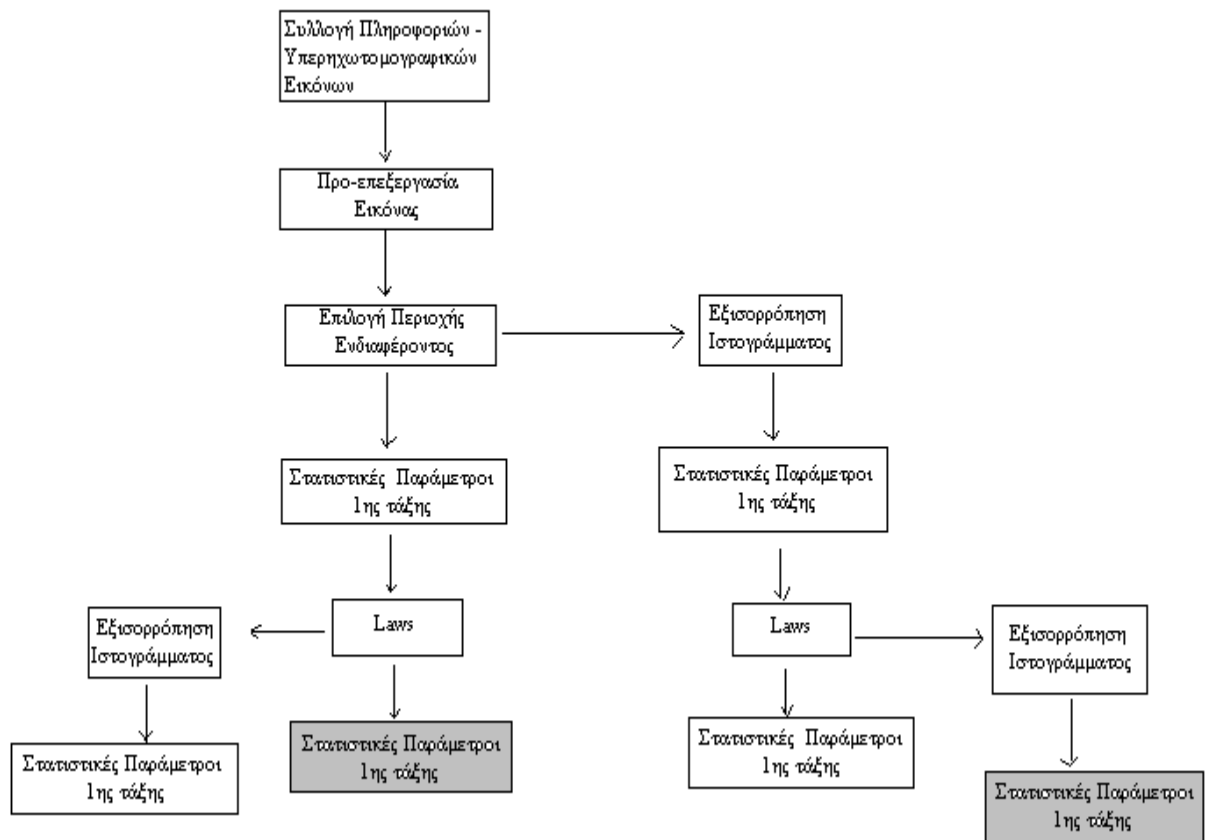
Ακολουθώντας υπολογίζουμε τις στατιστικές παραμέτρους φωτεινότητας στο αποτέλεσμα της συνέλιξης της περιοχής ενδιαφέροντος με τις μάσκες του Laws. Επιπλέον, πραγματοποιούμε εξισορρόπηση ιστογράμματος στις εικόνες που προκύπτουν μετά τη συνέλιξη.

Επαναλαμβάνεται ολόκληρη τη μέθοδο επεξεργασίας στην εικόνα που προκύπτει μετά την εξισορρόπηση ιστογράμματος, και όχι στην αρχική μας εικόνα. Επιπλέον, υπολογίζονται τις στατιστικές παραμέτρους φωτεινότητας των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τη συνέλιξη της περιοχής ενδιαφέροντος με τις

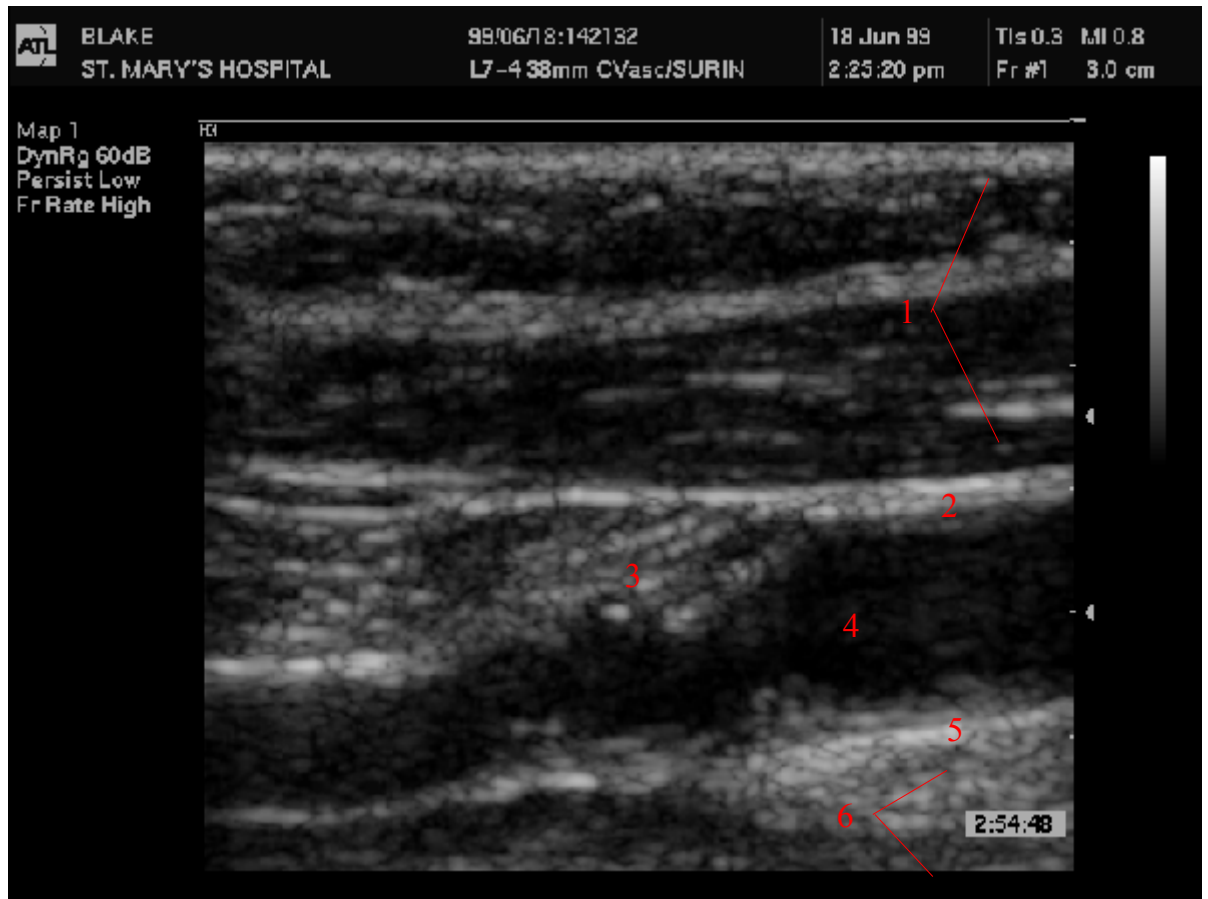
μάσκες του Laws μετά από εξισορρόπηση ιστογράμματος και αυτών . Σε αντίθεση δηλαδή με την πρώτη φορά που οι μετρήσεις έγιναν πάνω στις εικόνες K1..K4, εδώ γίνονται στις εικόνες H-HK1..H-HK4. Στόχος είναι η σύγκριση των στατιστικών παραμέτρων στις δύο περιπτώσεις. Η ακολουθία των εικόνων H-HK1..H-HK4 παρουσιάζει ενδιαφέρον, λόγω της έντονης αίσθησης ανάγλυφης υφής που δίνει η οπτική παρατήρηση των εικόνων.

3.4. Ανάλυση της υφής του περιβάλλοντος ιστού στην καρωτίδα με χρήση της μεθόδου του Laws

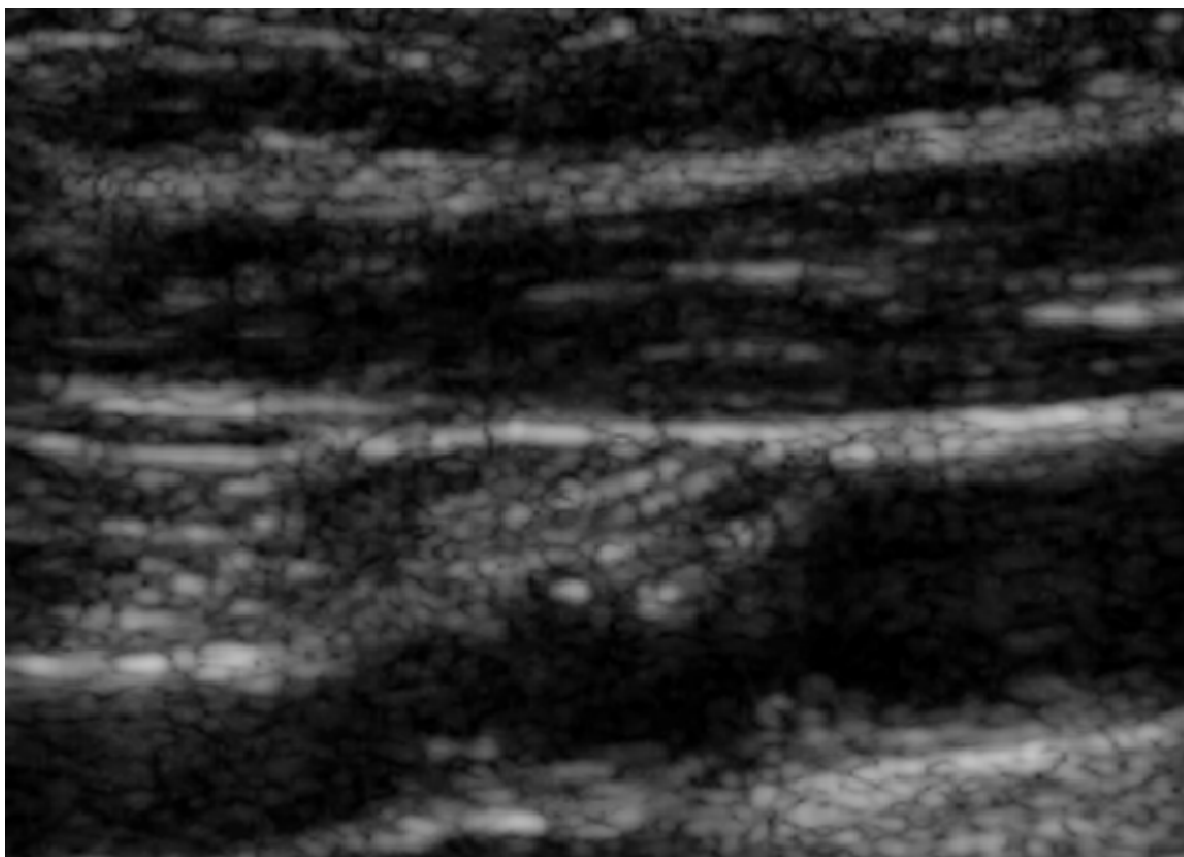
Με την ίδια μέθοδο που αναλύθηκε την υφή της αθηρωματικής πλάκας στην καρωτίδα επεξεργάζονται και οι περιοχές ενδιαφέροντος που αντιστοιχούν σε περιβάλλοντα ιστό, τόσο σε υγιή άτομα, όσο και σε άτομα που εμφανίζουν αθηρωμάτωση. Κατά την επιλογή του ιστού, επιλέγεται κάποια περιοχή η οποία βρίσκεται κοντά ή απέναντι από την αθηρωματική πλάκα, στον ίδιο κατακόρυφο στην εικόνα άξονα (Σχήματα 3-4, 3-11α). Σημειώνεται πως όλες οι περιοχές ενδιαφέροντος που αντιστοιχούν σε ιστούς έχουν το ίδιο μέγεθος , 200x100 εικονοστοιχεία (125,7x251,4 mm²). Ακολουθώς λαμβάνονται οι στατιστικές μετρήσεις πριν και μετά την εφαρμογή των масκών (Σχήμα 3-12, 3-16).



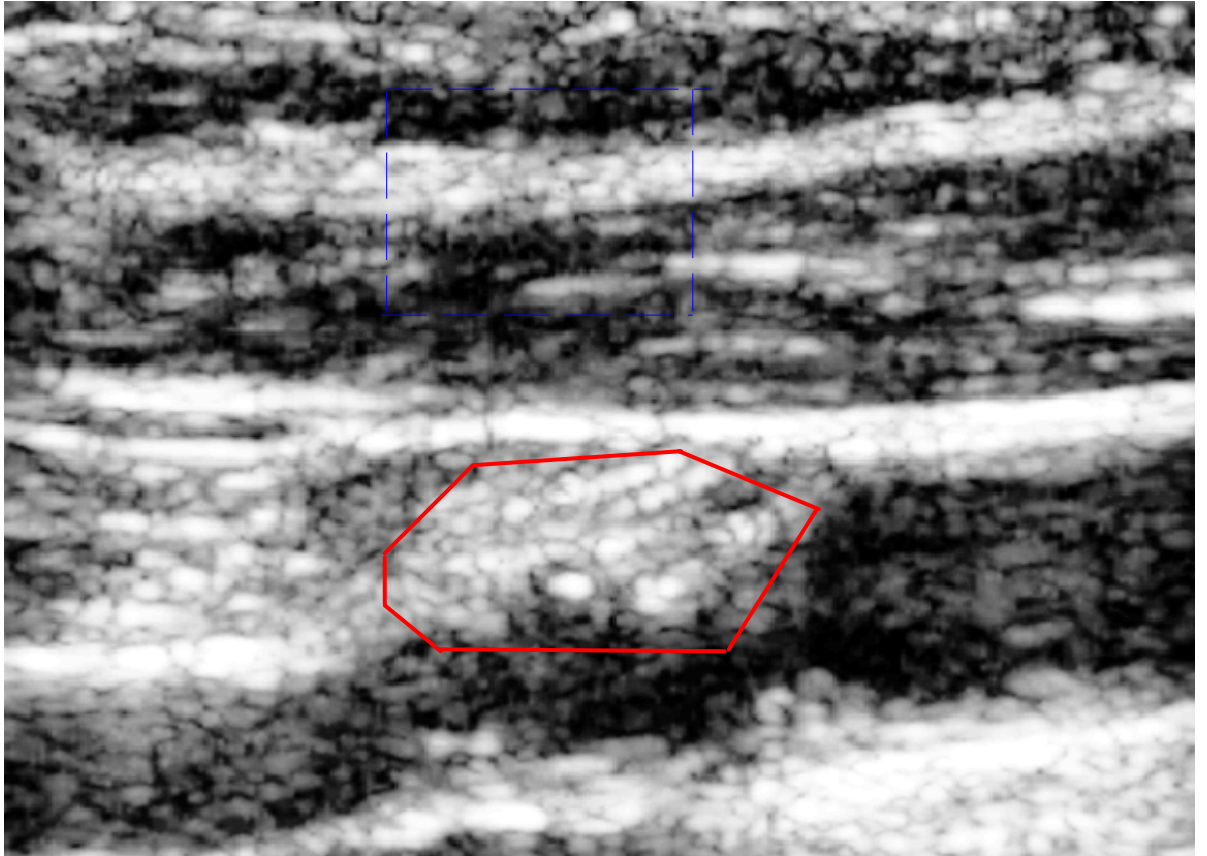
Σχήμα 3-1. Block διάγραμμα της μεθόδου. Με γκρι φόντο επισημαίνονται οι υπολογισμοί των Στατιστικών Παραμέτρων 1^{ης} τάξης που πραγματοποιούνται στην παρούσα διπλωματική.



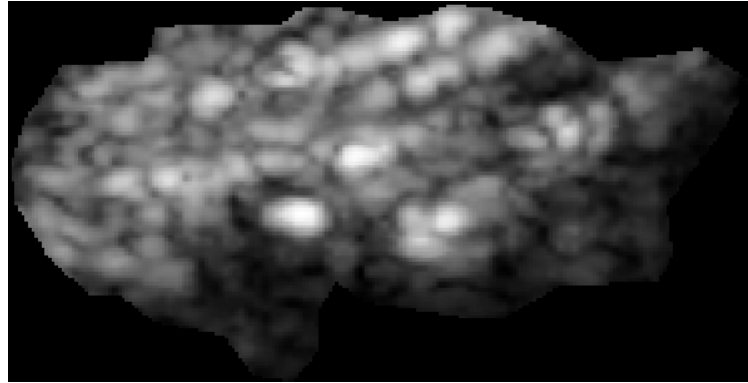
Σχήμα 3-2. Υπερηχοτομογραφική εικόνα β-σάρωσης της καρωτίδας ενός συμπτωματικού ασθενούς. Με κόκκινους αριθμούς σημειώνονται οι εξής περιοχές: 1) Περιβάλλον ιστός, 2) Άνω τοίχωμα, 3) Αθηρωμάτωση, 4) Αυλός (αίμα), 5) Κάτω τοίχωμα, 6) Περιβάλλον ιστός. Το πάνω τοίχωμα βρίσκεται πιο κοντά στην κεφαλή υπερήχων, ενώ το κάτω τοίχωμα βρίσκεται πιο κοντά στην τραχεία.



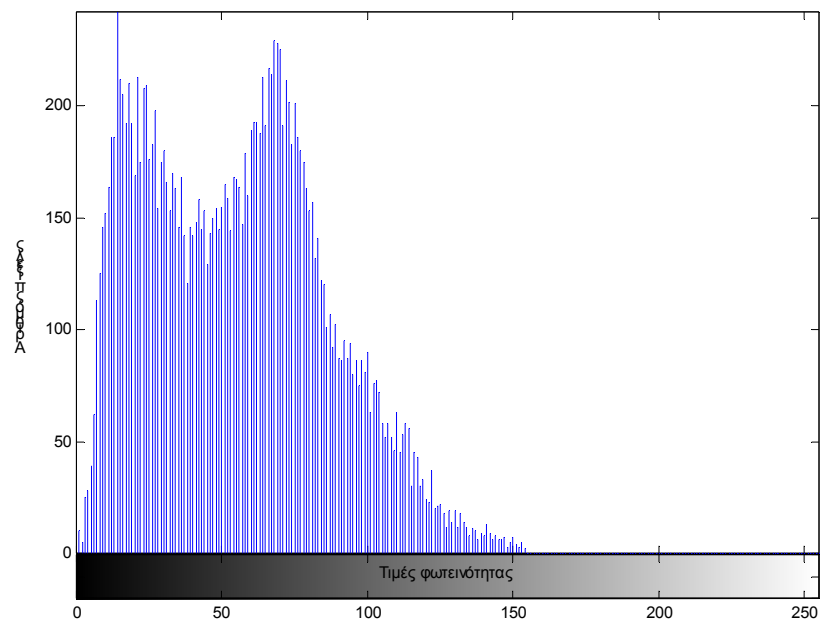
Σχήμα 3-3. Υπερηχοτομογραφική εικόνα β-σάρωσης της καρωτίδας του Σχ.3-2 μετά από αποκοπή της περιοχής στην οποία αναγράφονται πληροφορίες σχετικές με την εξέταση και τις ρυθμίσεις του μηχανήματος.



Σχήμα 3-4. Υπερηχοτομογραφική εικόνα β-σάρωσης της καρωτίδας μετά από εξισορρόπηση ιστογράμματος (histogram equalization). Με κόκκινη τεθλασμένη γραμμή σημειώνεται η περιοχή όπου εμφανίζεται αθηρωμάτωση. Με μπλέ διακεκομμένο πλαίσιο σημειώνεται το τμήμα του περιβάλλοντος ιστού που εξετάζουμε.

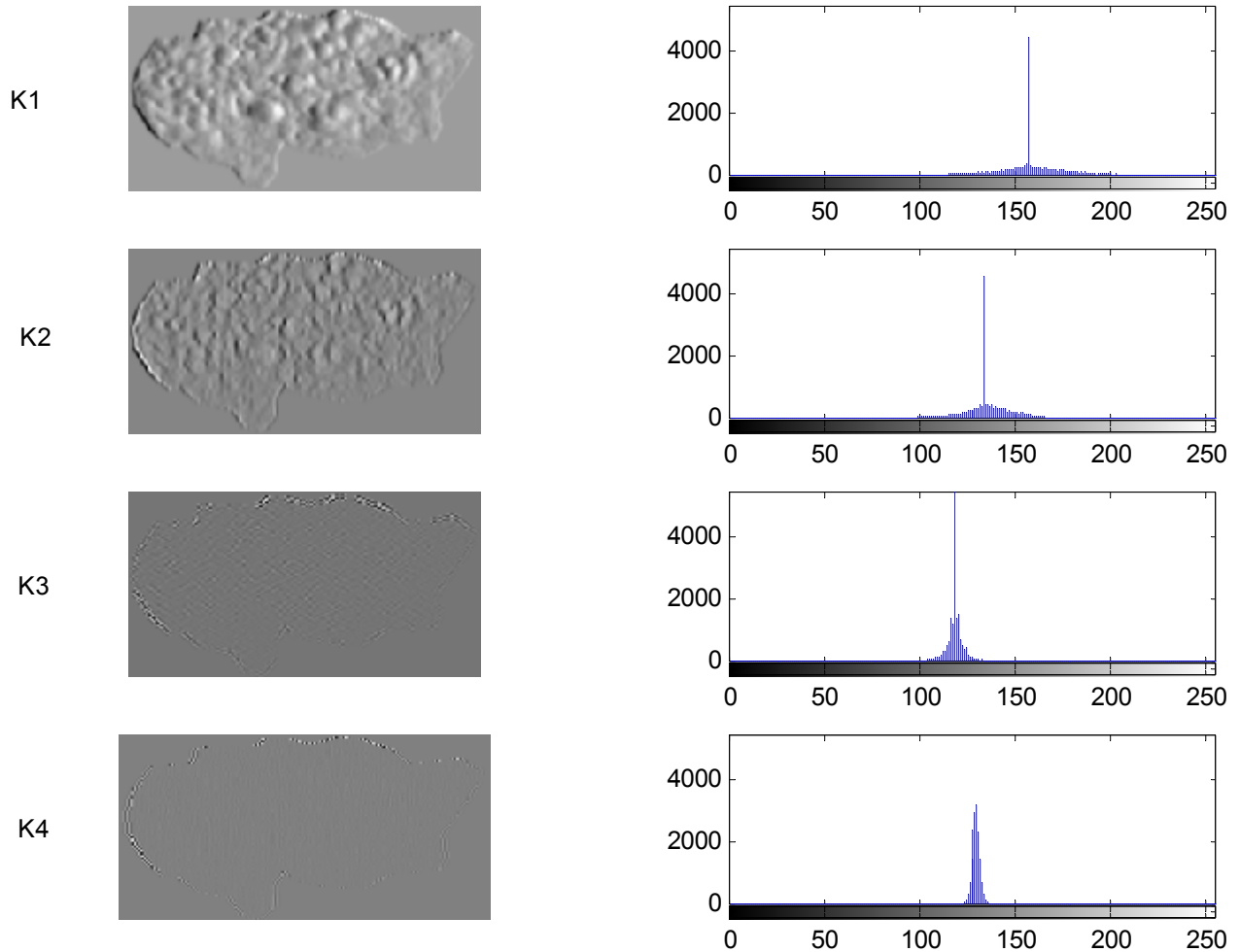


(α)

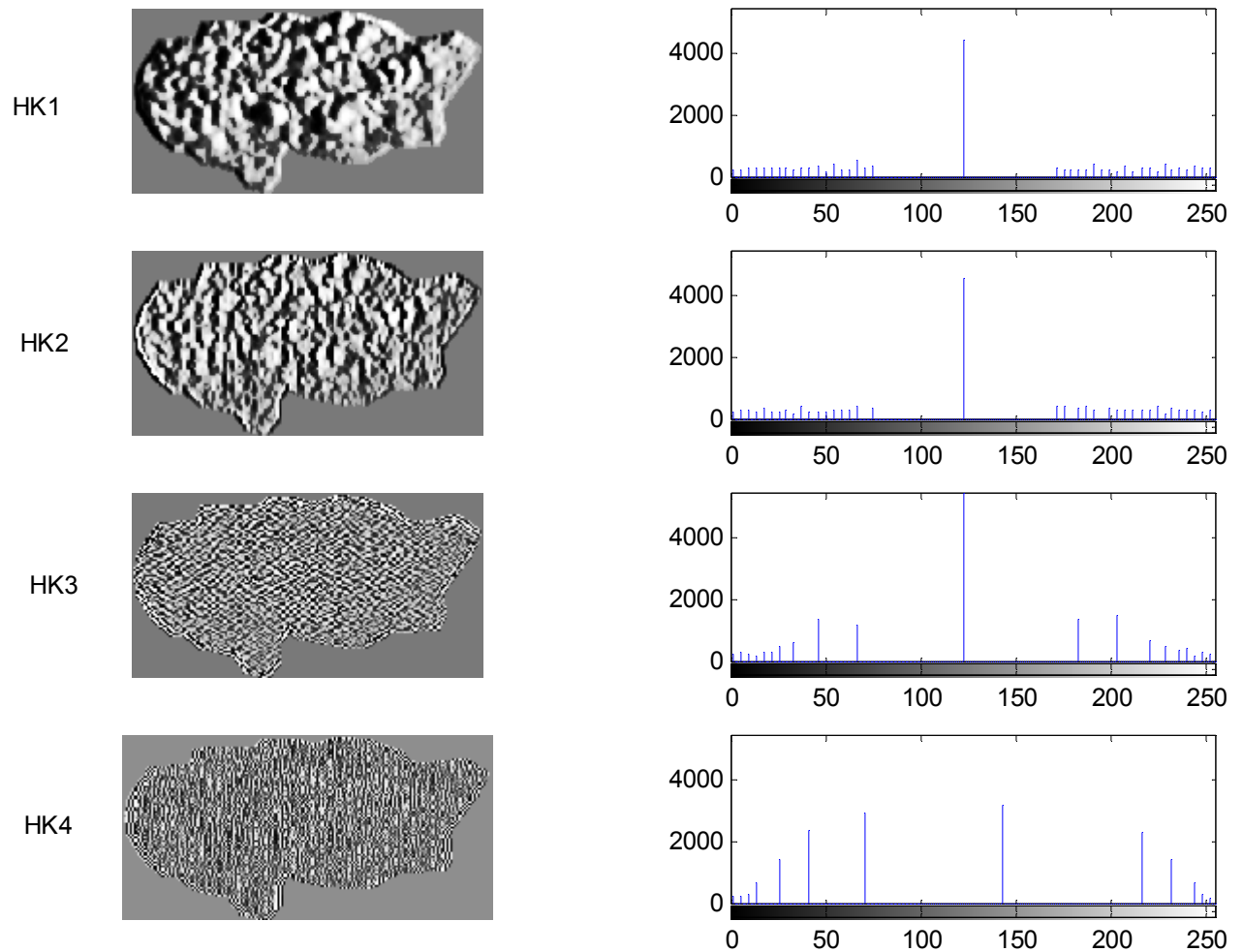


(β)

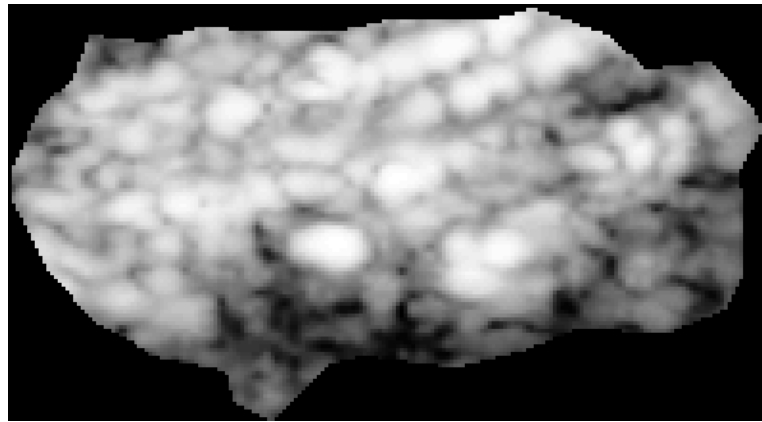
Σχήμα 3-5. (α) Επιλεγμένη περιοχή ενδιαφέροντος που αντιστοιχεί στην αθηρωματική πλάκα. (β) Ιστόγραμμα των τιμών φωτεινότητας των εικονοστοιχείων της.



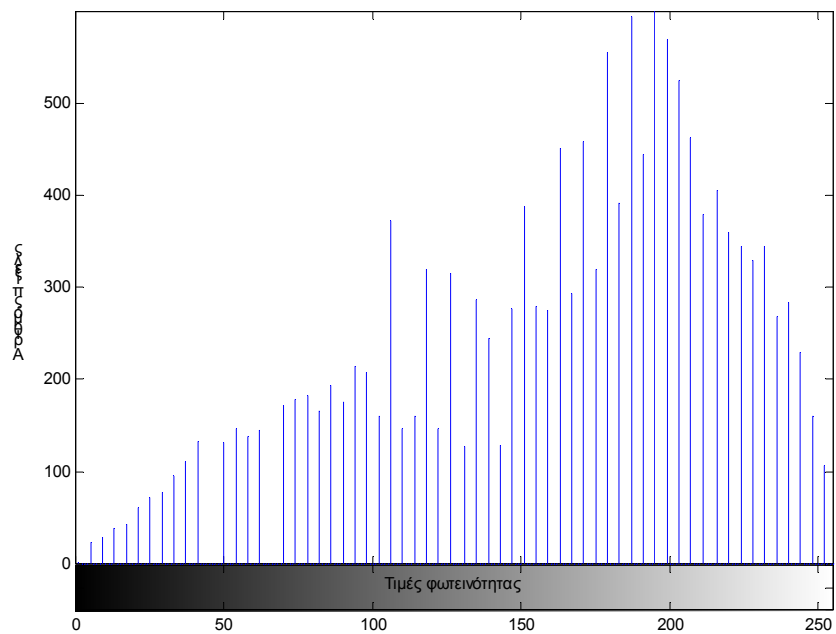
Σχήμα 3-6. Οι εικόνες K1, K2, K3 και K4 αντιστοιχούν στο αποτέλεσμα της συνέλιξης της περιοχής ενδιαφέροντος του Σχ. 3-5(α) με την πρώτη, τη δεύτερη, την τρίτη και την τέταρτη μάσκα του Laws αντίστοιχα. Παραπλεύρως εκάστης βρίσκεται το ιστόγραμμα των τιμών φωτεινότητάς της.



Σχήμα 3-7. Οι εικόνες HK1, HK2, HK3 και HK4 αντιστοιχούν στο αποτέλεσμα της συνέλιξης της περιοχής ενδιαφέροντος με την πρώτη, τη δεύτερη, την τρίτη και την τέταρτη μάσκα του Laws αντίστοιχα, μετά από εξισορρόπηση ιστογράμματος των εικόνων K1, K2, K3 και K4 (Σχ. 3-6). Παραπλεύρως εκάστης βρίσκεται το ιστόγραμμα των τιμών φωτεινότητάς της.

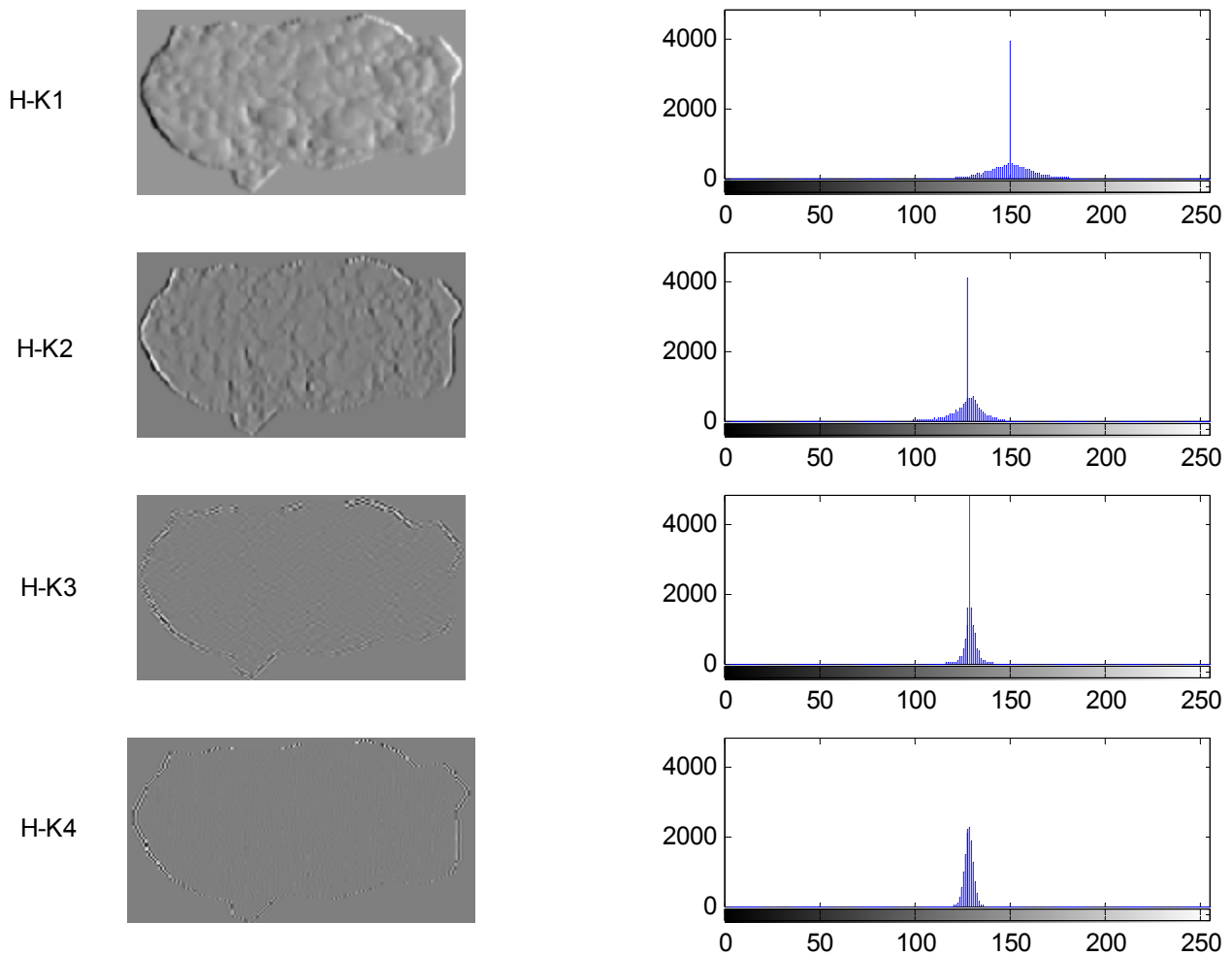


(α)

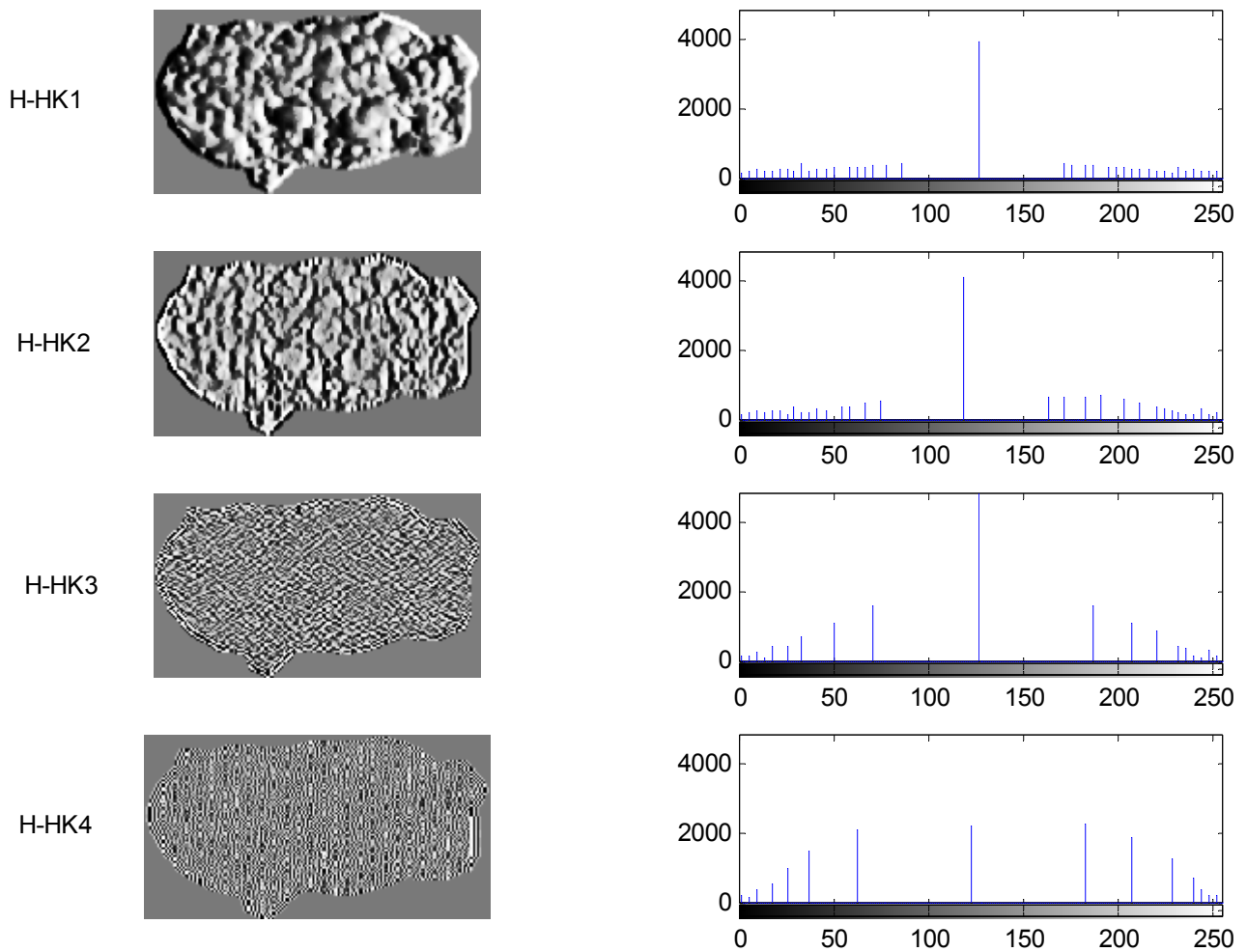


(β)

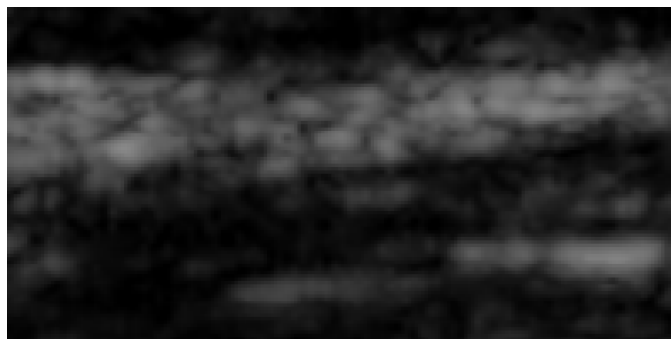
Σχήμα 3-8. (α) Εξισορροπημένη επιλεγμένη περιοχή ενδιαφέροντος που αντιστοιχεί στην αθηρωματική πλάκα. (β) Ιστόγραμμα των τιμών φωτεινότητας των εικονοστοιχείων της.



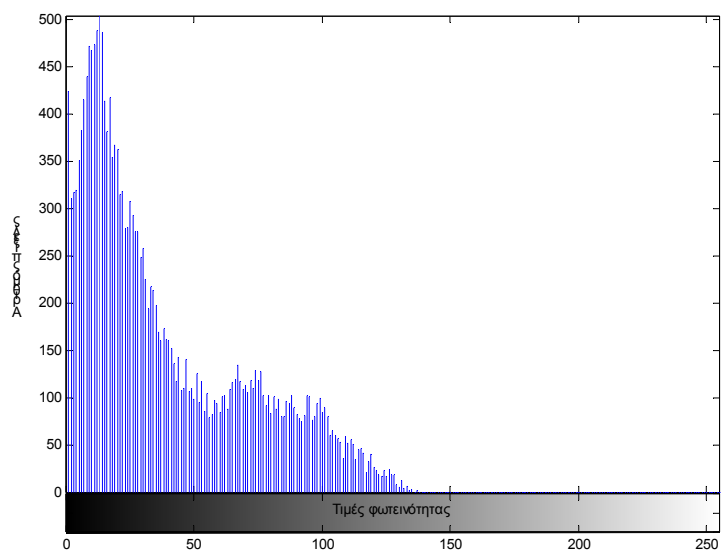
Σχήμα 3-9. Οι εικόνες H-K1, H-K2, H-K3 και H-K4 αντιστοιχούν στο αποτέλεσμα της συνέλιξης της εξισορροπημένης περιοχής ενδιαφέροντος του Σχ. 3-8(α) με την πρώτη, τη δεύτερη, την τρίτη και την τέταρτη μάσκα του Laws αντίστοιχα. Παραπλεύρως εκάστης βρίσκεται το ιστόγραμμα των τιμών φωτεινότητάς της.



Σχήμα 3-10. Οι εικόνες *H-HK1*, *H-HK2*, *H-HK3* και *H-HK4* αντιστοιχούν στο αποτέλεσμα της συνέλιξης της εξισορροπημένης περιοχής ενδιαφέροντος με την πρώτη, τη δεύτερη, την τρίτη και την τέταρτη μάσκα του *Laws* αντίστοιχα, μετά από εξισορρόπηση ιστογράμματος των εικόνων *H-K1*, *H-K2*, *H-K3* και *H-K4* (Σχ. 3-9). Παραπλεύρως εκάστης βρίσκεται το ιστόγραμμα των τιμών φωτεινότητάς της.

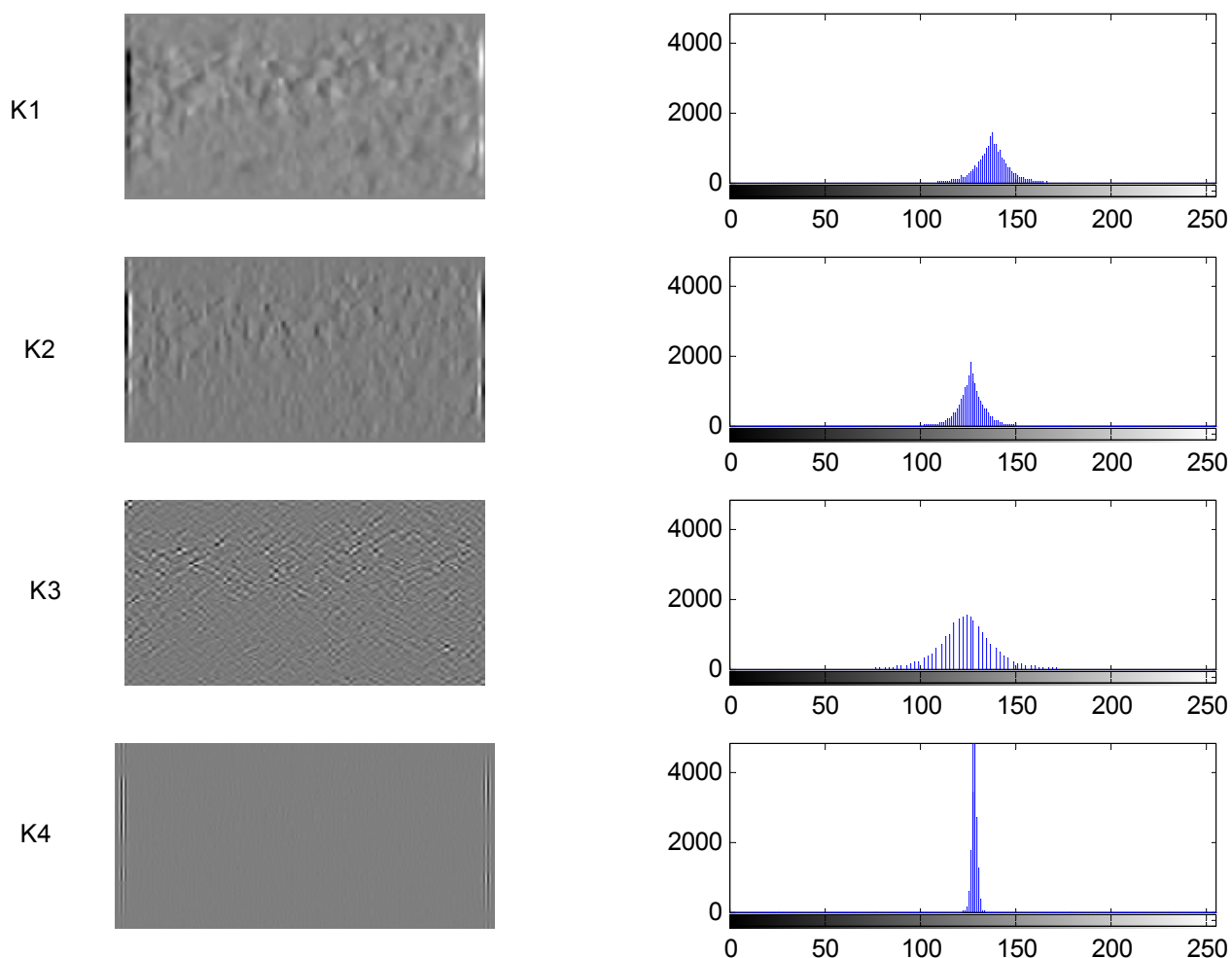


(α)

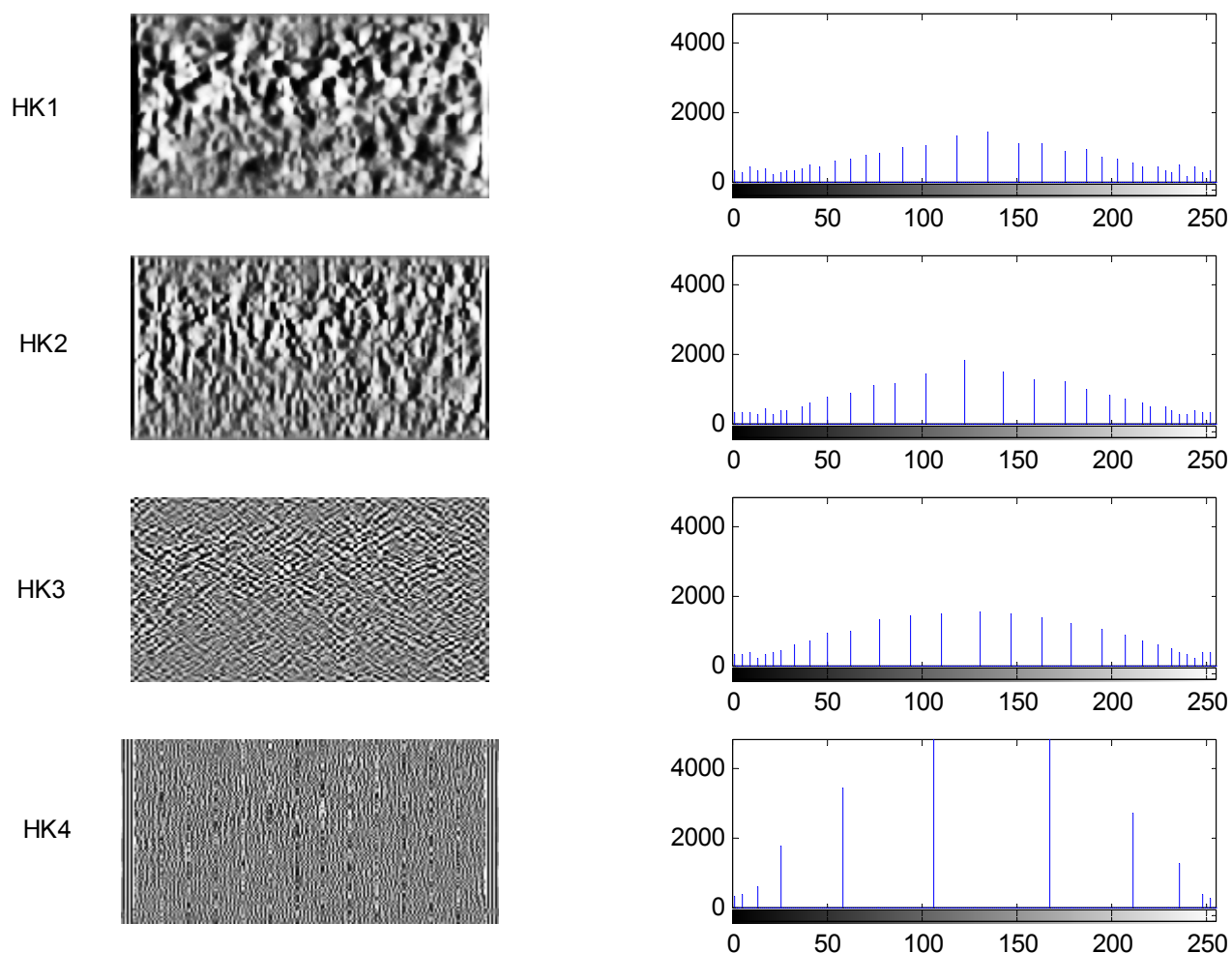


(β)

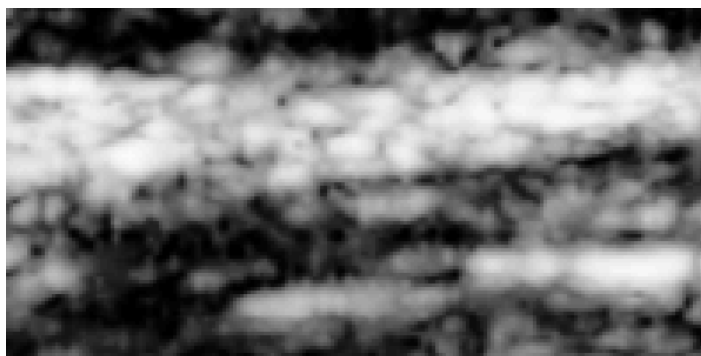
Σχήμα 3-11. (α) Επιλεγμένη περιοχή ενδιαφέροντος που αντιστοιχεί σε περιβάλλοντα ιστό. (β) Ιστόγραμμα των τιμών φωτεινότητας των εικονοστοιχείων της.



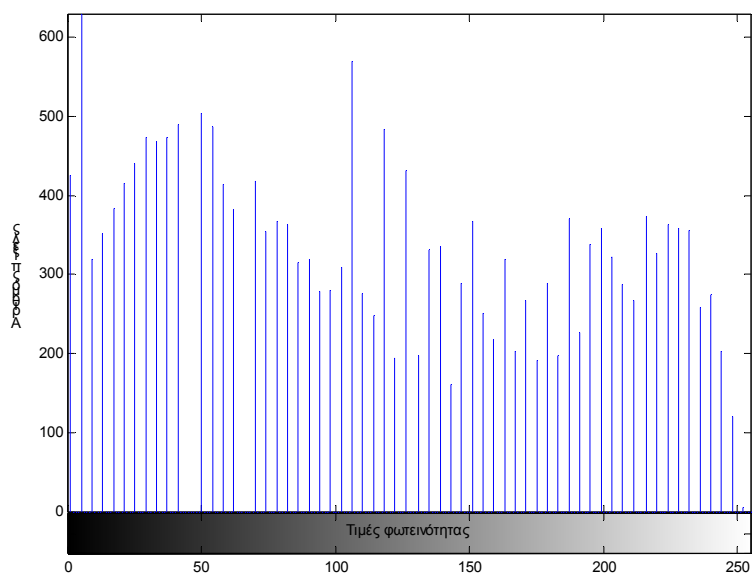
Σχήμα 3-12. Οι εικόνες K1, K2, K3 και K4 αντιστοιχούν στο αποτέλεσμα της συνέλιξης της περιοχής ενδιαφέροντος, που αντιστοιχεί σε ιστό, με την πρώτη, τη δεύτερη, την τρίτη και την τέταρτη μάσκα του Laws αντίστοιχα. Παραπλεύρως εκάστης βρίσκεται το ιστόγραμμα των τιμών φωτεινότητάς της.



Σχήμα 3-13. Οι εικόνες HK1, HK2, HK3 και HK4 αντιστοιχούν στο αποτέλεσμα της συνέλιξης της περιοχής ενδιαφέροντος, που αντιστοιχεί σε ιστό, με την πρώτη, τη δεύτερη, την τρίτη και την τέταρτη μάσκα του Laws, μετά από εξισορρόπηση ιστογράμματος των εικόνων K1, K2, K3 και K4 (Σχ. 3-12). Παραπλεύρως εκάστης βρίσκεται το ιστόγραμμα των τιμών φωτεινότητάς της.

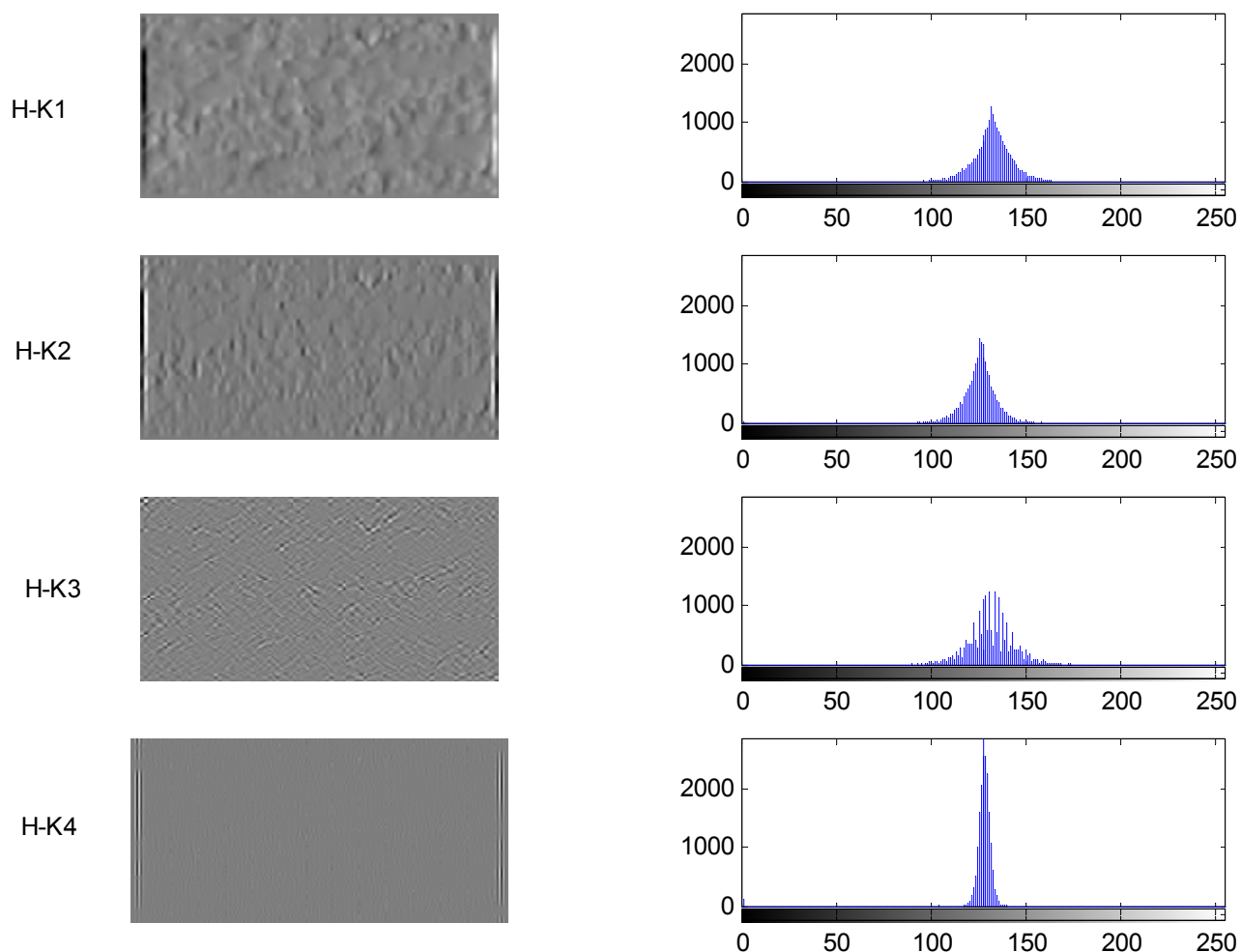


(α)

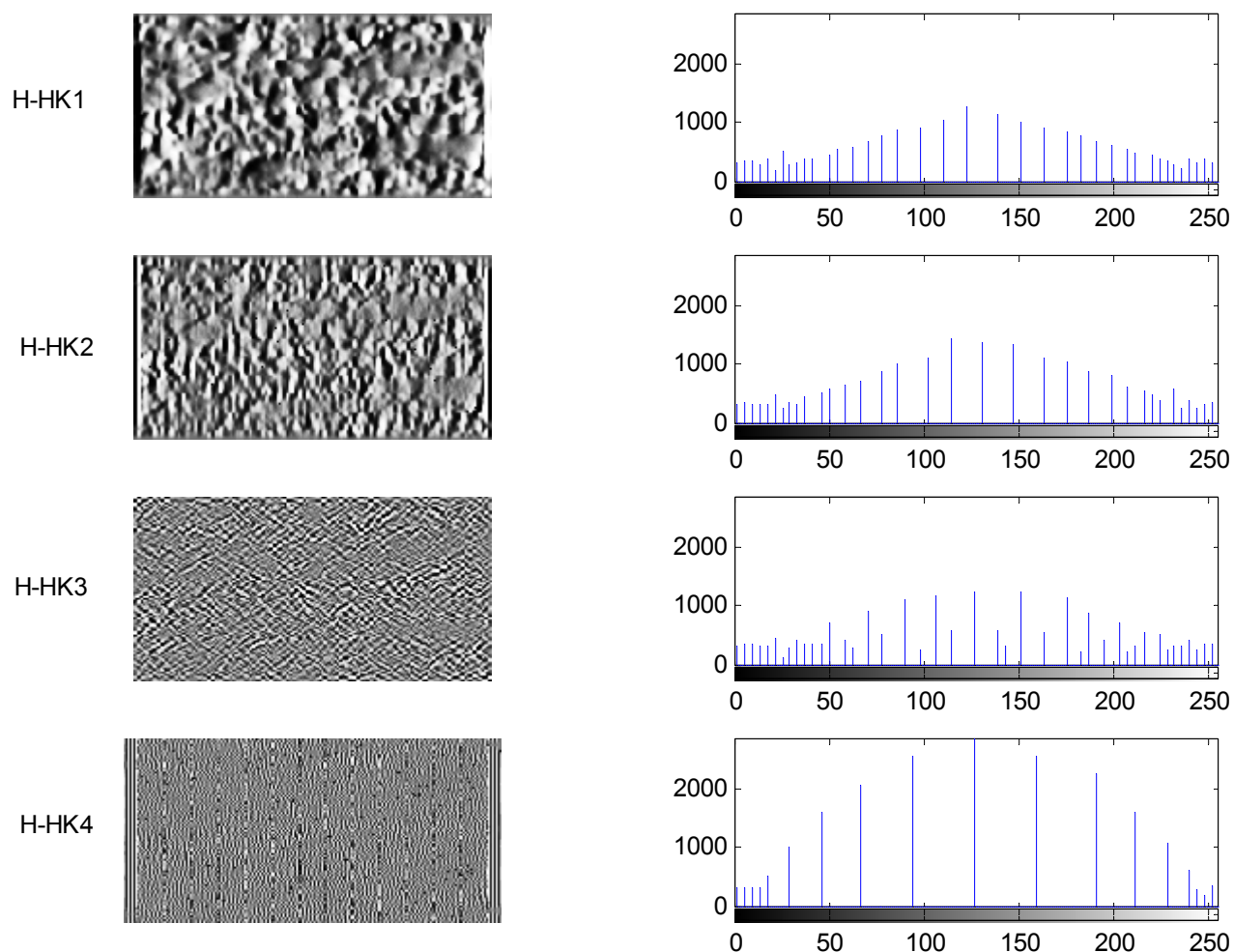


(β)

Σχήμα 3-14. (α) Εξισορροπημένη επιλεγμένη περιοχή ενδιαφέροντος στον ιστό. (β) Ιστόγραμμα των τιμών φωτεινότητας των εικονοστοιχείων αυτής.



Σχήμα 3-15. Οι εικόνες H-K1, H-K2, H-K3 και H-K4 αντιστοιχούν στο αποτέλεσμα της συνέλιξης της εξισορροπημένης περιοχής ενδιαφέροντος, που αντιστοιχεί σε ιστό, με την πρώτη, τη δεύτερη, την τρίτη και την τέταρτη μάσκα του Laws αντίστοιχα. Παραπλεύρως εκάστης βρίσκεται το ιστόγραμμα των τιμών φωτεινότητάς της.



Σχήμα 3-16. Οι εικόνες H-HK1, H-HK2, H-HK3 και H-HK4 αντιστοιχούν στο αποτέλεσμα της συνέλιξης της εξισορροπημένης περιοχής ενδιαφέροντος, που αντιστοιχεί σε ιστό, με την πρώτη, τη δεύτερη, την τρίτη και την τέταρτη μάσκα του Laws αντίστοιχα, μετά από εξισορρόπηση ιστογράμματος των εικόνων H-K1, H-K2, H-K3 ΚΑΙ H-K4 (Σχ. 3-15). Παραπλεύρως εκάστης βρίσκεται το ιστόγραμμα των τιμών φωτεινότητάς της.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΕΠΙΛΟΓΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΥΦΗΣ ΓΙΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟ / ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΟΥ ΙΣΤΟΥ ΤΗΣ ΚΑΡΩΤΙΔΑΣ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα εφαρμογής της μεθόδου ανάλυσης υφής αθηρωματικής πλάκας καρωτίδας και υγιούς ιστού και γίνεται η επιλογή των χαρακτηριστικών υφής για τον χαρακτηρισμό / ταξινόμηση του ιστού της καρωτίδας. Στις παραγράφους 4.1 και 4.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του TTEST κατά τη σύγκριση μεταξύ αθηρωματικών πλακών και φυσιολογικού ιστού καρωτίδας και μεταξύ συμπτωματικών και ασυμπτωματικών αθηρωματικών πλακών αντίστοιχα. Στην παράγραφο 4.3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του συντελεστή συσχέτισης μεταξύ συμπτωματικών και ασυμπτωματικών περιπτώσεων. Τέλος, στην παράγραφο 4.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της στατιστικής μεθόδου ANOVA. Τελικός σκόχος της διεξαγωγής συγκριτικών μετρήσεων είναι η επιλογή των χαρακτηριστικών που στοιχειοθετούν τη διαφοροποίηση της αθηρωματικής πλάκας από τον περιβάλλοντα ιστό και τη διάκριση μεταξύ συμπτωματικών και ασυμπτωματικών αθηρωματικών πλακών.

4.1. Σύγκριση αθηρωματικών πλακών και υγιών ιστών

4.1.1. Συγκριτικά αποτελέσματα TTEST σε αθηρωματικές πλάκες-ιστούς

Στους Πίνακες 4-1 έως 4-20 παραθέτονται οι τιμές των στατιστικών παραμέτρων πρώτης τάξεως που υπολογίστηκαν από τις σχέσεις (2.1)-(2.16), (3.1) και (3.2), όπως παρουσιάζονται στα κεφάλαια 2 και 3.

Σε κάθε πίνακα αναγράφεται η παράμετρος της οποίας τη μέση τιμή εξετάζουμε, αναφορικά με τις μετρήσεις που έγιναν στις εικόνες υπερήχων του δείγματος με το οποίο εργαστήκαμε. Φαίνονται οι μέσες τιμές για τις περιοχές ενδιαφέροντος που αντιστοιχούν σε αθηρωματικές πλάκες, καθώς και για αυτές που αντιστοιχούν σε ιστό. Μετρήσεις πραγματοποιούνται τόσο στις περιοχές ενδιαφέροντος που προέρχονται από τις αρχικές εικόνες υπερήχων, όσο και στις εικόνες που προκύπτουν μετά την επεξεργασία τους με τη διαδικασία της εξισορρόπησης ιστογράμματος (Histogram Equalization).

Κάθε Πίνακας έχει πέντε στήλες μετρήσεων. Η πρώτη στήλη αντιστοιχεί σε μέτρηση στην περιοχή ενδιαφέροντος πριν από τη συνέλιξη με τις μάσκες του Laws, ενώ οι επόμενες τέσσερις αντιστοιχούν στη συνέλιξη της περιοχής με τις αντίστοιχες τέσσερις πιο σημαντικές μάσκες. Παραθέτονται επιπλέον τα αποτελέσματα του TTEST μεταξύ των επιλεγμένων περιοχών ενδιαφέροντος όπου εμφανίζεται αθηρωμάτωση και των αντίστοιχων περιοχών με ιστό, τόσο στις κανονικές εικόνες, όσο και στις εξισορροπημένες.

Τα αποτελέσματα του TTEST που είναι πιο έντονα γραμμένα δηλώνουν τις παραμέτρους εκείνες των οποίων οι τιμές διαφοροποιούνται μεταξύ αθηρωματικής πλάκας και ιστού, αφού οι πιθανότητες είναι μικρότερες του 0,05.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4-1**Ελάχιστη Τιμή Φωτεινότητας (F1)**

Μέσες τιμές της ελάχιστης τιμής φωτεινότητας για περιοχές ενδιαφέροντος που αντιστοιχούν σε αθηρωματικές πλάκες και φυσιολογικούς ιστούς αντίστοιχα. Η μεταβλητή F1 αφορά στην περιοχή ενδιαφέροντος χωρίς συνέλιξη, ενώ οι μεταβλητές F11-F14 μετά από συνέλιξη της περιοχής με τις 4 μάσκες του Laws.

	F1	F11	F12	F13	F14
Χωρίς Εξισορρόπηση Ιστογράμματος					
ΑΘΗΡ.ΠΛΑΚΑ	0	6,06± 10,66	11,94± 20,28	5,61± 10,71	11,22± 21,68
Ιστός	1,45± 3,63	0	0	0	0
TTEST	0,098502	0,011019	0,008598	0,018305	0,019671
Με Εξισορρόπηση Ιστογράμματος					
ΑΘΗΡ.ΠΛΑΚΑ	33,89± 31,89	0	0	0	0
Ιστός	38,82± 30,71	0	0	1,27± 4,17	0
TTEST	0,622515	–	–	0,203737	–

ΠΙΝΑΚΑΣ 4-2**Μέγιστη Τιμή Φωτεινότητας (F2)**

Μέσες τιμές της μέγιστης τιμής φωτεινότητας για περιοχές ενδιαφέροντος που αντιστοιχούν σε αθηρωματικές πλάκες και φυσιολογικούς ιστούς αντίστοιχα. Η μεταβλητή F2 αφορά στην περιοχή ενδιαφέροντος χωρίς συνέλιξη, ενώ οι μεταβλητές F21-F24 μετά από συνέλιξη της περιοχής με τις 4 μάσκες του Laws.

	F2	F21	F22	F23	F24
Χωρίς Εξισορρόπηση Ιστογράμματος					
ΑΘΗΡ.ΠΛΑΚΑ	136,67± 35,8	239,39± 27,7	234,78± 23,93	246,17± 15,68	243,06± 21,82
Ιστός	175± 18,4	255±0	255±0	255±0	255±0
TTEST	9,16E-05	0,011622	0,000303	0,011671	0,014022
Με Εξισορρόπηση Ιστογράμματος					
ΑΘΗΡ.ΠΛΑΚΑ	244,94± 15,89	255±0	255±0	255±0	255±0
Ιστός	254,64± 1,18	255±0	255±0	255±0	255±0
TTEST	0,006857	–	–	–	–

ΠΙΝΑΚΑΣ 4-3**Ενδιάμεση Τιμή Φωτεινότητας (F3)**

Μέσες τιμές της ενδιάμεσης τιμής φωτεινότητας για περιοχές ενδιαφέροντος που αντιστοιχούν σε αθηρωματικές πλάκες και φυσιολογικούς ιστούς αντίστοιχα. Η μεταβλητή F3 αφορά στην περιοχή ενδιαφέροντος χωρίς συνέλιξη, ενώ οι μεταβλητές F31-F34 μετά από συνέλιξη της περιοχής με τις 4 μάσκες του Laws.

	F3	F31	F32	F33	F34
Χωρίς Εξισορρόπηση Ιστογράμματος					
ΑΘΗΡ.ΠΛΑΚΑ	22,83± 11,97	124,78± 24,49	125± 11	124,22± 9,03	126,44± 0,86
Ιστός	62,09± 18,54	125,64± 12,08	124,77± 2,94	127,73± 4,15	126,68± 0,48
TTEST	2,43E-09	0,885795	0,926247	0,112153	0,27415
Με Εξισορρόπηση Ιστογράμματος					
ΑΘΗΡ.ΠΛΑΚΑ	114,11± 35,95	125,17± 3,60	120± 2,74	126,56± 4,15	121,5± 5,24
Ιστός	186,59± 31,97	128,27± 6,69	125,45± 8,83	126,36± 3,39	123,68± 8,46
TTEST	5,44E-08	0,085058	0,016139	0,872824	0,346303

ΠΙΝΑΚΑΣ 4- 4**Μέση Τιμή Φωτεινότητας (F4)**

Μέσες τιμές της μέσης τιμής φωτεινότητας για περιοχές ενδιαφέροντος που αντιστοιχούν σε αθηρωματικές πλάκες και φυσιολογικούς ιστούς αντίστοιχα. Η μεταβλητή F4 αφορά στην περιοχή ενδιαφέροντος χωρίς συνέλιξη, ενώ οι μεταβλητές F41-F44 μετά από συνέλιξη της περιοχής με τις 4 μάσκες του Laws.

	F4	F41	F42	F43	F44
Χωρίς Εξισορρόπηση Ιστογράμματος					
ΑΘΗΡ.ΠΛΑΚΑ	31,27± 12,99	126,11± 24,69	127,12± 10,84	125,65± 9,04	128,32± 0,81
Ιστός	67,50± 15,53	126,61± 12,22	125,38± 2,94	128,41± 4,6	125,15± 0,57
TTEST	1,58518E-09	0,933205	0,475593	0,219948	4,22E-17
Με Εξισορρόπηση Ιστογράμματος					
ΑΘΗΡ.ΠΛΑΚΑ	122,07± 32,75	126,41± 2,91	129,66± 1,34	128,53± 0,59	130,12± 2,77
Ιστός	181,42± 26,47	127,58± 0,69	127,50± 0,59	127,67± 0,62	125,07± 0,7
TTEST	1,9358E-07	0,074882	4,43E-08	7,26E-05	5,09E-10

ΠΙΝΑΚΑΣ 4-5**Σταθερή Απόκλιση Φωτεινότητας (F5)**

Μέσες τιμές της σταθερής απόκλισης της φωτεινότητας για περιοχές ενδιαφέροντος που αντιστοιχούν σε αθηρωματικές πλάκες και φυσιολογικούς ιστούς αντίστοιχα. Η μεταβλητή F5 αφορά στην περιοχή ενδιαφέροντος χωρίς συνέλιξη, ενώ οι μεταβλητές F51-F54 μετά από συνέλιξη της περιοχής με τις 4 μάσκες του Laws.

	F5	F51	F52	F53	F54
Χωρίς Εξισορρόπηση Ιστογράμματος					
ΑΘΗΡ.ΠΛΑΚΑ	25,08± 8,1	18,76± 4,58	14,14± 3,81	10,81± 6,34	7,53± 3,39
Ιστός	35,09± 3,3	13,22± 1,41	14,16± 1,73	13,21± 5,8	10,43± 1,6
TTEST	5,26E-06	3,98E-06	0,985659	0,220942±	0,001015
Με Εξισορρόπηση Ιστογράμματος					
ΑΘΗΡ.ΠΛΑΚΑ	49,43± 8,93	76,21± 1,41	75,72± 1,269	75,19± 1,48	85,57± 2,94
Ιστός	47,68± 12,21	74,41± 0,26	74,39± 0,25	74,39± 0,25	73,26± 0,28
TTEST	0,615133	8,31E-07	2,3E-05	0,016647	1,88E-21

ΠΙΝΑΚΑΣ 4-6**Συντελεστής Συσχέτισης (F6)**

Μέσες τιμές του συντελεστή συσχέτισης για περιοχές ενδιαφέροντος που αντιστοιχούν σε αθηρωματικές πλάκες και φυσιολογικούς ιστούς αντίστοιχα. Η μεταβλητή F6 αφορά στην περιοχή ενδιαφέροντος χωρίς συνέλιξη, ενώ οι μεταβλητές F61-F64 μετά από συνέλιξη της περιοχής με τις 4 μάσκες του Laws.

	F6	F61	F62	F63	F64
Χωρίς Εξισορρόπηση Ιστογράμματος					
ΑΘΗΡ.ΠΛΑΚΑ	0,846± 0,183	0,154± 0,048	0,113± 0,035	0,086± 0,051	0,059± 0,027
Ιστός	0,077± 0,024	0,105± 0,015	0,113± 0,014	0,104± 0,049	0,083± 0,013
TTEST	2,13E-21	6,42E-05	0,977	0,273971	0,00047
Με Εξισορρόπηση Ιστογράμματος					
ΑΘΗΡ.ΠΛΑΚΑ	0,427± 0,108	0,603± 0,017	0,584± 0,01	0,585± 0,011	0,658± 0,032
Ιστός	0,038± 0,012	0,583± 0,002	0,583± 0,002	0,583± 0,004	0,586± 0,003
TTEST	3,47E-19	3,71E-06	0,799808	0,354072	5,82E-13

ΠΙΝΑΚΑΣ 4-7**Λοξότητα των Επιπέδων του Γκρι / Φωτεινότητων (F7)**

Μέσες τιμές της λοξότητας των επιπέδων του γκρι / φωτεινότητων για περιοχές ενδιαφέροντος που αντιστοιχούν σε αθηρωματικές πλάκες και φυσιολογικούς ιστούς αντίστοιχα. Η μεταβλητή F7 αφορά στην περιοχή ενδιαφέροντος χωρίς συνέλιξη, ενώ οι μεταβλητές F71-F74 μετά από συνέλιξη της περιοχής με τις 4 μάσκες του Laws.

	F7	F71	F72	F73	F74
Χωρίς Εξισορρόπηση Ιστογράμματος					
ΑΘΗΡ.ΠΛΑΚΑ	1,39± 0,74	-0,14± 0,52	-0,59± 0,56	-1,08± 1,94	-1,37± 2,99
Ιστός	0,53± 0,37	0,09± 1,01	0,07± 0,5	-0,09± 1,05	0,86± 0,84
TTEST	2,4E-05	0,394	0,000356	0,044656	0,001845
Με Εξισορρόπηση Ιστογράμματος					
ΑΘΗΡ.ΠΛΑΚΑ	0,35± 0,37	0,03± 0,05	-0,52± 2,24	0,002± 0,02	-0,05± 0,08
Ιστός	-0,36± 0,41	-0,29± 1,53	0,04± 0,02	0,24± 1,36	0,14± 0,02
TTEST	1,31E-06	0,38709919	0,25034137	0,46002735	1,91E-12

ΠΙΝΑΚΑΣ 4-8**Κύρτωση των Επιπέδων του Γκρι / Φωτεινότητων (F8)**

Μέσες τιμές της κύρτωσης των επιπέδων του γκρι / φωτεινότητων για περιοχές ενδιαφέροντος που αντιστοιχούν σε αθηρωματικές πλάκες και φυσιολογικούς ιστούς αντίστοιχα. Η μεταβλητή F8 αφορά στην περιοχή ενδιαφέροντος χωρίς συνέλιξη, ενώ οι μεταβλητές F81-F84 μετά από συνέλιξη της περιοχής με τις 4 μάσκες του Laws.

	F8	F81	F82	F83	F84
Χωρίς Εξισορρόπηση Ιστογράμματος					
ΑΘΗΡ.ΠΛΑΚΑ	2,65± 5,29	5,82± 3,21	9,31± 6,48	58,45± 29,36	123,09± 79,77
Ιστός	-0,32± 0,67	23,89± 7,75	26,86± 8,48	20,88± 23,66	57,09± 13,02
TTEST	0,012699	2,85E-11	1,24E-08	6,57E-05	0,000467
Με Εξισορρόπηση Ιστογράμματος					
ΑΘΗΡ.ΠΛΑΚΑ	-0,5± 0,63	-1,22± 0,12	-2,37± 3,36	-2,25± 3,14	-1,59± 0,06
Ιστός	-0,48± 0,47	-1,18± 0,01	-1,18± 0,01	-1,19± 0,02	-1,12± 0,02
TTEST	0,896015	0,051972	0,114605	0,114336	2,04E-31

ΠΙΝΑΚΑΣ 4-9**Ενέργεια των Επιπέδων του Γκρι / Φωτεινότητων (F9)**

Μέσες τιμές της ενέργειας των επιπέδων του γκρι / φωτεινότητων για περιοχές ενδιαφέροντος που αντιστοιχούν σε αθηρωματικές πλάκες και φυσιολογικούς ιστούς αντίστοιχα. Η μεταβλητή F9 αφορά στην περιοχή ενδιαφέροντος χωρίς συνέλιξη, ενώ οι μεταβλητές F91-F94 μετά από συνέλιξη της περιοχής με τις 4 μάσκες του Laws.

	F9	F91	F92	F93	F94
Χωρίς Εξισορρόπηση Ιστογράμματος					
ΑΘΗΡ.ΠΛΑΚΑ	0,021± 0,013	0,091± 0,044	0,098± 0,044	0,159± 0,05	0,140± 0,041
Ιστός	0,009± 0,002	0,032± 0,005	0,043± 0,01	0,039± 0,013	0,187± 0,033
TTEST	8,7E-05	2,81E-07	1,58E-06	3,41E-13	0,000281
Με Εξισορρόπηση Ιστογράμματος					
ΑΘΗΡ.ΠΛΑΚΑ	0,031± 0,012	0,096± 0,041	0,101± 0,039	0,142± 0,044	0,087± 0,011
Ιστός	0,03± 0,009	0,045± 0,009	0,053± 0,01	0,043± 0,007	0,105± 0,008
TTEST	0,65768	9,95E-07	1,96E-06	7,8E-13	8,67E-07

ΠΙΝΑΚΑΣ 4-10**Εντροπία των Επιπέδων του Γκρι / Φωτεινότητων (F10)**

Μέσες τιμές της εντροπίας των επιπέδων του γκρι / φωτεινότητων για περιοχές ενδιαφέροντος που αντιστοιχούν σε αθηρωματικές πλάκες και φυσιολογικούς ιστούς αντίστοιχα. Η μεταβλητή F10 αφορά στην περιοχή ενδιαφέροντος χωρίς συνέλιξη, ενώ οι μεταβλητές F101-F104 μετά από συνέλιξη της περιοχής με τις 4 μάσκες του Laws.

	F10	F101	F102	F103	F104
Χωρίς Εξισορρόπηση Ιστογράμματος					
ΑΘΗΡ.ΠΛΑΚΑ	4,24± 0,42	3,74± 0,31	3,49± 0,34	2,6± 0,36	2,32± 0,36
Ιστός	4,83± 0,11	3,71± 0,14	3,51± 0,18	3,58± 0,31	2,06± 0,17
TTEST	1,97E-07	0,728926	0,78838	2,79E-11	0,003988
Με Εξισορρόπηση Ιστογράμματος					
ΑΘΗΡ.ΠΛΑΚΑ	3,68± 0,24	3,18± 0,25	3,09± 0,24	2,53± 0,19	2,62± 0,12
Ιστός	3,64± 0,24	3,28± 0,17	3,14± 0,16	3,34± 0,15	2,37± 0,08
TTEST	0,666528	0,162289	0,438046	1,44E-17	2,53E-09

ΠΙΝΑΚΑΣ 4-11**Ποσοστιαία Κατανομή 10% (F11)**

Μέσες τιμές της ποσοστιαίας κατανομής 10% για περιοχές ενδιαφέροντος που αντιστοιχούν σε αθηρωματικές πλάκες και φυσιολογικούς ιστούς αντίστοιχα. Η μεταβλητή F11 αφορά στην περιοχή ενδιαφέροντος χωρίς συνέλιξη, ενώ οι μεταβλητές F111-F114 μετά από συνέλιξη της περιοχής με τις 4 μάσκες του Laws.

	F11	F111	F112	F113	F114
Χωρίς Εξισορρόπηση Ιστογράμματος					
ΑΘΗΡ.ΠΛΑΚΑ	5,06± 4,35	103,44± 25,29	110,89± 13,55	119,33± 8	123,72± 1,9
Ιστός	23,82± 13,29	113,64± 11,88	114,73± 2,98	115,27± 6,14	124,77± 0,43
TTEST	1,33E-06	0,101113±	0,203207	0,077225	0,016132
Με Εξισορρόπηση Ιστογράμματος					
ΑΘΗΡ.ΠΛΑΚΑ	58,11± 31,93	19,89± 1,71	21,67± 1,94	22,78± 2,16	17,44± 3,11
Ιστός	113,18± 39,11	23,18± 0,85	23±0	23,182± 0,85	25,18± 3,2
TTEST	2,45E-05	1,46E-09	0,002537	0,424888	2,82E-09

ΠΙΝΑΚΑΣ 4-12**Ποσοστιαία Κατανομή 25% (F12)**

Μέσες τιμές της ποσοστιαίας κατανομής 25% για περιοχές ενδιαφέροντος που αντιστοιχούν σε αθηρωματικές πλάκες και φυσιολογικούς ιστούς αντίστοιχα. Η μεταβλητή F12 αφορά στην περιοχή ενδιαφέροντος χωρίς συνέλιξη, ενώ οι μεταβλητές F121-F124 μετά από συνέλιξη της περιοχής με τις 4 μάσκες του Laws.

	F12	F121	F122	F123	F124
Χωρίς Εξισορρόπηση Ιστογράμματος					
ΑΘΗΡ.ΠΛΑΚΑ	11,22± 7,16	117,67± 25,03	120,78± 11,68	122,5± 8,51	125,06± 1,26
Ιστός	38,14± 15,89	119,96± 11,91	120,41± 2,77	122,05± 4,64	125,86± 0,35
TTEST	7,49E-08	0,705958	0,886588	0,831014	0,006433
Με Εξισορρόπηση Ιστογράμματος					
ΑΘΗΡ.ΠΛΑΚΑ	81,83± 32,79	54,22± 2,82	60,44± 15,08	58,44± 15,89	41,22± 5,61
Ιστός	146,73± 36,84	62,18± 3,85	62,55± 2,91	60,55± 2,84	63,09± 11,9
TTEST	1,01E-06	9,48E-09	0,525586	0,545449	1,49E-08

ΠΙΝΑΚΑΣ 4-13

Ποσοστιαία Κατανομή 50% (F13)

Μέσες τιμές της ποσοστιαίας κατανομής 50% για περιοχές ενδιαφέροντος που αντιστοιχούν σε αθηρωματικές πλάκες και φυσιολογικούς ιστούς αντίστοιχα. Η μεταβλητή F13 αφορά στην περιοχή ενδιαφέροντος χωρίς συνέλιξη, ενώ οι μεταβλητές F131-F134 μετά από συνέλιξη της περιοχής με τις 4 μάσκες του Laws.

	F13	F131	F132	F133	F134
Χωρίς Εξισορρόπηση Ιστογράμματος					
ΑΘΗΡ.ΠΛΑΚΑ	22,83± 11,97	124,78± 24,49	125± 10	124,22± 9,03	126,44± 0,86
Ιστός	62,09± 18,54	125,64± 12,08	124,77± 2,94	127,73± 4,15	126,68± 0,48
TTEST	2,43E-09	0,885795	0,926247	0,112153	0,27415
Με Εξισορρόπηση Ιστογράμματος					
ΑΘΗΡ.ΠΛΑΚΑ	114,11± 35,95	125,17± 3,6	120± 2,74	126,56± 4,15	121,5± 5,24
Ιστός	186,59± 31,97	128,27± 6,69	125,45± 8,83	126,36± 3,39	123,68± 8,46
TTEST	5,44E-08	0,085058	0,016139	0,872824	0,346303

ΠΙΝΑΚΑΣ 4-14

Ποσοστιαία Κατανομή 75% (F14)

Μέσες τιμές της ποσοστιαίας κατανομής 75% για περιοχές ενδιαφέροντος που αντιστοιχούν σε αθηρωματικές πλάκες και φυσιολογικούς ιστούς αντίστοιχα. Η μεταβλητή F14 αφορά στην περιοχή ενδιαφέροντος χωρίς συνέλιξη, ενώ οι μεταβλητές F141-F144 μετά από συνέλιξη της περιοχής με τις 4 μάσκες του Laws.

	F14	F141	F142	F143	F144
Χωρίς Εξισορρόπηση Ιστογράμματος					
ΑΘΗΡ.ΠΛΑΚΑ	43,78± 17,86	130,11± 25	130,28± 10,34	125,89± 9,71	127,94± 0,73
Ιστός	91,68± 17,11	131,32± 12,06	128,95± 3,23	133,77± 4,83	127,55± 0,6
TTEST	1,7E-10	0,84243	0,572894	0,001877	0,063569
Με Εξισορρόπηση Ιστογράμματος					
ΑΘΗΡ.ΠΛΑΚΑ	156,61± 36,44	194,56± 3,91	196,33± 3,43	194,78± 5,53	208,89± 7,51
Ιστός	221,23± 21,54	192,09± 3,89	192,27± 4,56	192,64± 3,47	196,45± 8,03
TTEST	2,68E-08	0,054059	0,003425	0,14326	1,26E-05

ΠΙΝΑΚΑΣ 4-15**Ποσοστιαία Κατανομή 90% (F15)**

Μέσες τιμές της ποσοστιαίας κατανομής 90% για περιοχές ενδιαφέροντος που αντιστοιχούν σε αθηρωματικές πλάκες και φυσιολογικούς ιστούς αντίστοιχα. Η μεταβλητή F15 αφορά στην περιοχή ενδιαφέροντος χωρίς συνέλιξη, ενώ οι μεταβλητές F151-F154 μετά από συνέλιξη της περιοχής με τις 4 μάσκες του Laws.

	F15	F151	F152	F153	F154
Χωρίς Εξισορρόπηση Ιστογράμματος					
ΑΘΗΡ.ΠΛΑΚΑ	71,61± 23,93	144,06± 26,14	140,11± 10,07	128,78± 10,48	129,44± 1,15
Ιστός	118,09± 15,15	137,90± 12,29	133,41± 3,71	140,55± 6,5	128,77± 0,75
TTEST	5,7E-09	0,333128	0,006216	9,9E-05	0,032143
Με Εξισορρόπηση Ιστογράμματος					
ΑΘΗΡ.ΠΛΑΚΑ	191,61± 36,15	229,78± 2,56	230,44± 1,29	231,56± 2,79	234,44± 3,33
Ιστός	241,09± 11,58	231,82± 2,04	232,18± 2,38	231,27± 1,91	233,64± 3,89
TTEST	4,63E-07	0,007791	0,008568	0,706335	0,48999

ΠΙΝΑΚΑΣ 4-16**Πλάτος Ιστογράμματος (F16)**

Μέσες τιμές του πλάτους ιστογράμματος για περιοχές ενδιαφέροντος που αντιστοιχούν σε αθηρωματικές πλάκες και φυσιολογικούς ιστούς αντίστοιχα. Η μεταβλητή F16 αφορά στην περιοχή ενδιαφέροντος χωρίς συνέλιξη, ενώ οι μεταβλητές F161-F164 μετά από συνέλιξη της περιοχής με τις 4 μάσκες του Laws.

	F16	F161	F162	F163	F164
Χωρίς Εξισορρόπηση Ιστογράμματος					
ΑΘΗΡ.ΠΛΑΚΑ	66,56± 21,67	40,61± 12,09	29,22± 9,86	9,44± 4,59	5,72± 2,7
Ιστός	94,27± 10,1	24,27± 3,09	18,68± 3,18	25,27± 9,39	4± 1,02
TTEST	4,55E-06	3,95E-07	3,05E-05	1,06E-07	0,008664
Με Εξισορρόπηση Ιστογράμματος					
ΑΘΗΡ.ΠΛΑΚΑ	133,5± 26,47	209,89± 3,01	208,78± 2,82	208,78± 3,42	217± 4,99
Ιστός	127,91± 33,74	208,64± 2,01	209,18± 2,38	208,09± 1,82	208,45± 5,73
TTEST	0,570023	0,124271	0,626006	0,421629	1,47E-05

ΠΙΝΑΚΑΣ 4-17

Άθροισμα Απολύτων Τιμών / # Εικονοστοιχείων (BB1)

Μέσες τιμές του αθροίσματος των απολύτων τιμών / # εικονοστοιχείων για περιοχές ενδιαφέροντος που αντιστοιχούν σε αθηρωματικές πλάκες και φυσιολογικούς ιστούς αντίστοιχα. Η μεταβλητή BB1 αφορά στην περιοχή ενδιαφέροντος χωρίς συνέλιξη, ενώ οι μεταβλητές B1-B4 μετά από συνέλιξη της περιοχής με τις 4 μάσκες του Laws.

	BB1	B1	B2	B3	B4
Χωρίς Εξισορρόπηση Ιστογράμματος					
ΑΘΗΡ.ΠΛΑΚΑ	30,27± 12,99	125,12± 24,69	126,12± 10,84	124,65± 9,04	127,32± 0,81
Ιστός	66,51± 15,53	125,62± 12,21	124,39± 2,94	127,42± 4,6	124,17± 0,57
TTEST	6,67144E-10	0,930381	0,465033	0,206227±	1,21E-17
Με Εξισορρόπηση Ιστογράμματος					
ΑΘΗΡ.ΠΛΑΚΑ	121,07± 32,75	125,41± 2,91	128,66± 1,34	127,53± 0,59	129,12± 2,77
Ιστός	180,42± 26,47	126,59± 0,69	126,51± 0,58	126,67± 0,62	124,09± 0,7
TTEST	1,93155E-07	0,073138	4,61E-08	7,7E-05	5,75E-10

ΠΙΝΑΚΑΣ 4-18

Τετράγωνα Τιμών / # Εικονοστοιχείων (BS1)

Μέσες τιμές των τετραγώνων των τιμών / # εικονοστοιχείων για περιοχές ενδιαφέροντος που αντιστοιχούν σε αθηρωματικές πλάκες και φυσιολογικούς ιστούς αντίστοιχα. Η μεταβλητή BS1 αφορά στην περιοχή ενδιαφέροντος χωρίς συνέλιξη, ενώ οι μεταβλητές S1-S4 μετά από συνέλιξη της περιοχής με τις 4 μάσκες του Laws.

	BS1	S1	S2	S3	S4
Χωρίς Εξισορρόπηση Ιστογράμματος					
ΑΘΗΡ.ΠΛΑΚΑ	1766,4± 1202,9	16598,1± 6055,6	16229± 2781,1	15769,9± 2284,4	16276,4± 193,4
Ιστός	5928,2± 2308,1	16201± 3156	15790,9± 726,1	16574,9± 1102,4	15947,2± 78,5
TTEST	1,54E-08	0,785724	0,468765	0,141213	4,39E-09
Με Εξισορρόπηση Ιστογράμματος					
ΑΘΗΡ.ΠΛΑΚΑ	18189± 8699,2	21545,5± 759,2	22288,9± 421,9	21917,8± 300,3	24008,4± 689,8
Ιστός	35881,5± 8186,2	21673± 140,9	21649,3± 110,1	21691,3± 97,2	21183,3± 150,2
TTEST	8,28253E-08	0,443909	3,94E-08	0,001892	8,79E-21

ΠΙΝΑΚΑΣ 4-19

*Ελάχιστη Τιμή Φωτεινότητας μετά τη Συνέλιξη και χωρίς
Μετατροπή Ιστογράμματος*

Μέσες τιμές της ελάχιστης τιμής φωτεινότητας μετά τη συνέλιξη και χωρίς μετατροπή ιστογράμματος για περιοχές ενδιαφέροντος που αντιστοιχούν σε αθηρωματικές πλάκες και φυσιολογικούς ιστούς αντίστοιχα. Η μεταβλητή F1 αφορά στην περιοχή ενδιαφέροντος χωρίς συνέλιξη, ενώ οι μεταβλητές KF11-KF14 μετά από συνέλιξη της περιοχής με τις 4 μάσκες του Laws.

	F1	KF11	KF12	KF13	KF14
Χωρίς Εξισορρόπηση Ιστογράμματος					
ΑΘΗΡ.ΠΛΑΚΑ	0	-2337± 1022,6	-865,7± 298,2	-227,5± 76,3	-3078,8± 984,1
Ιστός	1,45± 3,63	-6824,7± 1023,4	-2469,3± 343,1	-137,7± 35,8	-5465,1± 794,5
TTEST	0,098502	2,21E-16	4,29E-18	1,75E-05	2,62E-10
Με Εξισορρόπηση Ιστογράμματος					
ΑΘΗΡ.ΠΛΑΚΑ	33,89± 31,89	-7054,1± 1920,3	-2439,1± 603,5	-642,9± 126,1	-7509,6± 943,9
Ιστός	38,82± 30,71	-12040,9± 290,7	-4043,3± 90,1	-261,7± 22,5	-8897,6± 209,5
TTEST	0,622515	1,51E-14	7,35E-15	1,55E-16	5,98E-08

ΠΙΝΑΚΑΣ 4-20

Μέγιστη Τιμή Φωτεινότητας μετά τη Συνέλιξη και χωρίς

Μετατροπή Ιστογράμματος

Μέσες τιμές της μέγιστης τιμής φωτεινότητας μετά τη συνέλιξη και χωρίς μετατροπή ιστογράμματος για περιοχές ενδιαφέροντος που αντιστοιχούν σε αθηρωματικές πλάκες και φυσιολογικούς ιστούς αντίστοιχα. Η μεταβλητή F2 αφορά στην περιοχή ενδιαφέροντος χωρίς συνέλιξη, ενώ οι μεταβλητές KF21-KF24 μετά από συνέλιξη της περιοχής με τις 4 μάσκες του Laws.

	F2	KF21	KF22	KF23	KF24
Χωρίς Εξισορρόπηση Ιστογράμματος					
ΑΘΗΡ.ΠΛΑΚΑ	136,7± 35,8	2399,1± 942,9	884,1± 316,9	240,4± 98	3075,8± 974,1
Ιστός	175± 18,4	6960,2± 1176	2559,2± 375,6	134,2± 32,5	5458,1± 790,1
TTEST	9,16E-05	7,02E-16	1,4E-17	2,97E-05	2,23E-10
Με Εξισορρόπηση Ιστογράμματος					
ΑΘΗΡ.ΠΛΑΚΑ	244,9± 15,9	6677,6± 1733,5	2515,5± 590,9	661,4± 135,3	7538± 961,5
Ιστός	254,6± 1,2	12002,2± 464,5	4149,5± 126,1	257,1± 19,6	8957,1± 220,7
TTEST	0,006857	1,99E-16	3,34E-15	1,87E-16	5,75E-08

4.1.2. Επιλογή χαρακτηριστικών για διαχωρισμό αθηρωματικών πλακών - υγιών ιστών

Εξετάζοντας τους Πίνακες (4-1)-(4-20) βλέπουμε ότι η μέθοδος παρέχει καλύτερα αποτελέσματα όταν χρησιμοποιούμε εικόνες στις οποίες δεν έχουμε κάνει εξισορρόπηση ιστογράμματος. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του TTEST, το συνολικό πλήθος χαρακτηριστικών, όπου καθένα προσφέρει τη δυνατότητα διάκρισης μεταξύ αθηρωματικών πλακών και υγιών ιστών, είναι 63 χαρακτηριστικά, όταν επεξεργαζόμαστε εικόνες στην αρχική τους λήψη. Αντίθετα αν εφαρμόσουμε εξισορρόπηση ιστογράμματος το πλήθος των χαρακτηριστικών μειώνεται σε 54. Αξίζει βέβαια να σημειωθεί ότι με την εξισορρόπηση ιστογράμματος κάποια χαρακτηριστικά βελτιώνουν τις επιδόσεις τους, π.χ η σταθερή απόκλιση φωτεινότητας (Πίνακας 4-5). Επίσης, στην περίπτωση της ελάχιστης τιμής φωτεινότητας (χωρίς εξισορρόπηση ιστογράμματος), οι μάσκες λειτούργησαν θετικά και βελτίωσαν την επίδοση του χαρακτηριστικού. Το ίδιο συνέβη και με τη σταθερή απόκλιση φωτεινότητας (Πίνακας 4-5) και την ενέργεια των επιπέδων του γκρι (Πίνακας 4-9), όταν χρησιμοποιήσαμε εξισορροπημένες εικόνες.

4.2. Σύγκριση συμπτωματικών-ασυμπτωματικών αθηρωματικών πλακών

4.2.1. Συγκριτικά αποτελέσματα TTEST σε συμπτωματικές-ασυμπτωματικές αθηρωματικές πλάκες

Στους Πίνακες 4-20 έως 4-40 παραθέτονται οι τιμές των στατιστικών παραμέτρων πρώτης τάξεως που υπολογίστηκαν από τις σχέσεις (2.1)-(2.16), (3.1) και (3.2), όπως παρουσιάζονται στα κεφάλαια 2 και 3.

Σε κάθε πίνακα αναγράφεται η παράμετρος της οποίας τη μέση τιμή εξετάζουμε, αναφορικά με τις μετρήσεις που έγιναν στις εικόνες υπερήχων του δείγματος με το οποίο εργαστήκαμε. Φαίνονται οι μέσες τιμές για τις περιοχές ενδιαφέροντος που αντιστοιχούν σε συμπτωματικές αθηρωματικές πλάκες, καθώς και για αυτές που αντιστοιχούν σε ασυμπτωματικές αθηρωματικές πλάκες. Οι

μετρήσεις πραγματοποιούνται στις περιοχές ενδιαφέροντος που προέρχονται από τις αρχικές εικόνες υπερήχων, χωρίς αυτές να έχουν υποστεί εξισορρόπηση ιστογράμματος. Η τιμή της εκάστοτε μεταβλητής για κάθε περίπτωση ασθενούς είναι η μέση τιμή που προκύπτει κατά τον υπολογισμό των ίδιων χαρακτηριστικών σε 6 υπερηχοτομογραφικές εικόνες καρωτίδας του ασθενούς, ληφθείσες κατά τη διάρκεια του καρδιακού κύκλου.

Κάθε Πίνακας έχει πέντε στήλες μετρήσεων. Η πρώτη στήλη αντιστοιχεί σε μέτρηση στην περιοχή ενδιαφέροντος πριν από τη συνέλιξη με τις μάσκες του Laws, ενώ οι επόμενες τέσσερις αντιστοιχούν στη συνέλιξη της περιοχής με τις αντίστοιχες τέσσερις πιο σημαντικές μάσκες. Παραθέτονται επιπλέον τα αποτελέσματα του TTEST μεταξύ των επιλεγμένων περιοχών ενδιαφέροντος συμπτωματικών και ασυμπτωματικών περιπτώσεων.

Τα αποτελέσματα του TTEST που είναι πιο έντονα γραμμένα δηλώνουν τις παραμέτρους εκείνες των οποίων οι τιμές διαφοροποιούνται μεταξύ συμπτωματικών και ασυμπτωματικών αθηρωματικών πλακών, αφού οι πιθανότητες είναι μικρότερες του 0,05.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4-21

Ελάχιστη Τιμή Φωτεινότητας (F1)

Μέσες τιμές της ελάχιστης τιμής φωτεινότητας για περιοχές ενδιαφέροντος που αντιστοιχούν σε συμπτωματικές και ασυμπτωματικές αθηρωματικές πλάκες αντίστοιχα. Η μεταβλητή F1 αφορά στην περιοχή ενδιαφέροντος χωρίς συνέλιξη, ενώ οι μεταβλητές F11-F14 μετά από συνέλιξη της περιοχής με τις 4 μάσκες του Laws.

	F1	F11	F12	F13	F14
ΣΥΜΠΤ.	0 ± 0	5,09 ± 12,05	7,93 ± 17,61	6,15 ± 14,40	22,04 ± 27,16
Ασυμπ.	0 ± 0	6,48 ± 13,13	12,61 ± 22,56	8,57 ± 16,05	15,43 ± 23,76
TTEST	—	0,568031	0,231669	0,410312	0,181145

ΠΙΝΑΚΑΣ 4-22**Μέγιστη Τιμή Φωτεινότητας (F2)**

Μέσες τιμές της μέγιστης τιμής φωτεινότητας για περιοχές ενδιαφέροντος που αντιστοιχούν σε συμπτωματικές και ασυμπτωματικές αθηρωματικές πλάκες αντίστοιχα. Η μεταβλητή F2 αφορά στην περιοχή ενδιαφέροντος χωρίς συνέλιξη, ενώ οι μεταβλητές F21-F24 μετά από συνέλιξη της περιοχής με τις 4 μάσκες του Laws.

	F2	F21	F22	F23	F24
ΣΥΜΠΤ.	137,41 ± 35,65	246,69 ± 17,06	237,37 ± 22,18	245,67 ± 15,63	230,61 ± 28,31
Ασυμπ.	128,04 ± 25,68	242,85 ± 30,13	238,35 ± 24,17	244,15 ± 18,64	237,17 ± 23,59
TTEST	0,120065	0,417724	0,826373	0,647437	0,193941

ΠΙΝΑΚΑΣ 4-23**Ενδιάμεση Τιμή Φωτεινότητας (F3)**

Μέσες τιμές της ενδιάμεσης τιμής φωτεινότητας για περιοχές ενδιαφέροντος που αντιστοιχούν σε συμπτωματικές και ασυμπτωματικές αθηρωματικές πλάκες αντίστοιχα. Η μεταβλητή F3 αφορά στην περιοχή ενδιαφέροντος χωρίς συνέλιξη, ενώ οι μεταβλητές F31-F34 μετά από συνέλιξη της περιοχής με τις 4 μάσκες του Laws.

	F3	F31	F32	F33	F34
ΣΥΜΠΤ.	21,17 ± 7,94	122,65 ± 16,38	134,44 ± 17,33	126,3 ± 9,68	126,26 ± 1,01
Ασυμπ.	20,09 ± 15,36	128,09 ± 20,28	136,56 ± 14,5	127,33 ± 9,9	126,5 ± 1,36
TTEST	0,648885	0,127816	0,493957	0,583297	0,298365

ΠΙΝΑΚΑΣ 4-24

Μέση Τιμή Φωτεινότητας (F4)

Μέσες τιμές της μέσης τιμής φωτεινότητας για περιοχές ενδιαφέροντος που αντιστοιχούν σε συμπτωματικές και ασυμπτωματικές αθηρωματικές πλάκες αντίστοιχα. Η μεταβλητή F4 αφορά στην περιοχή ενδιαφέροντος χωρίς συνέλιξη, ενώ οι μεταβλητές F41-F44 μετά από συνέλιξη της περιοχής με τις 4 μάσκες του Laws.

	F4	F41	F42	F43	F44
ΣΥΜΠΤ.	28,99 ± 10,13	124,35 ± 16,45	136,48 ± 17,31	127,96 ± 9,75	128,11 ± 1,01
Ασυμπ.	26,32 ± 14,89	130 ± 20,29	138,58 ± 14,47	128,5 ± 12,15	128,34 ± 1,41
TTEST	0,278878	0,11522	0,496843	0,801056	0,32091

ΠΙΝΑΚΑΣ 4-25

Σταθερή Απόκλιση Φωτεινότητας (F5)

Μέσες τιμές της σταθερής απόκλισης της φωτεινότητας για περιοχές ενδιαφέροντος που αντιστοιχούν σε συμπτωματικές και ασυμπτωματικές αθηρωματικές πλάκες αντίστοιχα. Η μεταβλητή F5 αφορά στην περιοχή ενδιαφέροντος χωρίς συνέλιξη, ενώ οι μεταβλητές F51-F54 μετά από συνέλιξη της περιοχής με τις 4 μάσκες του Laws.

	F5	F51	F52	F53	F54
ΣΥΜΠΤ.	25,47 ± 7,94	20,20 ± 3,66	15,43 ± 2,90	10,63 ± 4,66	6,20 ± 2,67
Ασυμπ.	22,37 ± 6,28	18,21 ± 4,65	13,54 ± 3,71	9,17 ± 7,88	6,86 ± 3,65
TTEST	0,026327	0,015234	0,00405	0,246406	0,287975

ΠΙΝΑΚΑΣ 4-26**Συντελεστής Συσχέτισης (F6)**

Μέσες τιμές του συντελεστή συσχέτισης για περιοχές ενδιαφέροντος που αντιστοιχούν σε συμπτωματικές και ασυμπτωματικές αθηρωματικές πλάκες αντίστοιχα. Η μεταβλητή F6 αφορά στην περιοχή ενδιαφέροντος χωρίς συνέλιξη, ενώ οι μεταβλητές F61-F64 μετά από συνέλιξη της περιοχής με τις 4 μάσκες του Laws.

	F6	F61	F62	F63	F64
ΣΥΜΠΤ.	0,899 ± 0,162	0,165 ± 0,03	0,115 ± 0,03	0,084 ± 0,04	0,048 ± 0,02
Ασυμπτ.	0,98 ± 0,28	0,14 ± 0,031	0,098 ± 0,028	0,077 ± 0,105	0,054 ± 0,029
TTEST	0,06197	0,000151	0,002576	0,658723	0,291343

ΠΙΝΑΚΑΣ 4-27**Λοξότητα των Επιπέδων του Γκρι / Φωτεινότητας (F7)**

Μέσες τιμές της λοξότητας των επιπέδων του γκρι / φωτεινότητων για περιοχές ενδιαφέροντος που αντιστοιχούν σε συμπτωματικές και ασυμπτωματικές αθηρωματικές πλάκες αντίστοιχα. Η μεταβλητή F7 αφορά στην περιοχή ενδιαφέροντος χωρίς συνέλιξη, ενώ οι μεταβλητές F71-F74 μετά από συνέλιξη της περιοχής με τις 4 μάσκες του Laws.

	F7	F71	F72	F73	F74
ΣΥΜΠΤ.	1,45 ± 0,61	-0,006 ± 0,33	-0,7 ± 0,41	-1,01 ± 1,68	-0,63 ± 2
Ασυμπτ.	1,54 ± 0,72	-0,1 ± 0,46	-0,83 ± 1,32	-0,48 ± 1,57	-0,86 ± 2,2
TTEST	0,453683	0,232984	0,486125	0,094705	0,579646

ΠΙΝΑΚΑΣ 4-28

Κύρτωση των Επιπέδων του Γκρι / Φωτεινότητων (F8)

Μέσες τιμές της κύρτωσης των επιπέδων του γκρι / φωτεινότητων για περιοχές ενδιαφέροντος που αντιστοιχούν σε συμπτωματικές και ασυμπτωματικές αθηρωματικές πλάκες αντίστοιχα. Η μεταβλητή F8 αφορά στην περιοχή ενδιαφέροντος χωρίς συνέλιξη, ενώ οι μεταβλητές F81-F84 μετά από συνέλιξη της περιοχής με τις 4 μάσκες του Laws.

	F8	F81	F82	F83	F84
ΣΥΜΠΤ.	2,80 ± 4,48	5,21 ± 2,88	7,51 ± 3,29	52,49 ± 23,96	118,71 ± 100,66
Ασυμπ.	3,11 ± 3,15	6,09 ± 3,15	14,3 ± 30,2	67,7 ± 39,23	120,95 ± 82,04
TTEST	0,68467	0,132769	0,10333	0,016671	0,899241

ΠΙΝΑΚΑΣ 4-29

Ενέργεια των Επιπέδων του Γκρι / Φωτεινότητων (F9)

Μέσες τιμές της ενέργειας των επιπέδων του γκρι / φωτεινότητων για περιοχές ενδιαφέροντος που αντιστοιχούν σε συμπτωματικές και ασυμπτωματικές αθηρωματικές πλάκες αντίστοιχα. Η μεταβλητή F9 αφορά στην περιοχή ενδιαφέροντος χωρίς συνέλιξη, ενώ οι μεταβλητές F91-F94 μετά από συνέλιξη της περιοχής με τις 4 μάσκες του Laws.

	F9	F91	F92	F93	F94
ΣΥΜΠΤ.	0,02 ± 0,01	0,09 ± 0,03	0,09 ± 0,03	0,16 ± 0,05	0,13 ± 0,04
Ασυμπ.	0,05 ± 0,05	0,12 ± 0,06	0,12 ± 0,05	0,19 ± 0,05	0,14 ± 0,04
TTEST	0,000622	0,005046	0,002814	0,0033	0,277222

ΠΙΝΑΚΑΣ 4-30

Εντροπία των Επιπέδων του Γκρι / Φωτεινότητων (F10)

Μέσες τιμές της εντροπίας των επιπέδων του γκρι / φωτεινότητων για περιοχές ενδιαφέροντος που αντιστοιχούν σε συμπτωματικές και ασυμπτωματικές αθηρωματικές πλάκες αντίστοιχα. Η μεταβλητή F10 αφορά στην περιοχή ενδιαφέροντος χωρίς συνέλιξη, ενώ οι μεταβλητές F101-F104 μετά από συνέλιξη της περιοχής με τις 4 μάσκες του Laws.

	F10	F101	F102	F103	F104
ΣΥΜΠΤ.	4,22 ± 0,35	3,79 ± 0,24	3,58 ± 0,26	2,67 ± 0,33	2,36 ± 0,33
Ασυμπ.	3,96 ± 0,59	3,58 ± 0,4	3,34 ± 0,36	2,45 ± 0,31	2,34 ± 0,44
TTEST	0,007078	0,00129	0,000147	0,000799	0,813373

ΠΙΝΑΚΑΣ 4-31

Ποσοστιαία Κατανομή 10% (F11)

Μέσες τιμές της ποσοστιαίας κατανομής 10% για περιοχές ενδιαφέροντος που αντιστοιχούν σε συμπτωματικές και ασυμπτωματικές αθηρωματικές πλάκες αντίστοιχα. Η μεταβλητή F11 αφορά στην περιοχή ενδιαφέροντος χωρίς συνέλιξη, ενώ οι μεταβλητές F111-F114 μετά από συνέλιξη της περιοχής με τις 4 μάσκες του Laws.

	F11	F111	F112	F113	F114
ΣΥΜΠΤ.	5,09 ± 12,05	99,96 ± 17,09	118,74 ± 18,06	121,24 ± 10,46	123,17 ± 1,62
Ασυμπ.	6,48 ± 13,13	108,67 ± 17,53	123,35 ± 14,83	120,35 ± 19,25	122,87 ± 3,92
TTEST	0,568031	0,010293	0,150022	0,766116	0,608803

ΠΙΝΑΚΑΣ 4-32

Ποσοστιαία Κατανομή 25% (F12)

Μέσες τιμές της ποσοστιαίας κατανομής 25% για περιοχές ενδιαφέροντος που αντιστοιχούν σε συμπτωματικές και ασυμπτωματικές αθηρωματικές πλάκες αντίστοιχα. Η μεταβλητή F12 αφορά στην περιοχή ενδιαφέροντος χωρίς συνέλιξη, ενώ οι μεταβλητές F121-F124 μετά από συνέλιξη της περιοχής με τις 4 μάσκες του Laws.

	F12	F121	F122	F123	F124
ΣΥΜΠΤ.	7,93 ± 17,61	115,59 ± 16,62	130,07 ± 17,42	124,72 ± 9,82	124,74 ± 1,23
Ασυμπτ.	12,61 ± 22,56	122,78 ± 19,21	133,11 ± 14,68	123,76 ± 19,75	124,81 ± 2,22
TTEST	0,231669	0,040092	0,329428	0,748996	0,830376

ΠΙΝΑΚΑΣ 4-33

Ποσοστιαία Κατανομή 50% (F13)

Μέσες τιμές της ποσοστιαίας κατανομής 50% για περιοχές ενδιαφέροντος που αντιστοιχούν σε συμπτωματικές και ασυμπτωματικές αθηρωματικές πλάκες αντίστοιχα. Η μεταβλητή F13 αφορά στην περιοχή ενδιαφέροντος χωρίς συνέλιξη, ενώ οι μεταβλητές F131-F134 μετά από συνέλιξη της περιοχής με τις 4 μάσκες του Laws.

	F13	F131	F132	F133	F134
ΣΥΜΠΤ.	21,17 ± 7,94	122,65 ± 16,38	134,44 ± 17,33	126,3 ± 9,68	126,26 ± 1,01
Ασυμπτ.	20,09 ± 15,36	128,09 ± 20,28	136,56 ± 14,5	127,33 ± 9,9	126,5 ± 1,36
TTEST	0,648885	0,127816	0,493957	0,583297	0,298365

ΠΙΝΑΚΑΣ 4-34

Ποσοστιαία Κατανομή 75% (F14)

Μέσες τιμές της ποσοστιαίας κατανομής 75% για περιοχές ενδιαφέροντος που αντιστοιχούν σε συμπτωματικές και ασυμπτωματικές αθηρωματικές πλάκες αντίστοιχα. Η μεταβλητή F14 αφορά στην περιοχή ενδιαφέροντος χωρίς συνέλιξη, ενώ οι μεταβλητές F141-F144 μετά από συνέλιξη της περιοχής με τις 4 μάσκες του Laws.

	F14	F141	F142	F143	F144
ΣΥΜΠΤ.	22,04 ± 27,163	128,83 ± 16,88	140,37 ± 17,33	127,81 ± 9,67	127,69 ± 1,13
Ασυμπτ.	15,46 ± 23,76	133,17 ± 22,03	140,7 ± 14,13	128,87 ± 9,9	128,19 ± 1,59
TTEST	0,181145	0,253857	0,912968	0,576469	0,062443

ΠΙΝΑΚΑΣ 4-35

Ποσοστιαία Κατανομή 90% (F15)

Μέσες τιμές της ποσοστιαίας κατανομής 90% για περιοχές ενδιαφέροντος που αντιστοιχούν σε συμπτωματικές και ασυμπτωματικές αθηρωματικές πλάκες αντίστοιχα. Η μεταβλητή F15 αφορά στην περιοχή ενδιαφέροντος χωρίς συνέλιξη, ενώ οι μεταβλητές F151-F154 μετά από συνέλιξη της περιοχής με τις 4 μάσκες του Laws.

	F15	F151	F152	F153	F154
ΣΥΜΠΤ.	74,63 ± 23,67	144,31 ± 17,63	150,93 ± 17,54	131,28 ± 9,54	129,26 ± 1,52
Ασυμπτ.	69,04 ± 19,78	147,28 ± 24,56	150,67 ± 15,64	132,37 ± 10,85	130,06 ± 3,06
TTEST	0,185628	0,472719	0,935541	0,579477	0,089317

ΠΙΝΑΚΑΣ 4-36

Πλάτος Ιστογράμματος (F16)

Μέσες τιμές του πλάτους ιστογράμματος για περιοχές ενδιαφέροντος που αντιστοιχούν σε συμπτωματικές και ασυμπτωματικές αθηρωματικές πλάκες αντίστοιχα. Η μεταβλητή F16 αφορά στην περιοχή ενδιαφέροντος χωρίς συνέλιξη, ενώ οι μεταβλητές F161-F164 μετά από συνέλιξη της περιοχής με τις 4 μάσκες του Laws.

	F16	F161	F162	F163	F164
ΣΥΜΠΤ.	71,67 ± 22,99	44,35 ± 10,13	32,19 ± 7,20	10,04 ± 4,35	6,09 ± 2,38
Ασυμπτ.	65,74 ± 16,79	38,61 ± 12,15	27,31 ± 8,5	12,02 ± 17,62	7,19 ± 6,5
TTEST	0,129078	0,00886	0,001743	0,424276	0,248622

ΠΙΝΑΚΑΣ 4-37

Αθροισμα Απολύτων Τιμών / # Εικονοστοιχείων (BB1)

Μέσες τιμές του αθροίσματος των απολύτων τιμών / # εικονοστοιχείων για περιοχές ενδιαφέροντος που αντιστοιχούν σε συμπτωματικές και ασυμπτωματικές αθηρωματικές πλάκες αντίστοιχα. Η μεταβλητή BB1 αφορά στην περιοχή ενδιαφέροντος χωρίς συνέλιξη, ενώ οι μεταβλητές B1-B4 μετά από συνέλιξη της περιοχής με τις 4 μάσκες του Laws.

	BB1	B1	B2	B3	B4
ΣΥΜΠΤ.	27,99 ± 10,13	123,35 ± 16,45	135,48 ± 17,31	126,96 ± 9,75	127,11 ± 1,01
Ασυμπτ.	25,32 ± 14,89	129 ± 20,29	137,58 ± 14,47	127,5 ± 12,15	127,34 ± 1,41
TTEST	0,278878	0,11522	0,496843	0,801056	0,32091

ΠΙΝΑΚΑΣ 4-38**Τετράγωνα Τιμών / # Εικονοστοιχείων (BS1)**

Μέσες τιμές των τετραγώνων των τιμών / # εικονοστοιχείων για περιοχές ενδιαφέροντος που αντιστοιχούν σε συμπτωματικές και ασυμπτωματικές αθηρωματικές πλάκες αντίστοιχα. Η μεταβλητή BS1 αφορά στην περιοχή ενδιαφέροντος χωρίς συνέλιξη, ενώ οι μεταβλητές S1-S4 μετά από συνέλιξη της περιοχής με τις 4 μάσκες του Laws.

	BS1	S1	S2	S3	S4
ΣΥΜΠΤ.	1594,85 ± 1029,92	15901,7 ± 3989,8	18895,4 ± 4849,9	16345,2 ± 2519	16201,6 ± 250,1
Ασυμπ.	1397,95 ± 1265,5	17396,1 ± 5045,8	19329,2 ± 4114,4	16544 ± 2689,1	16277,2 ± 326,6
TTEST	0,377224	0,090719	0,617281	0,692542	0,179878

ΠΙΝΑΚΑΣ 4-39

**Ελάχιστη Τιμή Φωτεινότητας μετά τη Συνέλιξη και χωρίς
Μετατροπή Ιστογράμματος**

Μέσες τιμές της ελάχιστης τιμής φωτεινότητας μετά τη συνέλιξη και χωρίς μετατροπή ιστογράμματος για περιοχές ενδιαφέροντος που αντιστοιχούν σε συμπτωματικές και ασυμπτωματικές αθηρωματικές πλάκες αντίστοιχα. Η μεταβλητή F1 αφορά στην περιοχή ενδιαφέροντος χωρίς συνέλιξη, ενώ οι μεταβλητές KF11-KF14 μετά από συνέλιξη της περιοχής με τις 4 μάσκες του Laws.

	F1	KF11	KF12	KF13	KF14
ΣΥΜΠΤ.	0 ± 0	-2366,2 ± 684,7	-980,1 ± 312	-244,9 ± 82,2	-3161,2 ± 1087,2
Ασυμπ.	0 ± 0	-2418,9 ± 685,6	-971,9 ± 316	-205,2 ± 84,7	-2783,6 ± 1085,3
TTEST	-	0,690181	0,893416	0,015161	0,073705

ΠΙΝΑΚΑΣ 4-40**Μέγιστη Τιμή Φωτεινότητας μετά τη Συνέλιξη και χωρίς
Μετατροπή Ιστογράμματος**

Μέσες τιμές της μέγιστης τιμής φωτεινότητας μετά τη συνέλιξη και χωρίς μετατροπή ιστογράμματος για περιοχές ενδιαφέροντος που αντιστοιχούν σε συμπτωματικές και ασυμπτωματικές αθηρωματικές πλάκες και φυσιολογικούς ιστούς αντίστοιχα. Η μεταβλητή F2 αφορά στην περιοχή ενδιαφέροντος χωρίς συνέλιξη, ενώ οι μεταβλητές KF21-KF24 μετά από συνέλιξη της περιοχής με τις 4 μάσκες του Laws.

	F2	KF21	KF22	KF23	KF24
ΣΥΜΠΤ.	137,41 ± 35,65	2511,5 ± 707,05	857,9 ± 266,4	245,5 ± 82,67	3172,6 ± 1078,67
Ασυμπ.	128,04 ± 25,68	2421,5 ± 952,4	863,3 ± 382,2	202,1 ± 79,8	2781,7 ± 1085
TTEST	0,120065	0,578327	0,932184	0,006449	0,063219

4.2.2. Αποτελέσματα συντελεστή συσχέτισης

Στον Πίνακα 4-41 φαίνονται τα αποτελέσματα του συντελεστή συσχέτισης (Σ.Σ), όπως αυτός ορίζεται από τη σχέση του Pearson (2.46). Χρησιμοποιούμε το συντελεστή συσχέτισης προκειμένου να δούμε πόσο σχετίζονται οι πληθυσμοί των συμπτωματικών και των ασυμπτωματικών ασθενών. Τα χαρακτηριστικά που βρίσκονται μέσα σε γκρι φόντο είναι αυτά που διαχωρίζουν, με βάση το Σ.Σ και το κατώφλι που θέτουμε, καλύτερα τις δύο κατηγορίες ασθενών. Το εύρος των τιμών του Σ.Σ είναι από -1 έως +1, για αυτό και χρησιμοποιούμε τις απόλυτες τιμές του συντελεστή. Το κατώφλι τοποθετείται στην τιμή 0,19.

Πίνακας 4-41

Αποτελέσματα του συντελεστή συσχέτισης για συμπτωματικούς και ασυμπτωματικούς ασθενείς

Στην πρώτη στήλη αναγράφεται το όνομα της μεταβλητής-χαρακτηριστικού, σύμφωνα με τους συμβολισμούς των Πινάκων 4-1 έως 4-20 και 4-21 έως 4-40. Στη δεύτερη στήλη αναγράφεται η τιμή του συντελεστή συσχέτισης. Με γκρι φόντο επισημαίνονται τα χαρακτηριστικά των οποίων η τιμή του Σ.Σ. είναι μεγαλύτερη του κατωφλίου.

Χαρακτηριστικό	Συντ. Συσχέτισης
DMX	0,4678
F102	0,3574
F61	0,3567
F9	0,3241
F103	0,3179
F101	0,3058
F162	0,2979
F62	0,2872
F92	0,2848
F93	0,2803
F52	0,2744
F91	0,268
KF23	0,2606
F10	0,2578
F161	0,2507
F111	0,246
KF13	0,2332
F51	0,233
F83	0,2299
F5	0,2138
F121	0,1979
F6	0,1802
F144	0,1799
KF24	0,1794
KF14	0,1728
F154	0,1643

Χαρακτηριστικό	Συντ. Συσχέτισης
S1	0,1636
F73	0,1616
F82	0,1576
B1	0,1525
F41	0,1525
F2	0,1505
F31	0,1474
F131	0,1474
F16	0,147
F81	0,1456
F112	0,1395
S4	0,13
F14	0,1296
F14	0,1296
F15	0,1283
F24	0,126
F12	0,1161
F12	0,1161
F71	0,1157
F53	0,1125
F164	0,112
F141	0,1107
F94	0,1055
BB1	0,1051
F4	0,1051
F54	0,1032

Χαρακτηριστικό	Συντ. Συσχέτισης
F64	0,1025
F34	0,101
F134	0,101
B4	0,0964
F44	0,0964
F122	0,0947
BS1	0,0858
F13	0,08
F21	0,0788
F163	0,0777
F7	0,0729
F151	0,0698
F72	0,0677
F32	0,0665
F132	0,0665
B2	0,0661
F42	0,0661
F11	0,0555
F11	0,0555
F143	0,0543
KF21	0,0541
F74	0,0539
F153	0,0539
F33	0,0534
F133	0,0534
F114	0,0498
S2	0,0486
F23	0,0445
F3	0,0443
F13	0,0443
F63	0,043
F8	0,0395
KF11	0,0388
S3	0,0385

Χαρακτηριστικό	Συντ. Συσχέτισης
F123	0,0311
F113	0,029
B3	0,0245
F43	0,0245
F104	0,023
F22	0,0214
F124	0,0209
KF12	0,013
F84	0,0123
F142	0,0106
KF22	0,0083
F152	0,0079

4.2.3. Αποτελέσματα ANOVA

Στον Πίνακα 4-42 φαίνονται τα αποτελέσματα της στατιστικής μεθόδου ANOVA. Χρησιμοποιούμε την ANOVA προκειμένου να ελεγχθεί κατά πόσο σχετίζονται οι πληθυσμοί των συμπτωματικών και των ασυμπτωματικών ασθενών. Τα χαρακτηριστικά που βρίσκονται μέσα σε γκρι φόντο είναι αυτά που είναι σε θέση να διαχωρίσουν, βάσει του ANOVA και της μέγιστης αποδεκτής πιθανότητας, καλύτερα τις δύο κατηγορίες ασθενών. Στην περίπτωση μας, όπως ακριβώς και με το TTEST, επιλέγουμε ως μέγιστη πιθανότητα διαφοροποίησης των πληθυσμών των συμπτωματικών και των ασυμπτωματικών περιπτώσεων το 0,05.

Πίνακας 4-42

Αποτελέσματα της στατιστικής μεθόδου ANOVA για συμπτωματικούς και ασυμπτωματικούς ασθενείς

Στην πρώτη στήλη αναγράφεται το όνομα της μεταβλητής-χαρακτηριστικού, σύμφωνα με τους συμβολισμούς των Πινάκων 4-1 έως 4-20 και 4-21 έως 4-40. Στη δεύτερη στήλη αναγράφεται η τιμή του συντελεστή F (2.49), ενώ στην τρίτη στήλη η πιθανότητα να απορριφθεί η συγκεκριμένη μεταβλητή, ως μη συμβάλλουσα στο διαχωρισμό. Με γκρι φόντο επισημαίνονται τα χαρακτηριστικά των οποίων η πιθανότητα είναι μικρότερη του 0,05.

Χαρακτηριστικό	F	P
DMX	29,68969	3,32E-07
F102	15,51838	0,000147
F61	15,45125	0,000151
F9	12,44573	0,000621
F103	11,91923	0,000799
F101	10,93178	0,001291
F162	10,3208	0,001742
F62	9,524422	0,002587
F92	9,35193	0,00282
F93	9,039997	0,003298
F52	8,633806	0,00405
F91	8,19823	0,005055

Χαρακτηριστικό	F	P
KF23	7,723537	0,006449
F10	7,544082	0,007076
F161	7,111462	0,00886
F111	6,825215	0,010293
KF13	6,094107	0,015161
F51	6,085083	0,015235
F83	5,916918	0,016671
F5	5,075425	0,026327
F121	4,319551	0,040092
F6	3,559199	0,061953
F144	3,545655	0,062443
KF24	3,524455	0,063219

Χαρακτηριστικό	F	P
KF14	3,262803	0,073705
F154	2,940292	0,089317
S1	2,914416	0,090719
F73	2,843266	0,094699
F82	2,699707	0,10333
B1	2,52237	0,11522
F41	2,52237	0,11522
F2	2,455896	0,120065
F31	2,355565	0,127816
F131	2,355565	0,127816
F16	2,339887	0,129078
F81	2,294942	0,132772
F112	2,102384	0,150022
S4	1,822614	0,179878
F14	1,811959	0,181145
F14	1,811959	0,181145
F15	1,774947	0,185628
F24	1,70902	0,193941
F12	1,447131	0,231669
F12	1,447131	0,231669
F71	1,439096	0,23296
F53	1,358524	0,246409
F164	1,34579	0,248622
F141	1,316206	0,253857

Χαρακτηριστικό	F	P
F94	1,189898	0,277824
BB1	1,184657	0,278878
F4	1,184657	0,278878
F54	1,14045	0,287983
F64	1,121473	0,292009
F34	1,092184	0,298365
F134	1,092184	0,298365
B4	0,994468	0,320924
F44	0,994468	0,320924
F122	0,959958	0,329428
BS1	0,786317	0,377224
F13	0,683294	0,410312
F21	0,66187	0,417724
F163	0,643403	0,424276
F7	0,565596	0,453681
F151	0,519319	0,472719
F72	0,488493	0,486131
B2	0,464874	0,496842

4.2.4. Επιλογή χαρακτηριστικών διάκρισης συμπτωματικών– ασυμπτωματικών αθηρωματικών πλακών

Κατά τη μελέτη των δύο περιπτώσεων αθηρωματικών πλακών, εργαστήκαμε σε μη εξισορροπημένες εικόνες. Αυτό το επιλέξαμε διότι η εξισορρόπηση ιστογράμματος, στην περίπτωση της σύγκρισης της αθηρωματικής πλάκας με τον υγιή ιστό μείωσε τον αριθμό των χαρακτηριστικών που μας δίνουν διακριτά αποτελέσματα.

Για την επιλογή των χαρακτηριστικών χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα του TTEST, του συντελεστή συσχέτισης και του ANOVA (Πίνακες 4-21 – 4-42). Από τους πίνακες βλέπουμε ότι και οι τρεις μέθοδοι συγκλίνουν στα ίδια ακριβώς 20 βέλτιστα χαρακτηριστικά.

- **Εικόνες προ επεξεργασίας με μάσκες Laws**
 - Βέλτιστα χαρακτηριστικά διάκρισης:
F5, F9, F10

- **Εικόνες μετά από επεξεργασία με μάσκες Laws**
 - 1. Πρώτη μάσκα**
 - Βέλτιστα χαρακτηριστικά διάκρισης:
F51, F61, F91, F101, F111, F121, F161
(7 χαρακτηριστικά)
 - 2. Δεύτερη μάσκα**
 - Βέλτιστα χαρακτηριστικά διάκρισης:
F52, F62, F92, F102, F162
(5 χαρακτηριστικά)
 - 3. Τρίτη μάσκα**
 - Βέλτιστα χαρακτηριστικά διάκρισης:
F83, F93, F103, KF13, KF23
 - 4. Τέταρτη μάσκα**
 - Βέλτιστα χαρακτηριστικά διάκρισης: -
(Κανένα χαρακτηριστικό)

Βλέπουμε ότι κυριαρχούν τα χαρακτηριστικά της σταθερής απόκλισης (F5), το οποίο παρουσιάζεται σε δύο ακόμα μάσκες, και αυτά της ενέργειας (F9) και της εντροπίας (F10), τα οποία παρουσιάζονται σε τρεις μάσκες. Επίσης, η πρώτη μάσκα έχει την καλύτερη επίδοση, όπως συμβαίνει και στη βιβλιογραφία. Αντίστοιχα η τέταρτη, η οποία έχει τη χαμηλότερη ικανότητα διαχωρισμού από τις τέσσερις, δεν μας δίνει κανένα χαρακτηριστικό.

Κεφάλαιο 5

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο Κεφάλαιο αυτό διατυπώνονται τα τελικά συμπεράσματα για τη δυνατότητα διάκρισης μεταξύ των αθηρωματικών πλακών και των υγιών ιστών, καθώς και τη δυνατότητα διάκρισης μεταξύ συμπτωματικών και ασυμπτωματικών αθηρωματικών πλακών, με βάση χαρακτηριστικά υφής και σχολιάζεται η καταλληλότητά τους.

5.2. Δυνατότητες ταξινόμησης με βάση χαρακτηριστικά υφής

Στην παρούσα διπλωματική αναπτύχθηκε μέθοδος ανάλυσης της υφής αθηρωματικής πλάκας καρωτίδας από εικόνες υπερήχων β-σάρωσης. Η μέθοδος στηρίχθηκε στην επεξεργασία των υπερηχοτομογραφικών εικόνων καρωτίδας με τις μάσκες της μεθόδου ανάλυσης ενέργειας υφής του Laws και στον υπολογισμό των στατιστικών παραμέτρων υφής 1^{ης} τάξης των επεξεργασμένων εικόνων. Τελικός στόχος ήταν ο προσδιορισμός των χαρακτηριστικών με τις καλύτερες επιδόσεις, όσον αφορά τη διάκριση μεταξύ αθηρωματικής πλάκας και υγιούς ιστού και τη διάκριση μεταξύ συμπτωματικών και ασυμπτωματικών αθηρωματικών πλακών. Η επιλογή των χαρακτηριστικών με τις καλύτερες επιδόσεις στηρίχθηκε σε τρεις μεθόδους επιλογής χαρακτηριστικών ανοιχτής επανάληψης, το TTEST, το συντελεστή συσχέτισης και τη μέθοδο ANOVA.

Ο υπολογισμός των στατιστικών παραμέτρων 1^{ης} τάξης αφορούσε τα εξής χαρακτηριστικά:

- Ελάχιστη τιμή φωτεινότητας
- Μέγιστη τιμή φωτεινότητας
- Ενδιάμεση τιμή φωτεινότητας
- Μέση τιμή φωτεινότητας
- Σταθερή απόκλιση φωτεινότητας
- Συντελεστή συσχέτισης

- Λοξότητα των επιπέδων του γκρι / φωτεινότητων
- Κύρτωση των επιπέδων του γκρι / φωτεινότητων
- Ενέργεια των επιπέδων του γκρι / φωτεινότητων
- Εντροπία των επιπέδων του γκρι / φωτεινότητων
- Ποσοστιαίες κατανομές 10%, 25%, 50%, 75%, 90%,
- Πλάτος ιστογράμματος

Τα χαρακτηριστικά αυτά ορίζονται από τους τύπους (2.1)-(2.16), (3.1), (3.2). Υπολογίστηκαν τόσο στις αρχικές εικόνες, όσο και στις επεξεργασμένες με τις μάσκες του Laws. Επίσης, κατά τη σύγκριση αθηρωματικής πλάκας με υγιή ιστό, υπολογίστηκαν επιπλέον σε εικόνες που είχαν υποστεί εξισορρόπηση ιστογράμματος

❖ Σύγκριση αθηρωματικών πλακών και υγιών ιστών

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του TTEST, το συνολικό πλήθος χαρακτηριστικών, όπου καθένα προσφέρει τη δυνατότητα διάκρισης μεταξύ αθηρωματικών πλακών και υγιών ιστών, είναι 63 χαρακτηριστικά, όταν επεξεργαστούμε εικόνες στην αρχική τους λήψη. Αντίθετα αν εφαρμόσουμε εξισορρόπηση ιστογράμματος το πλήθος των χαρακτηριστικών μειώνεται σε 54.

❖ Σύγκριση συμπτωματικών – ασυμπτωματικών αθηρωματικών πλακών

Για την επιλογή των χαρακτηριστικών χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα του TTEST, του συντελεστή συσχέτισης και του ANOVA. Οι τρεις μέθοδοι συγκλίνουν στα ίδια ακριβώς 20 βέλτιστα χαρακτηριστικά (Πίνακες 5-1 –5-3).

• Εικόνες προ επεξεργασίας με μάσκες Laws

- Βέλτιστα χαρακτηριστικά διάκρισης:
F5, Σταθερή απόκλιση φωτεινότητας (*)
F9, Ενέργεια επιπέδων φωτεινότητας (*)
F10, Εντροπία επιπέδων φωτεινότητας (*)

• Εικόνες μετά από επεξεργασία με μάσκες Laws

1. Πρώτη μάσκα

- Βέλτιστα χαρακτηριστικά διάκρισης:
F51, Σταθερή απόκλιση φωτεινότητας (*)
F61, Συντελεστής συσχέτισης (*)
F91, Ενέργεια επιπέδων φωτεινότητας (*)
F101, Εντροπία επιπέδων φωτεινότητας

F111, Ποσοστιαία κατανομή 10%

F121, Ποσοστιαία κατανομή 25%

F161, Πλάτος ιστογράμματος (*)

(7 χαρακτηριστικά)

2. Δεύτερη μάσκα

➤ Βέλτιστα χαρακτηριστικά διάκρισης:

F52, Σταθερή απόκλιση φωτεινότητας

F62, Συντελεστής συσχέτισης

F92, Ενέργεια επιπέδων φωτεινότητας (*)

F102, Εντροπία επιπέδων φωτεινότητας

F162, Πλάτος ιστογράμματος (*)

(5 χαρακτηριστικά)

3. Τρίτη μάσκα

➤ Βέλτιστα χαρακτηριστικά διάκρισης:

F83, Κύρτωση επιπέδων φωτεινότητας (*)

F93, Ενέργεια επιπέδων φωτεινότητας (*)

F103, Εντροπία επιπέδων φωτεινότητας (*)

KF13, Ελάχιστη τιμή χωρίς μετατροπή ιστογράμματος (*)

KF23, Μέγιστη τιμή χωρίς μετατροπή ιστογράμματος (*)

4. Τέταρτη μάσκα

➤ Βέλτιστα χαρακτηριστικά διάκρισης: -

(Κανένα χαρακτηριστικό)

Τα χαρακτηριστικά της σταθερής απόκλισης (F5), της ενέργειας (F9) και της εντροπίας (F10) αποδεικνύονται τα πιο κατάλληλα για τη διάκριση των συμπτωματικών – ασυμπτωματικών πλακών. Επίσης, η πρώτη μάσκα έχει την καλύτερη επίδοση, όπως συμβαίνει και στη βιβλιογραφία. Αντίστοιχα η τέταρτη, η οποία έχει τη χαμηλότερη ικανότητα διαχωρισμού από τις τέσσερις, δεν μας δίνει κανένα χαρακτηριστικό. Το γεγονός αυτό είναι σύμφωνο και με την οπτική αίσθηση των εικόνων της τέταρτης μάσκας, στις οποίες δεν βλέπουμε ίχνη ανάγλυφης υφής ευκόλως αντιληπτής. Με (*) σημειώνονται τα χαρακτηριστικά που έχουν καλή επίδοση και κατά το διαχωρισμό της αθηρωματικής πλάκας από τον υγιή ιστό.

Συγκριτικά με τη βιβλιογραφία (§ 1.3.2.), σε αντίστοιχες μεθόδους που χρησιμοποιούνται στατιστικές παράμετροι 1^{ης} τάξης, βέλτιστα χαρακτηριστικά διαχωρισμού αποδεικνύονται η μέση και η ενδιάμεση τιμή [32], [33], [36]. Εντούτοις, οι Mazzone et al [31] χρησιμοποιούν μεταξύ άλλων την εντροπία και τη σταθερή απόκλιση, γεγονός το οποίο συμφωνεί με την επιλογή μας.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-1

Βέλτιστα χαρακτηριστικά διάκρισης συμπτωματικών-ασυμπτωματικών αθηρωματικών πλακών σύμφωνα με το TTEST

Στην πρώτη στήλη αναγράφεται το όνομα της μεταβλητής-χαρακτηριστικού, σύμφωνα με τους συμβολισμούς των Πινάκων 4-1 έως 4-20 και 4-21 έως 4-40. Στη δεύτερη στήλη αναγράφεται η τιμή του συντελεστή συσχέτισης.

Χαρακτηριστικό	TTEST
F102	0.0001
F61	0.0002
F9	0.0006
F103	0.0008
F101	0.0013
F162	0.0017
F62	0.0026
F92	0.0028
F93	0.0033
F52	0.0040
F91	0.0050

Χαρακτηριστικό	TTEST
KF23	0.0064
F10	0.0071
F161	0.0089
F111	0.0103
KF13	0.0152
F51	0.0152
F83	0.0167
F5	0.0263
F121	0.0401

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-2

Βέλτιστα χαρακτηριστικά διάκρισης συμπτωματικών-ασυμπτωματικών αθηρωματικών πλακών σύμφωνα με το συντελεστή συσχέτισης

Στην πρώτη στήλη αναγράφεται το όνομα της μεταβλητής-χαρακτηριστικού, σύμφωνα με τους συμβολισμούς των Πινάκων 4-1 έως 4-20 και 4-21 έως 4-40. Στη δεύτερη στήλη αναγράφεται η τιμή του συντελεστή συσχέτισης.

Χαρακτηριστικό	Συντ. Συσχέτισης
F102	0,3574
F61	0,3567
F9	0,3241
F103	0,3179
F101	0,3058
F162	0,2979
F62	0,2872
F92	0,2848
F93	0,2803
F52	0,2744
F91	0,268

Χαρακτηριστικό	Συντ. Συσχέτισης
KF23	0,2606
F10	0,2578
F161	0,2507
F111	0,246
KF13	0,2332
F51	0,233
F83	0,2299
F5	0,2138
F121	0,1979

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-3

Βέλτιστα χαρακτηριστικά διάκρισης συμπτωματικών-ασυμπτωματικών αθηρωματικών πλακών σύμφωνα με το ANOVA

Στην πρώτη στήλη αναγράφεται το όνομα της μεταβλητής-χαρακτηριστικού, σύμφωνα με τους συμβολισμούς των Πινάκων 4-1 έως 4-20 και 4-21 έως 4-40. Στη δεύτερη στήλη αναγράφεται η τιμή του συντελεστή F (2.49), ενώ στην τρίτη στήλη η πιθανότητα να απορριφθεί η συγκεκριμένη μεταβλητή, ως μη συμβάλλουσα στην κατηγοριοποίηση.

Χαρακτηριστικό	F	P
F102	15,51838	0,000147
F61	15,45125	0,000151
F9	12,44573	0,000621
F103	11,91923	0,000799
F101	10,93178	0,001291
F162	10,3208	0,001742
F62	9,524422	0,002587
F92	9,35193	0,00282
F93	9,039997	0,003298
F52	8,633806	0,00405
F91	8,19823	0,005055

Χαρακτηριστικό	F	P
KF23	7,723537	0,006449
F10	7,544082	0,007076
F161	7,111462	0,00886
F111	6,825215	0,010293
KF13	6,094107	0,015161
F51	6,085083	0,015235
F83	5,916918	0,016671
F5	5,075425	0,026327
F121	4,319551	0,040092

5.2. Μελλοντική έρευνα

Η επεξεργασία των δεδομένων και τα αποτελέσματα της μεθόδου μας οδήγησαν στην επιλογή 20 χαρακτηριστικών υφής, τα οποία είναι σε θέση να διαχωρίσουν τα περιστατικά μας σε συμπτωματικά και ασυμπτωματικά. Μελλοντικά τα 20 αυτά χαρακτηριστικά θα μπορούσαν να τροφοδοτήσουν ένα νευρωνικό δίκτυο ή κάποια άλλη μέθοδο επιλογής, αποσκοπώντας είτε στην περαιτέρω μείωση των χαρακτηριστικών είτε στην εκπαίδευση ενός νευρωνικού και την ταχύτερη ταξινόμηση νέων περιστατικών. Αυτό θα μπορούσε να γίνει στα πλαίσια ανάπτυξης ενός Υπολογιστικού Συστήματος Υποβοήθησης Διάγνωσης (Computer Diagnosis Support System – CDSS) για αθηρωματικές πλάκες καρωτίδας, στόχος του οποίου θα είναι η ταχύτερη δυνατή ταξινόμηση των περιστατικών και η υποβοήθηση για έγκαιρη διάγνωση και θεραπεία

Επιπλέον, θα μπορούσε να επεκταθεί η μέθοδος σε μεγαλύτερο αριθμό περιστατικών, προκειμένου να ληφθούν πιο αντικειμενικά αποτελέσματα και να πραγματοποιηθούν υπολογισμοί και στατιστικών παραμέτρων 2^{ης} τάξης. Παράλληλα, θα ήταν επιθυμητή η συσχέτιση των αποτελεσμάτων της μεθόδου με τα αποτελέσματα των ιστολογικών εξετάσεων των περιστατικών.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Στο Παράρτημα παρατίθεται ο κώδικας σε Matlab του βασικού προγράμματος επεξεργασίας των υπερηχοτομογραφικών εικόνων καρωτίδας. Αφορά τις περιοχές που αντιστοιχούν σε αθηρωματική πλάκα. Οι υπολογισμοί των στατιστικών παραμέτρων 1^{ης} τάξης γίνονται σε εικόνες που δεν έχουν υποστεί εξισορρόπηση ιστογράμματος.

```
[filename,pathname]=uigetfile;
[A,map]=imread(filename,'tif');
imshow(A);

[C1,RECT]=imcrop(A,[127 117 556 400]); %Define picture
figure;
imshow(C1);

C2=histeq(C1); %Histogram equalization
figure;
imshow(C2);

[C22,xi,yi]=roipoly(C2); %Create "filter"
i=find(C22==1);
[DMX,DMY]=size(i); %Size of the "filter"
C3=(double(C22)).*(double(C1));
mix=min(xi); %Deterioration of working area
miy=min(yi);
width=(max(xi)-min(xi));
length=(max(yi)-min(yi));
[C22,RECT]=imcrop(C22,[mix miy width length]); %Define "filtering" area
[C33,RECT]=imcrop(C3,[mix miy width length]); %Define working area
[SX,SY]=size(C33);

figure;
C4=C33(C22==1);
[COUNTS,x]=imhist(uint8(C4)); %Histogram
```

```
stem(x,COUNTS);
Pix2=1/(DMX);
COUNTS=COUNTS*Pix2;
figure;
imshow(C33,[min(C33(:)) max(C33(:))]);
figure;
imhist(uint8(C4));axis([0 255 0 (max(COUNTS/Pix2))]);
ylabel('# Εικονοστοιχείων');
xlabel('Τιμές Φωτεινότητων');

BB1=Pix2*sum(sum(abs(double(C4)))), %Calculations before masks applied
BS1=Pix2*sum(sum(power(double(C4),2))),
F1=min(C4(:),
F2=max(C4(:),
BMD1=median(median(double(C4))),
COUNTSS=COUNTS(1);
y=1;
while COUNTSS<(1/2),
    y=y+1;
    COUNTSS=COUNTSS+COUNTS(y+1);
end
F3=(y-1),
BME1=mean(mean(double(C4))),
F4=sum(x.*COUNTS),
BSTD1=std(std(double(C4))),
F5=((sum(((x-F4).^2).*COUNTS)).^(1/2)),
F6=F5/F4,
F7=(1/(F5.^3))*sum(((x-F4).^3).*COUNTS),
F8=((1/(F5.^4))*sum(((x-F4).^4).*COUNTS)-3),
F9=sum(COUNTS.^2),
COUNTSWZ=COUNTS+(COUNTS==0);
F10=-sum(COUNTSWZ.*log(COUNTSWZ)),

COUNTSS=COUNTS(1);
y=1;
while COUNTSS<(1/10),
    y=y+1;
    COUNTSS=COUNTSS+COUNTS(y+1);
end
F11=(y-1),
```

```
COUNTSS=COUNTS(1);
y=1;
while COUNTSS<(1/4),
    y=y+1;
    COUNTSS=COUNTSS+COUNTS(y+1);
end
F12=(y-1),
```

```
COUNTSS=COUNTS(1);
y=1;
while COUNTSS<(3/4),
    y=y+1;
    COUNTSS=COUNTSS+COUNTS(y+1);
end
F14=(y-1),
```

```
COUNTSS=COUNTS(1);
y=1;
while COUNTSS<(9/10),
    y=y+1;
    COUNTSS=COUNTSS+COUNTS(y+1);
end
F15=(y-1),
F16=F15-F11,
```

```
L=[1
    4
    6
    4
    1];
E=[-1 -2 0 2 1];
N1=conv2(L,E); %First mask (LE)
K1=conv2(N1,C33);
```

```
L=[1
    4
    6
    4
    1];
```

```
S=[-1 0 2 0 -1];
N2=conv2(L,S); %Second mask (LS)
K2=conv2(N2,C33);

E=[-1
    2
    0
   -2
    1];
S=[-1 0 2 0 -1];
N3=conv2(E,S); %Third mask (ES)
K3=conv2(N3,C33);

R=[1
   -4
    6
   -4
    1];
R=[1 -4 6 -4 1];
N4=conv2(R,R); %Forth mask (RR)
K4=conv2(N4,C33);

MIK1=min(K1(:)); %Histogram transformations
MAK1=max(K1(:));
Diastima=(MAK1-MIK1)/255;
KK1=K1*0;
nn=0;
for n=0:255
    KK1((MIK1<=K1)&(K1<(MIK1+(Diastima/2))))=0;
    KK1(((MIK1+(nn*Diastima)-
(Diastima/2))<=K1)&(K1<(MIK1+(nn*Diastima)+(Diastima/2))))=nn;
    KK1(((MAK1-(Diastima/2))<=K1)&(K1<=MAK1))=255;
    nn=nn+1;
end

MIK2=min(K2(:));
MAK2=max(K2(:));
Diastima=(MAK2-MIK2)/255;
KK2=K2*0;
nn=0;
```



```
for n=0:255
    KK2((MIK2<=K2)&(K2<(MIK2+(Diastima/2))))=0;
    KK2(((MIK2+(nn*Diastima)-
(Diastima/2))<=K2)&(K2<(MIK2+(nn*Diastima)+(Diastima/2))))=nn;
    KK2(((MAK2-(Diastima/2))<=K2)&(K2<=MAK2))=255;
    nn=nn+1;
end
```

```
MIK3=min(K3(:));
MAK3=max(K3(:));
Diastima=(MAK3-MIK3)/255;
KK3=K3*0;
nn=0;
for n=0:255
    KK3((MIK3<=K3)&(K3<(MIK3+(Diastima/2))))=0;
    KK3(((MIK3+(nn*Diastima)-
(Diastima/2))<=K3)&(K3<(MIK3+(nn*Diastima)+(Diastima/2))))=nn;
    KK3(((MAK3-(Diastima/2))<=K3)&(K3<=MAK3))=255;
    nn=nn+1;
end
```

```
MIK4=min(K4(:));
MAK4=max(K4(:));
Diastima=(MAK4-MIK4)/255;
KK4=K4*0;
nn=0;
for n=0:255
    KK4((MIK4<=K4)&(K4<(MIK4+(Diastima/2))))=0;
    KK4(((MIK4+(nn*Diastima)-
(Diastima/2))<=K4)&(K4<(MIK4+(nn*Diastima)+(Diastima/2))))=nn;
    KK4(((MAK4-(Diastima/2))<=K4)&(K4<=MAK4))=255;
    nn=nn+1;
end
```

```
HK1=histeq(uint8(KK1));
HK2=histeq(uint8(KK2));
HK3=histeq(uint8(KK3));
HK4=histeq(uint8(KK4));
HHK1=HK1(C222==1);
HHK2=HK2(C222==1);
```

```
HHK3=HK3(C222==1);
HHK4=HK4(C222==1);
[HCOUNTS1,x1]=imhist(uint8(HHK1));
[HCOUNTS2,x2]=imhist(uint8(HHK2));
[HCOUNTS3,x3]=imhist(uint8(HHK3));
[HCOUNTS4,x4]=imhist(uint8(HHK4));
HCOUNTS1=HCOUNTS1*Pix2;
HCOUNTS2=HCOUNTS2*Pix2;
HCOUNTS3=HCOUNTS3*Pix2;
HCOUNTS4=HCOUNTS4*Pix2;
```

```
KK1=KK1(C222==1);
KK2=KK2(C222==1);
KK3=KK3(C222==1);
KK4=KK4(C222==1);
[COUNTS1,x1]=imhist(uint8(KK1));
[COUNTS2,x2]=imhist(uint8(KK2));
[COUNTS3,x3]=imhist(uint8(KK3));
[COUNTS4,x4]=imhist(uint8(KK4));
COUNTS1=COUNTS1*Pix2;
COUNTS2=COUNTS2*Pix2;
COUNTS3=COUNTS3*Pix2;
COUNTS4=COUNTS4*Pix2;
```

```
MAX=[(max(COUNTS/Pix2))
      (max(COUNTS1/Pix2))
      (max(COUNTS2/Pix2))
      (max(COUNTS3/Pix2))
      (max(COUNTS4/Pix2))
      (max(HCOUNTS1/Pix2))
      (max(HCOUNTS2/Pix2))
      (max(HCOUNTS3/Pix2))
      (max(HCOUNTS4/Pix2))];
MAXX=max(MAX);
```

```
figure;
subplot(4,2,1);imshow(K1,[min(K1(:)) max(K1(:))]);
subplot(4,2,2);imhist(uint8(KK1));axis([0 255 0 MAXX]);
subplot(4,2,3);imshow(K2,[min(K2(:)) max(K2(:))]);
subplot(4,2,4);imhist(uint8(KK2));axis([0 255 0 MAXX]);
```

```
subplot(4,2,5);imshow(K3,[min(K3(:)) max(K3(:))]);  
subplot(4,2,6);imhist(uint8(KK3));axis([0 255 0 MAXX]);  
subplot(4,2,7);imshow(K4,[min(K4(:)) max(K4(:))]);  
subplot(4,2,8);imhist(uint8(KK4));axis([0 255 0 MAXX]);
```

```
figure;  
subplot(4,2,1);imshow(HK1);  
subplot(4,2,2);imhist(uint8(HHK1));axis([0 255 0 MAXX]);  
subplot(4,2,3);imshow(HK2);  
subplot(4,2,4);imhist(uint8(HHK2));axis([0 255 0 MAXX]);  
subplot(4,2,5);imshow(HK3);  
subplot(4,2,6);imhist(uint8(HHK3));axis([0 255 0 MAXX]);  
subplot(4,2,7);imshow(HK4);  
subplot(4,2,8);imhist(uint8(HHK4));axis([0 255 0 MAXX]);
```

```
B1=Pix2*sum(sum(abs(double(KK1)))), %Absolute value  
B2=Pix2*sum(sum(abs(double(KK2)))),  
B3=Pix2*sum(sum(abs(double(KK3)))),  
B4=Pix2*sum(sum(abs(double(KK4)))),
```

```
S1=Pix2*sum(sum((double(KK1)).^2)), %Squares  
S2=Pix2*sum(sum((double(KK2)).^2)),  
S3=Pix2*sum(sum((double(KK3)).^2)),  
S4=Pix2*sum(sum((double(KK4)).^2)),
```

```
KF11=min(K1(:)), %Minimum  
KF12=min(K2(:)),  
KF13=min(K3(:)),  
KF14=min(K4(:)),
```

```
KF21=max(K1(:)), %Maximum  
KF22=max(K2(:)),  
KF23=max(K3(:)),  
KF24=max(K4(:)),
```

```
F11=min(double(KK1(:))), %Minimum  
F12=min(double(KK2(:))),  
F13=min(double(KK3(:))),  
F14=min(double(KK4(:))),
```

```
F21=max(double(KK1(:))), %Maximum
F22=max(double(KK2(:))),
F23=max(double(KK3(:))),
F24=max(double(KK4(:))),

MD1=median(median(double(KK1))), %Median value
MD2=median(median(double(KK2))),
MD3=median(median(double(KK3))),
MD4=median(median(double(KK4))),
COUNTSS1=COUNTS1(1);
y=1;
while COUNTSS1<(1/2),
    y=y+1;
    COUNTSS1=COUNTSS1+COUNTS1(y+1);
end
F31=(y-1),
COUNTSS2=COUNTS2(1);
y=1;
while COUNTSS2<(1/2),
    y=y+1;
    COUNTSS2=COUNTSS2+COUNTS2(y+1);
end
F32=(y-1),
COUNTSS3=COUNTS3(1);
y=1;
while COUNTSS3<(1/2),
    y=y+1;
    COUNTSS3=COUNTSS3+COUNTS3(y+1);
end
F33=(y-1),
COUNTSS4=COUNTS4(1);
y=1;
while COUNTSS4<(1/2),
    y=y+1;
    COUNTSS4=COUNTSS4+COUNTS4(y+1);
end
F34=(y-1),

ME1=mean(mean(double(KK1))), %Mean value
```

ME2=mean(mean(double(KK2))),

ME3=mean(mean(double(KK3))),

ME4=mean(mean(double(KK4))),

F41=sum(x1.*COUNTS1),

F42=sum(x2.*COUNTS2),

F43=sum(x3.*COUNTS3),

F44=sum(x4.*COUNTS4),

STD1=std(std(double(KK1))), %Standard deviation of gray levels

STD2=std(std(double(KK2))),

STD3=std(std(double(KK3))),

STD4=std(std(double(KK4))),

F51=((sum(((x1-ME1).^2).*COUNTS1)).^(1/2)),

F52=((sum(((x2-ME2).^2).*COUNTS2)).^(1/2)),

F53=((sum(((x3-ME3).^2).*COUNTS3)).^(1/2)),

F54=((sum(((x4-ME4).^2).*COUNTS4)).^(1/2)),

F61=F51/F41, %Coefficient of variation

F62=F52/F42,

F63=F53/F43,

F64=F54/F44,

F71=(1/(F51.^3))*sum(((x1-F41).^3).*COUNTS1), %Gray level skewness

F72=(1/(F52.^3))*sum(((x2-F42).^3).*COUNTS2),

F73=(1/(F53.^3))*sum(((x3-F43).^3).*COUNTS3),

F74=(1/(F54.^3))*sum(((x4-F44).^3).*COUNTS4),

F81=((1/(F51.^4))*sum(((x1-F41).^4).*COUNTS1)-3), %Gray level kurtosis

F82=((1/(F52.^4))*sum(((x2-F42).^4).*COUNTS2)-3),

F83=((1/(F53.^4))*sum(((x3-F43).^4).*COUNTS3)-3),

F84=((1/(F54.^4))*sum(((x4-F44).^4).*COUNTS4)-3),

F91=sum(COUNTS1.^2), %Gray level energy

F92=sum(COUNTS2.^2),

F93=sum(COUNTS3.^2),

F94=sum(COUNTS4.^2),

COUNTSWZ1=COUNTS1+(COUNTS1==0);

COUNTSWZ2=COUNTS2+(COUNTS2==0);

COUNTSWZ3=COUNTS3+(COUNTS3==0);

```
COUNTSWZ4=COUNTS4+(COUNTS4==0);  
F101=-sum(COUNTSWZ1.*log(COUNTSWZ1)), %Gray level entropy  
F102=-sum(COUNTSWZ2.*log(COUNTSWZ2)),  
F103=-sum(COUNTSWZ3.*log(COUNTSWZ3)),  
F104=-sum(COUNTSWZ4.*log(COUNTSWZ4)),
```

```
COUNTSS1=COUNTS1(1); %Percentiles  
y=1;  
while COUNTSS1<(1/10),  
    y=y+1;  
    COUNTSS1=COUNTSS1+COUNTS1(y+1);  
end  
F111=(y-1),
```

```
COUNTSS1=COUNTS1(1);  
y=1;  
while COUNTSS1<(1/4),  
    y=y+1;  
    COUNTSS1=COUNTSS1+COUNTS1(y+1);  
end  
F121=(y-1),
```

```
COUNTSS1=COUNTS1(1);  
y=1;  
while COUNTSS1<(3/4),  
    y=y+1;  
    COUNTSS1=COUNTSS1+COUNTS1(y+1);  
end  
F141=(y-1),
```

```
COUNTSS1=COUNTS1(1);  
y=1;  
while COUNTSS1<(9/10),  
    y=y+1;  
    COUNTSS1=COUNTSS1+COUNTS1(y+1);  
end  
F151=(y-1),  
F161=F151-F111, %Histogram width
```

```
COUNTSS2=COUNTS2(1);
```

```
y=1;  
while COUNTSS2<(1/10),  
    y=y+1;  
    COUNTSS2=COUNTSS2+COUNTS2(y+1);  
end  
F112=(y-1),
```

```
COUNTSS2=COUNTS2(1);  
y=1;  
while COUNTSS2<(1/4),  
    y=y+1;  
    COUNTSS2=COUNTSS2+COUNTS2(y+1);  
end  
F122=(y-1),
```

```
COUNTSS2=COUNTS2(1);  
y=1;  
while COUNTSS2<(3/4),  
    y=y+1;  
    COUNTSS2=COUNTSS2+COUNTS2(y+1);  
end  
F142=(y-1),
```

```
COUNTSS2=COUNTS2(1);  
y=1;  
while COUNTSS2<(9/10),  
    y=y+1;  
    COUNTSS2=COUNTSS2+COUNTS2(y+1);  
end  
F152=(y-1),  
F162=F152-F112,
```

```
COUNTSS3=COUNTS3(1);  
y=1;  
while COUNTSS3<(1/10),  
    y=y+1;  
    COUNTSS3=COUNTSS3+COUNTS3(y+1);  
end  
F113=(y-1),
```

```
COUNTSS3=COUNTS3(1);  
y=1;  
while COUNTSS3<(1/4),  
    y=y+1;  
    COUNTSS3=COUNTSS3+COUNTS3(y+1);  
end  
F123=(y-1),
```

```
COUNTSS3=COUNTS3(1);  
y=1;  
while COUNTSS3<(3/4),  
    y=y+1;  
    COUNTSS3=COUNTSS3+COUNTS3(y+1);  
end  
F143=(y-1),
```

```
COUNTSS3=COUNTS3(1);  
y=1;  
while COUNTSS3<(9/10),  
    y=y+1;  
    COUNTSS3=COUNTSS3+COUNTS3(y+1);  
end  
F153=(y-1),  
F163=F153-F113,
```

```
COUNTSS4=COUNTS4(1);  
y=1;  
while COUNTSS4<(1/10),  
    y=y+1;  
    COUNTSS4=COUNTSS4+COUNTS4(y+1);  
end  
F114=(y-1),
```

```
COUNTSS4=COUNTS4(1);  
y=1;  
while COUNTSS4<(1/4),  
    y=y+1;  
    COUNTSS4=COUNTSS4+COUNTS4(y+1);  
end  
F124=(y-1),
```



```
COUNTSS4=COUNTS4(1);  
y=1;  
while COUNTSS4<(3/4),  
    y=y+1;  
    COUNTSS4=COUNTSS4+COUNTS4(y+1);  
end  
F144=(y-1),
```

```
COUNTSS4=COUNTS4(1);  
y=1;  
while COUNTSS4<(9/10),  
    y=y+1;  
    COUNTSS4=COUNTSS4+COUNTS4(y+1);  
end  
F154=(y-1),  
F164=F154-F114,
```

```
F=[DMX
```

```
    BB1
```

```
    BS1
```

```
    F1
```

```
    F2
```

```
    F3
```

```
    F4
```

```
    F5
```

```
    F6
```

```
    F7
```

```
    F8
```

```
    F9
```

```
    F10
```

```
    F11
```

```
    F12
```

```
    F3
```

```
    F14
```

```
    F15
```

```
    F16
```

```
    B1
```

```
    B2
```

```
    B3
```

```
    B4
```

S1
S2
S3
S4
KF11
KF12
KF13
KF14
KF21
KF22
KF23
KF24
F11
F12
F13
F14
F21
F22
F23
F24
F31
F32
F33
F34
F41
F42
F43
F44
F51
F52
F53
F54
F61
F62
F63
F64
F71
F72
F73
F74

F81
F82
F83
F84
F91
F92
F93
F94
F101
F102
F103
F104
F111
F112
F113
F114
F121
F122
F123
F124
F31
F32
F33
F34
F141
F142
F143
F144
F151
F152
F153
F154
F161
F162
F163
F164];
TFjean1=F';
save Jean1 TFjean1;

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Στο Παράρτημα Β παρατίθενται τα χαρακτηριστικά υφής που υπολογίσαμε με το συμβολισμό τους

- | | |
|---|--|
| 1. DMX Μέγεθος Περιοχής Ενδιαφέροντος | 22. B3 |
| 2. BB1 Άθροισμα απολύτων τιμών/no.pixels | 23. B4 |
| 3. BS1 Άθροισμα τετραγώνων των τιμών/
αρ.pixels | 24. S1 Άθροισμα τετραγώνων των τιμών / #
Εικονοστοιχείων |
| 4. F1 Ελάχιστη τιμή φωτεινότητας | 25. S2 |
| 5. F2 Μέγιστη τιμή φωτεινότητας | 26. S3 |
| 6. F3 Ενδιάμεση τιμή φωτεινότητας | 27. S4 |
| 7. F4 Μέση τιμή φωτεινότητας | 28. KF11 Ελάχιστη τιμή φωτεινότητας χωρίς
μετατροπή ιστογράμματος |
| 8. F5 Σταθερή απόκλιση φωτεινότητας | 29. KF12 |
| 9. F6 Συντελεστής απόκλισης | 30. KF13 |
| 10. F7 Λοξότητα επιπέδων του γκρι /
φωτεινότητων | 31. KF14 |
| 11. F8 Κύρτωση επιπέδων του γκρι /
φωτεινότητων | 32. KF21 Μέγιστη τιμή φωτεινότητας χωρίς
μετατροπή ιστογράμματος |
| 12. F9 Ενέργεια επιπέδων του γκρι /
φωτεινότητων | 33. KF22 |
| 13. F10 Εντροπία επιπέδων του γκρι /
φωτεινότητων | 34. KF23 |
| 14. F11 Ποσοστό 10% | 35. KF24 |
| 15. F12 Ποσοστό 25% | 36. F11 |
| 16. F13 Ποσοστό 50% | 37. F12 |
| 17. F14 Ποσοστό 75% | 38. F13 |
| 18. F15 Ποσοστό 90% | 39. F14 |
| 19. F16 Πλάτος ιστογράμματος | 40. F21 |
| | 41. F22 |
| | 42. F23 |
| | 43. F24 |
| | 44. F31 |
| | 45. F32 |
| | 46. F33 |
| 20. B1 Άθροισμα απολύτων τιμών / #
Εικονοστοιχείων | 47. F34 |
| 21. B2 | 48. F41 |
| | 49. F42 |

ΜΑΣΚΕΣ

50. F43	90. F143
51. F44	91. F144
52. F51	92. F151
53. F52	93. F152
54. F53	94. F153
55. F54	95. F154
56. F61	96. F161
57. F62	97. F162
58. F63	98. F163
59. F64	99. F164
60. F71	Στην περίπτωση των масκών οι δύο πρώτοι αριθμοί μετά το F δηλώνουν την παράμετρο, ενώ ο τρίτος τη μάσκα στην οποία αντιστοιχεί.
61. F72	
62. F73	
63. F74	
64. F81	
65. F82	
66. F83	
67. F84	
68. F91	
69. F92	
70. F93	
71. F94	
72. F101	
73. F102	
74. F103	
75. F104	
76. F111	
77. F112	
78. F113	
79. F114	
80. F121	
81. F122	
82. F123	
83. F124	
84. F131	
85. F132	
86. F133	
87. F134	
88. F141	
89. F142	

B I B Λ Ι Ο Γ Ρ Α Φ Ι Α

- [1] WILHJELM J.E., GRØNHOLDT M.-L.M., WIEBE B., JESPERSEN S.K., HANSEN L.K., SILLESEN H., "Quantitative Analysis of Ultrasound B-Mode Images of Carotid Atherosclerotic Plaque : Correlation with Visual Classification and Histological Examination", *IEEE Transactions on Medical Imaging*, vol. 17, no 6, December 1998, pp. 910-922.
- [2] "European carotid surgery trialist' collaborative group (ECST). MRC European carotid surgery trial: Interim results of symptomatic patients with severe (70-99%) or with mild (0-29%) carotid stenosis", *Lancet*, vol. 337, 1991, pp. 1235-1243.
- [3] "North American symptomatic carotid endarterectomy trial collaborators (NASCET): Beneficial effect of carotid endarterectomy in symptomatic patients with high-grade carotid stenosis", *New Eng. J. Med.*, vol. 325, no. 7, 1991, pp. 445-453.
- [4] ALAMOWITCH S., ELIASZIW M., ALGRA A., MELDRUM H., BARNETT HJM., for the North American Symptomatic Carotid Endarterectomy Trial (NASCET) Group, "Risk, causes and prevention of ischaemic stroke in elderly patients with symptomatic internal-carotid-artery stenosis", *Lancet*, 2001, 357, pp. 1154-1160.
- [5] S.GOLEMATI, A.SASSANO, M.J.LEVER, A.A.BHARATH, S.DHANJIL, A.N.NICOLAIDES, "Carotid artery wall motion estimated from B-mode ultrasound using region tracking and block-matching", *Ultrasound Med Biol* 2003 (in press).
- [6] HARALICK R.M., SHAPIRO L.G., *Computer and Robot Vision*, Addison-Wesley Publishing Company, USA, 1992, esp. pp. 453-507.
- [7] PIETIKAINEN M., ROSENFELD A., DAVIS L.S., "Experiments with texture Classification Using Averages of Local Pattern Matches", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. SMC-13, no. 3, May/June 1983, pp. 421-426.

- [8] CHUNG-MING WU, YUNG-CHANG CHEN, KAI-SHENG HSIEH, "Texture Features for Classification of Ultrasonic Liver Images", *IEEE Transactions on Medical Imaging*, vol. 11, no. 2, June 1992, pp. 141-152.
- [9] ROSS R. AND GLOMSET J., "The pathogenesis of atherosclerosis", *N. Engl. J. Med.*, vol. 295, 1976, pp. 369-377.
- [10] ROSS R., "Mechanisms of disease: Atherosclerosis - An inflammatory disease.", *N. Engl. J. Med.*, 340, 1999, pp. 115-126.
- [11] MARTINI F.H., *Fundamentals of Anatomy and Physiology*, Prentice-Hall Inc., 1995.
- [12] Consensus Group, "Consensus statement on the management of patients with asymptomatic atherosclerotic carotid bifurcation lesions", *International Angiology*, vol. 14, 1995, pp. 5-17.
- [13] North American Symptomatic Carotid Endarterectomy Trial Collaborators, "Benefit of carotid endarterectomy in patients with symptomatic moderate or severe stenosis", *N. Engl. J. Med.*, 339, 1998, pp. 1415-1425.
- [14] Executive Committee for the Asymptomatic Carotid Artery Stenosis, "Endarterectomy for asymptomatic carotid artery stenosis", *JAMA*, 273, 1995, pp. 1421-1428.
- [15] POLAK J.F., SHEMANSKI L., O'LEARY D.H., PRICE T.R., SAVAGE P.J., BRANT W.E., REID C., "Hypoechoic plaque at US of the carotid artery: an independent risk factor for incident stroke in adults aged 65 years or older", *Radiology*, 208, 1998, pp. 649-654.
- [16] VAN SWIETEN J.C., KAPPELLE L.J., ALGRA A., VAN LATUM J.C., KOUDSTAAL P.J., VAN GIJN J., "Hypodensity of the cerebral white matter in patients with transient ischemic attack or minor stroke: influence on the rate of subsequent stroke", Dutch TIA Trial Study Group, *Ann Neurol*, vol. 32, 1992, pp. 177-183.

- [17] ΚΟΥΤΣΟΥΡΗΣ Δ., ΝΙΚΗΤΑ Κ., *Ιατρικά απεικονιστικά συστήματα*, ΕΜΠ, 2001.
- [18] HYKES D., HEDRICK W.R., STARCHMAN D.E., *Ultrasound Physics and Instrumentation*, Churchill Livingstone Inc., NY, 1985.
- [19] HOLDSWORTH R.J., MCCOLLUM P.T., BRUCE J.S., HARRISON D.K., "Symptoms, stenosis, and carotid plaque morphology. Is plaque morphology relevant?", *Eur. J. Vasc. Endovasc. Surg.*, 1995, 9, pp. 80-85.
- [20] North American Symptomatic Carotid Endarterectomy Trial Collaborators, "Benefit of carotid endarterectomy in patients with symptomatic moderate or severe stenosis.", *N. Engl. J. Med.*, 1998, 339, pp. 1415-1425.
- [21] LANGSFIELD M., GRAY-WEALE A.C., LUSBY R.J., "The role of plaque morphology and diameter reduction in the development of new symptoms in asymptomatic carotid arteries.", *J. Vasc. Surg.*, 1989, 9, pp. 548-557.
- [22] The Asymptomatic Carotid Atherosclerosis Study (ACAS) Group., "Study design for randomized prospective trial of carotid endarterectomy for asymptomatic atherosclerosis.", *Stroke*, 1989, 20, pp. 844-849.
- [23] MCCARTY K., "Ultrasonic imaging and tissue characterisation", in **Labs K. H., Jäger K. A., Fitzgerald D. E., Woodcock J. P., and Neuburg-Heusler D.** (eds), *Diagnostic Vascular Ultrasound*, Edward Arnold, London, 1992, pp. 253-263.
- [24] GRØNHOLDT M.-L.M., "Ultrasound and lipoproteins as predictors of lipid-rich rupture-prone plaques in the carotid artery", *Arterioscler Thromb Vasc Biol*, vol. 19, 1999, pp. 2-13.
- [25] CHRISTODOULOU C.I., PATTICHIS C.S., PANTZIARIS M., TEGOS T., NICOLAIDES A., ELATROZY T., SABETAI M., DHANJIL S., "Multi Feature Texture Analysis for the Classification of Carotid Plaques", in *International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN '99)*, vol. 5, 1999, pp. 3591-3596.

- [26] EL-BARGHOUTY N.M., LEVINE T., LADVA S., FLANAGAN A., NICOLAIDES A, "Historical verification of computerized carotid plaque characterization", *Eur. J. Vasc. Endovasc. Surg.*, vol. 11, 1996, pp. 414-416.
- [27] RAKEBRANDT F., CRAWFORD D.C., HAVARD D., COLEMAN D., WOODCOCK J.P., "Relationship between ultrasound texture classification images and histology of atherosclerotic plaque", *Ultrasound in Medicine and Biology*, vol. 26, no. 9, 2000, pp. 1393-1402.
- [28] SAYED ALY, BISHOP C.C., "An Objective Characterization of Atherosclerotic Lesion – An Alternative Method to Identify Unstable Plaque.", *Stroke*, August 2000, pp. 1921-1924.
- [29] ELATROZY T., NICOLAIDES A., TEGOS T., GRIFFIN M., "The objective characterisation of ultrasonic carotid plaque features.", *Eur. J. Vasc. Endovasc. Surg.*, vol. 16, 1998, pp. 223-230.
- [30] GRØNHOLDT MLM., "Ultrasound and lipoproteins as predictors of lipid-rich rupture-prone plaques in the carotid artery.", *Arterioscler. Thromb. Vasc. Biol.*, 1999, 19, pp. 2-13.
- [31] MAZZONE A. M., URBANI M. P., PICANO E., PATERNI M., BORGATTI E., DE FABRITIIS A., LANDINI L., "In Vivo Ultrasonic Parametric Imaging of Carotid Atherosclerotic Plaque by Videodensitometric Technique.", *Angiology The Journal of Vascular Diseases*, vol. 46, No 8, August 1995, pp. 663-672.
- [32] BIASI G. M., SAMPAOLO A., MINGAZZINI P., DE AMICIS P., EL-BARGHOUTY N., NICOLAIDES A., "Computer Analysis of Ultrasonic Plaque Echolucency in Identifying High Risk Carotid Bifurcation Lesions.", *Eur. J. Vasc. Endovasc. Surg.*, vol. 17, June 1999, pp. 476-479.
- [33] TEGOS T. J., STAVROPOULOS P., SABETAI M. M., KHODABAKHSH P., SASSANO A., NICOLAIDES A. N., "Determinants of Carotid Plaque Instability : Echoicity versus Heterogeneity.", *Eur. J. Vasc. Endovasc. Surg.*, vol. 22, July 2001, pp. 22-30.

- [34] TEGOS T. J., SABETAI M. M., NICOLAIDES A. N., PARE G., ELATROZY T. S., DHANJIL S., GRIFFIN M., "Comparability of the Ultrasonic Tissue Characteristics of Carotid Plaques.", *J. Ultrasound Med.*, 19, 2000, pp. 399-407.
- [35] ASVESTAS P., GOLEMATI S., MATSOPOULOS G.K., NIKITA K.S., NICOLAIDES A.N., "Fractal Dimension Estimation of Carotid Atherosclerotic Plaques from B-Mode Ultrasound: A Pilot Study", *Ultrasound in Medicine and Biology*, vol. 28, no. 9, 2002, pp. 1129-1136.
- [36] EL-BARGHOUTY N.M., GEROULAKOS G., NIKOLAIDES A., ANDROULAKIS A., BAHAL V., "Computer-assisted carotid plaque characterization ", *Eur. J. Vasc. Endovasc. Surg.*, vol. 9, 1995, pp. 389-393.
- [37] TAMURA H., MORI SHUNJI, YAMAWAKI T., "Textual Features Corresponding to Visual Perception", *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. SMC-8, no. 6, June 1978, pp. 460-473.
- [38] HARALICK R. M., BOSLEY R., "Texture Features for Image Classification.", *Third ERTS Symposium*, NASA SP-351, 1973, pp. 1219-1228.
- [39] HARALICK R.M., SHANMUGAM K., DINSTEIN ITS'HAK, "Textual Features for Image Classification", *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. SMC-3, no. 6, November 1973, pp. 610-621.
- [40] WESZKA J.S., DYER C.R., ROSENFELD A., "A Comparative Study of Texture Measures for Terrain Classification", *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. SMC-6, no. 4, April 1976, pp. 269-285.
- [41] DYER C.R., ROSENFELD A., "Fourier Text Features: Suppression of Aperture Effects", *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. SMC-6, no. 10, October 1976, pp. 269-285.
- [42] PEITGEN H.O., RICHTER P.H., *The Beauty of Fractal*, Springer-Verlag, New York, 1986.

- [43] VOSS R.F., "Random fractal forgeries", in *Fundamental Algorithms for Computer Graphics*, Earnshaw R.A. (ed.), Springer-Verlag, New York, 1985, pp. 805-836.
- [44] CHI-CHANG CHEN, DAPONTE J.S., FOX M.D., "Fractal Feature Analysis and Classification in Medical Imaging", *IEEE Transactions on Medical Imaging*, vol. 8, no. 2, June 1989, pp. 133-142.
- [45] LAWS K. I., "Rapid Texture Identification.", *Proceedings of the SPIE Conference on Image Processing for Missile Guidance*, San Diego, 1980, pp. 376-380.
- [46] LAWS K. I., "Goal-Directed Textured-Image Segmentation.", *Applications of Artificial Intelligence II*, SPIE, vol. 548, 1985, pp. 19-26.
- [47] <<http://www.faughnan.com/acp/biblio.html>>
- [48] <<http://www.med.usf.edu/CLASS/decision.htm>>
- [49] <<http://www.informatics-review.com/decision-support/>>
- [50] ZHANG HONGBIN, GUANGYU SUN, "Feature selection using tabu search method.", *Pattern Recognition*, 35, 2002, pp. 701-711.
- [51] YOSHIDA H., LEARDI R., FUNATSU K., VARMUZA K., "Feature selection by genetic algorithms for mass spectral classifiers.", *Analytica Chimica Acta*, 446, 2001, pp. 485-494.
- [52] SOMOL P., PUDIL P., "Feature selection toolbox.", *Pattern Recognition*, 35, 2002, pp. 2749-2759.
- [53] SWINIARSKI R. W., HARGIS L., "Rough sets as a front end of neural-networks texture classifiers.", *Neurocomputing*, 36, 2001, pp. 85-102.
- [54] BISHOP C. M., *Neural Networks for Pattern Recognition*, Clarendon Press, Oxford, 1995.

- [55] FUKUNAGA I., *Introduction to Statistical Pattern Recognition*, Academic Press, New York, 1972.
- [56] NARENDRA P. M., FUKUNAGA K., "A branch and bound algorithm for feature selection.", *IEEE Trans. Comput.*, vol. 26, 1977, no 9, pp. 917-922.
- [57] MUCCIARDI A., GOSE E. E., "A comparison of seven techniques for choosing subsets of pattern recognition properties.", *IEEE Trans. Comput.*, vol. 20, 1971, no 9, pp. 1023-1031.
- [58] LOTLIKAR R., KOTHARI R., "Bayes-optimality motivated-linear and multilayered perceptron-based dimansionality reduction.", *IEEE Trans. Neural Networks*, vol. 11, 2000, no 2, pp. 452-463.
- [59] GLOVER F., "Tabu Search I", *ORSA J. Comput.*, vol. 1, 1989, pp. 190-206.
- [60] GLOVER F., "Tabu Search II", *ORSA J. Comput.*, vol. 2, 1989, pp. 4-32.
- [61] HOLLAND J., *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, University of Michigan Press, Ann Arbor, USA, 1975.
- [62] GOLDBERG D. E., *Genetic Algorithms : in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley, reading, MA, 1989.
- [63] HANSELMAN D., LITTLEFIELD B., *The Student Edition of Matlab, User's Guide, Version 5*, The Math Works Inc., USA, 1997.
- [64] JUNGWON RYU, SUNG-BAE CHO, "Towards Optimal Feature and Classifier for Gene Expression Classification of Cancer", in **Pal N.R., Sugeno M.** (eds.), *AFSS 2002, LNAI*, 2275, 2002, pp. 310-317.
- [65] DAVIS, *Statistics and analysis in geology*, New York, John Willey and Sons. Inc., 1973.

[66] STEEL R. G. D., TORRIE J. K., *Principles and procedures of statistics*, 2nd ed., New York, MacGraw –Hill, 1980.

[67] VIEIRA S., *Introdução a Bioestatística*, 5th ed., Rio de Janeiro, Campus, 1988.