



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

**Διερεύνηση της παθοφυσιολογικής σημασίας
χαρακτηριστικών υφής από την εφαρμογή του
μετασχηματισμού ranklet σε εικόνες υπερήχου της καρωτίδας**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Χρυσοβαλάντω – Θεοδώρα Κ. Ηλιοπούλου

Επιβλέπουσα : Κωνσταντίνα Σπ. Νικήτα

Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2016



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

**Διερεύνηση της παθοφυσιολογικής σημασίας
χαρακτηριστικών υφής από την εφαρμογή του
μετασχηματισμού ranklet σε εικόνες υπερήχου της καρωτίδας**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Χρυσοβαλάντω – Θεοδώρα Κ. Ηλιοπούλου

Επιβλέπουσα : Κωνσταντίνα Σπ. Νικήτα

Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 21^η Οκτωβρίου 2016.

.....

Κ. Νικήτα

Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

.....

Δ. Δ. Κουτσούρης

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Γ. Ματσόπουλος

Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Οκτώβριος 2016

.....
Χρυσοβαλάντω – Θεοδώρα Κ. Ηλιοπούλου

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

Copyright © Χρυσοβαλάντω – Θεοδώρα Ηλιοπούλου 2016

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.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η αθηρωματική πλάκα είναι μια μορφή αλλοίωσης του εσωτερικού των αγγείων που σκληραίνει τις αρτηρίες προκαλώντας στένωση του αυλού τους. Στην περίπτωση της καρωτιδικής αρτηρίας, η ρήξη της πλάκας μπορεί να προκαλέσει εγκεφαλικό επεισόδιο, ισχαιμικό επεισόδιο ή προσωρινή απώλεια όρασης. Η παρούσα εργασία στοχεύει στην υλοποίηση και τη χρήση του μη-παραμετρικού, πολυ-κλιμακωτού και πολυ-κατευθυντικού μετασχηματισμού ranklet (Ranklet Transform – RT) σε εικόνες υπερηχογραφήματος της καρωτίδας για την εξαγωγή μορφολογικών χαρακτηριστικών κατάλληλων για τη διάγνωση και πρόγνωση της νόσου.

Η εφαρμογή του μετασχηματισμού ranklet οδηγεί στην εξαγωγή συντελεστών, ανεξάρτητων της έντασης των εικονοστοιχείων της εικόνας στην οποία εφαρμόζεται, που περιγράφουν την κατανομή εντάσεων φωτεινότητας σε μια γειτονική περιοχή, με βάση τα κυματίδια Haar και στον υπολογισμό αθροισμάτων τύπου Mann–Whitney–Wilcoxon (MWW). Για κάθε εικόνα στην οποία εφαρμόστηκε ο μετασχηματισμός εξήχθησαν και μελετήθηκαν δέκα χαρακτηριστικά υφής δεύτερης τάξης (autocorrelation, cluster prominence, cluster shade, contrast, correlation, dissimilarity, energy, haralick correlation, , homogeneity, inverse difference moment normalized). Δεδομένου ότι οι πραγματικές εικόνες υπερήχου καρωτίδας έχουν τη μορφή συνήθων γεωμετρικών σχημάτων, ο μετασχηματισμός εφαρμόστηκε σε 8 συνθετικές εικόνες βασικών γεωμετρικών σχημάτων (οριζόντια και κατακόρυφη ευθεία γραμμή, κύκλος, δίσκος, οριζόντιο και κατακόρυφο ημικύκλιο και οριζόντια και κατακόρυφη ευθεία γραμμή με ημικύκλιο), με στόχο την αξιολόγηση της ικανότητας του μετασχηματισμού να διαχωρίζει σχήματα. Εξετάστηκε η ικανότητα του μετασχηματισμού να διαχωρίζει τις παραπάνω συνθετικές εικόνες που περιέχουν το ίδιο σχήμα αλλά διαφέρουν ως προς τον τύπο του ορίου του σχήματος (απότομη ή σταδιακή μεταβολή φωτεινότητας). Ελέγχθηκε η επίδραση της κλίμακας του μετασχηματισμού και του πλήθους των επιπέδων κβάντισης στα οποία κβαντίζονται οι συντελεστές ranklet, προκειμένου να υπολογιστούν τα χαρακτηριστικά υφής. Ο μετασχηματισμός εφαρμόστηκε επιπλέον, σε 94 ακολουθίες υπερήχου Β-σάρωσης συμπτωματικών και ασυμπτωματικών περιστατικών (62 υψηλής στένωσης και 26 χαμηλής), προερχόμενες από την Αγγειοχειρουργική Κλινική του Πανεπιστημιακού Γενικού Νοσοκομείου «Αττικόν», για την αξιολόγηση της ικανότητας του μετασχηματισμού να διακρίνει καρωτίδες με υψηλή και χαμηλή στένωση. Εφαρμόστηκε σε 54 από τις 94 ακολουθίες υπερήχου, που παρουσίαζαν δύο πλάκες στο εσωτερικό του αγγείου, με στόχο την εύρεση σημαντικών διαφορών στα χαρακτηριστικά υφής για πλάκες που εντοπίζονται στην ίδια καρωτίδα.

Για την εύρεση των στατιστικά σημαντικών διαφορών των χαρακτηριστικών υφής στις παραπάνω περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκε το τεστ αθροίσματος βαθμών (rank-sum). Προτείνονται για ανάλυση οι κλίμακες 2, 4, 8 και 16, και 21 επίπεδα κβάντισης. Παρατηρήθηκε ότι ο μετασχηματισμός είναι ικανός να διακρίνει τα διαφορετικά σχήματα αλλά και τον τύπο του ορίου τους, αφού 8 από τα 10 χαρακτηριστικά υφής διέφεραν σημαντικά (εκτός των autocorrelation και dissimilarity). Όμοια είναι τα

συμπεράσματα και για τη διάκριση του βαθμού στένωσης της πλάκας για τον οριζόντιο προσανατολισμό ανάλυσης (8/10 χαρακτηριστικά), ενώ η κατακόρυφη και η διαγώνια ανάλυση δε συνεισφέρει σημαντικά (σημαντικές διαφορές για 2/10 και 4/10 αντίστοιχα). Βρέθηκε ότι οι πλάκες που εντοπίζονται στην ίδια καρωτίδα έχουν ίδια μορφολογία, αφού τα χαρακτηριστικά υφής δεν παρουσίαζαν σημαντικές διαφορές (7/10, 8/10 και 10/10 για την οριζόντια, κάθετη και διαγώνια ανάλυση αντίστοιχα). Συνεπώς, η συνεισφορά της εφαρμογής του μετασχηματισμού ranklet σε εικόνες καρωτίδας στην πρόγνωση της αθηρωματικής νόσου είναι ιδιαίτερα σημαντική.

Λέξεις κλειδιά: Μετασχηματισμός ranklet, Καρωτιδική πλάκα, Χαρακτηριστικά Υφής Δεύτερης Τάξης, Μη-παραμετρικός Πολυ-κατευθυντικός Πολυ-κλιμακωτός μετασχηματισμός, Εικόνες Υπερήχων

ABSTRACT

Atheromatous plaque is a condition of the inner part of artery vessels that stiffens the arteries causing their stenosis. In the case of the carotid artery, the rupture of the plaque may cause stroke, ischemic attack or amaurosis fugax. This thesis aims at the implementation of the non-parametrical, multi-scale and multi-directional ranklet transform and its application to ultrasound images of carotid artery in order to extract texture features useful to disease diagnosis and prognosis.

The application of ranklet transform leads to gray scale invariant coefficients, which describe intensity distribution in a local region of the picture, based on Haar wavelets and rank sum Mann-Whitney-Wilcoxon (MWW). In order to get insight to the transform's properties, ten second order texture features were extracted and studied for each image that the transform was applied to (autocorrelation, cluster prominence, cluster shade, contrast, correlation, dissimilarity, energy, haralick correlation, , homogeneity, inverse difference moment normalized). Given that artery wall and plaque appear in B-mode ultrasound images as canonically shaped structures, like line, circle, disk, semicircle and line with semicircle, the transform was first applied to 8 synthetic images of canonical geometrical shapes, in order to evaluate the transform's ability to discriminate shapes. Its ability to discriminate images with same shapes but different type of shape's boundary (steep or gradually changing gray-level values) was investigated. The effect of transform's scale and quantization levels, to which ranklet coefficients are quantized in order to calculate texture features, was examined. Moreover, the transform was applied to 94 B-mode ultrasound image sequences of symptomatic and asymptomatic patients (62 with high stenosis and 26 with low), recorded at the Vascular Surgery Department of the Medical School, University of Athens, "Attikon" hospital, in order to evaluate the transform's ability to discriminate carotids with high and low grade of stenosis. It was applied to 54 of the 94 ultrasound sequences, which contained two plaques in the inner of the vessel, in order to find significant differences between features of plaques that appear in the same carotid.

Rank-sum test was used to find statistically significant differences between texture features in the above cases. The scales 2, 4, 8 and 16 and 21 quantization levels are recommended for analysis. It was observed that the transform is able to discriminate different shapes and different boundary types, since 8 out of 10 texture features had significant differences (except of autocorrelation and dissimilarity). Same results occur for the case of plaque's stenosis' discrimination at horizontal analysis (8/10 features), while vertical and diagonal analysis don't contribute significantly (significant differences for 2/10 and 4/10 features respectively). It is concluded that morphology of plaques that appear in the same carotid is similar, since there was not observed significant difference between the texture features (7/10, 8/10 and 10/10 for horizontal, vertical and diagonal analysis respectively). Consequently, ranklet transform's contribution to prognosis of carotid atheromatous plaque is significant, through transform's application to ultrasound images.

Keywords: Ranklet Transform, Carotid plaque, Second Order Statistics, Non-parametric Multidirectional Multi-scale transform, Ultrasound Images

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θέλω πολύ να ευχαριστήσω την Καθηγήτρια Κωνσταντίνα Νικήτα για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντας μου αυτή τη διπλωματική εργασία, με την οποία ολοκληρώνονται οι σπουδές μου στη Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Επίσης θέλω να ευχαριστήσω θερμά τη Σπυρέττα Γολεμάτη, Επίκουρη Καθηγήτρια Βιοϊατρικής Τεχνολογίας στην Ιατρική Σχολή του Πανεπιστημίου Αθηνών για την πολύτιμη βοήθεια της, την καθοδήγηση και τις συμβουλές που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια της διπλωματικής. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω και την οικογένεια μου για την υπομονή και την στήριξη τους όλα αυτά τα χρόνια.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	7
ABSTRACT.....	9
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	11
Περιεχόμενα εικόνων	15
Περιεχόμενα πινάκων.....	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	23
1.1 Δομή και λειτουργία της καρωτίδας.....	24
1.1.1 Ανατομικά χαρακτηριστικά	24
1.1.2 Αθηροσκλήρωση και καρδιαγγειακές παθήσεις	25
1.2 Απεικόνιση καρωτίδας.....	27
1.3 Ανάλυση υφής εικόνων καρωτίδας με χρήση μετασχηματισμών	29
1.3.1 Χαρακτηριστικά ανάλυσης υφής	29
1.3.2 Μετασχηματισμοί ανάλυσης υφής καρωτίδας	30
1.4 Εφαρμογές μετασχηματισμού Ranklet.....	34
1.5: Σκοπός της εργασίας.....	36
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ RANKLET	39
2.1 Έλεγχος αθροίσματος διατάξεων MWW	40
2.2 Κυματίδιο Haar.....	40
2.3 Μετασχηματισμός Ranklet.....	41
2.4 Υπολογισμός τάξης ενός συνόλου παρατηρήσεων με τον αλγόριθμο distribution counting.....	44
2.5 Ανάπτυξη μεθοδολογίας εφαρμογής του μετασχηματισμού ranklet.....	46
2.6 Εξαγωγή χαρακτηριστικών υφής	47
2.7 Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση του μετασχηματισμού.....	49
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΥΛΙΚΟ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	51
3.1 Απεικονιστικά δεδομένα.....	52
3.1.1 Συνθετικές εικόνες.....	52
3.1.2 Εικόνες υπερήχου β-σάρωσης της καρωτίδας.....	53
3.2 Εφαρμογή μετασχηματισμού ranklet σε συνθετικές εικόνες	55
3.2.1 Συντελεστές ranklet για εικόνες με ευθεία και κύκλο	55
3.2.2 Διερεύνηση της επίδρασης του τύπου του ορίου του σχήματος (απότομη ή σταδιακή μεταβολή φωτεινότητας).....	58
3.2.3 Διερεύνηση χαρακτηριστικών υφής διαφορετικών σχημάτων	76

3.3 Εφαρμογή μετασχηματισμού ranklet σε εικόνες υπερήχου καρωτίδας	79
3.3.1 Με και χωρίς προεπεξεργασία της αρχικής εικόνας	80
3.3.2 Μελέτη επίδρασης του μεγέθους παραθύρου ανάλυσης r	83
3.3.3 Μελέτη επίδρασης του πλήθους επιπέδων κβάντισης b	87
3.3.4 Σύγκριση χαρακτηριστικών για περιπτώσεις αθηρωματικής καρωτίδας με υψηλή και χαμηλή στένωση	89
3.3.5 Σύγκριση χαρακτηριστικών των δύο πλακών που εμφανίζονται στην ίδια εικόνα υπερήχου καρωτίδας.....	92
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	95
4.1 Ευρήματα και σχολιασμός	96
4.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	97
4.3 Συμπεράσματα	98
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	99
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	105

Περιεχόμενα εικόνων

Εικόνα 1. 1: Σχηματική απεικόνιση της ανατομίας της καρωτίδας	24
Εικόνα 1. 2: Τα τρία στρώματα του τοιχώματος της αρτηρίας: το εσωτερικό (intima), το μέσο (media), και το εξωτερικό (adventitia).....	25
Εικόνα 1. 3: Η αθηρωματική πλάκα στην καρωτίδα	25
Εικόνα 1. 4: Το σημείο διαχωρισμού της υγιούς καρωτίδας σε εσωτερική και εξωτερική, όπως απεικονίζεται με συσκευή υπερήχων Β-σάρωσης [15]	28
Εικόνα 1. 5: Αναπαράσταση σήματος με χρήση του WPT	32
Εικόνα 1. 6: Δέντρο κυματιδικής ανάλυσης WPT	32
Εικόνα 1. 7: Δυαδικό δέντρο φίλτρων για το σύνθετο μετασχηματισμό κυματιδίου	33
Εικόνα 2. 1: Απεικόνιση του κυματιδίου Haar	41
Εικόνα 2. 2: Παράδειγμα εφαρμογής πολυ-κλιμακωτού μετασχηματισμού ranklet σε εικόνα 8x8 για ανάλυση $r=2$ (α), $r=4$ (β) και $r=8$ (γ), με τη βοήθεια των κυματιδίων Haar με μεγέθη παραθύρων 2x2, 4x4 και 8x8, αντίστοιχα. Η κλίμακα (resolution) $r=2$ οδηγεί σε 49 τετραγωνικά παράθυρα (crops) (α), ενώ για $r=4$ (β) και $r=8$ (γ) προκύπτουν 25 και 1 παράθυρα αντίστοιχα [44].	42
Εικόνα 2. 3: Τα τρία δισδιάστατα κυματίδια Haar, για την (α) κατακόρυφη, (β) οριζόντια και (γ) διαγώνια κατεύθυνση. Τα γράμματα T και C αναφέρονται στα υποσύνολα πειράματος και ελέγχου.	43
Εικόνα 2. 4: Αλληλουχία των διαδικασιών που απαιτούνται για την ανάλυση υψής μέσω της εφαρμογής του μετασχηματισμού ranklet σε μια δισδιάστατη εικόνα υπερήχου καρωτίδας.....	46
Εικόνα 2. 5: Εύρεση στατιστικά σημαντικών διαφορών μεταξύ των χαρακτηριστικών υψής.	47
Εικόνα 2. 6: Αριθμητικό παράδειγμα κατασκευής GLCM για απόσταση $d=1$ και γωνία $\theta=0^\circ$	48
Εικόνα 3. 1: Συνθετικές εικόνες κατακόρυφης ευθείας με απότομη και σταδιακή μεταβολή έντασης φωτεινότητας. (α) μία, (β) δύο και (γ) τρεις κατακόρυφες ευθείες διαφορετικής έντασης.	53
Εικόνα 3. 2: Παράδειγμα εικόνας υπερήχου Β-σάρωσης. Ο βαθμός στένωσης της καρωτίδας του συγκεκριμένου παραδείγματος είναι 80%. (α) η εικόνα όπως προκύπτει από την καταγραφή, (β) η ίδια εικόνα με σκιασμένη την περιοχή ενδιαφέροντος (πλάκα) και (γ) η υποεικόνα της πλάκας, που προκύπτει από την αρχική εικόνα. Ο μετασχηματισμός εφαρμόζεται στην εικόνα (γ).....	54
Εικόνα 3. 3: Εικόνες ranklet RI της κατακόρυφης ευθείας (εικόνα 3.1(α)) για τις τρεις κατευθύνσεις ανάλυσης (οριζόντια, κατακόρυφη και διαγώνια), για κλίμακα $r=8$ και επίπεδα κβάντισης $b=21$. Οι τιμές των εικόνων RI [-1, +1] έχουν μετατραπεί στην κλίμακα [0, +1] για λόγους οπτικοποίησης.	56
Εικόνα 3. 4: Οριζόντια ευθεία	57

Εικόνα 3. 5: Εικόνες ranklet RI της οριζόντιας ευθείας (εικόνα 3.4) για τις τρεις κατευθύνσεις ανάλυσης (οριζόντια, κατακόρυφη και διαγώνια), για κλίμακα $r=8$ και επίπεδα κβάντισης $b=21$. Οι τιμές των εικόνων RI $[-1, +1]$ έχουν μετατραπεί στην κλίμακα $[0, +1]$ για λόγους οπτικοποίησης.	57
Εικόνα 3. 6: Κύκλος	57
Εικόνα 3. 7: Εικόνες ranklet RI του κύκλου (εικόνα 3.6) για τις τρεις κατευθύνσεις ανάλυσης (οριζόντια, κατακόρυφη και διαγώνια), για κλίμακα $r=8$ και επίπεδα κβάντισης $b=21$. Οι τιμές των εικόνων RI $[-1, +1]$ έχουν μετατραπεί στην κλίμακα $[0, +1]$ για λόγους οπτικοποίησης.	58
Εικόνα 3. 8: Οι τρεις εικόνες οριζόντιας ευθείας, με απότομη και σταδιακή μεταβολή φωτεινότητας στα όρια του σχήματος I_1, I_2, I_3 , σε συνδυασμό με τις μετασχηματισμένες τους εικόνες ranklet RI για τις τρεις κατευθύνσεις (οριζόντια, κατακόρυφη και διαγώνια), για κλίμακα $r=8$ και επίπεδα κβάντισης $b=21$. Οι τιμές των εικόνων RI $[-1, +1]$ έχουν μετατραπεί στην κλίμακα $[0, +1]$ για λόγους οπτικοποίησης.	59
Εικόνα 3. 9: Οι τρεις εικόνες κατακόρυφης ευθείας, με απότομη και σταδιακή μεταβολή φωτεινότητας στα όρια του σχήματος I_1, I_2, I_3 , σε συνδυασμό με τις μετασχηματισμένες τους εικόνες ranklet RI για τις τρεις κατευθύνσεις (οριζόντια, κατακόρυφη και διαγώνια), για κλίμακα $r=8$ και επίπεδα κβάντισης $b=21$. Οι τιμές των εικόνων RI $[-1, +1]$ έχουν μετατραπεί στην κλίμακα $[0, +1]$ για λόγους οπτικοποίησης.	61
Εικόνα 3. 10: Οι τρεις εικόνες κύκλου, με απότομη και σταδιακή μεταβολή φωτεινότητας στα όρια του σχήματος I_1, I_2, I_3 , σε συνδυασμό με τις μετασχηματισμένες τους εικόνες ranklet RI για τις τρεις κατευθύνσεις (οριζόντια, κατακόρυφη και διαγώνια), για κλίμακα $r=8$ και επίπεδα κβάντισης $b=21$. Οι τιμές των εικόνων RI $[-1, +1]$ έχουν μετατραπεί στην κλίμακα $[0, +1]$ για λόγους οπτικοποίησης.	63
Εικόνα 3. 11: Οι τρεις εικόνες δίσκου, με απότομη και σταδιακή μεταβολή φωτεινότητας στα όρια του σχήματος I_1, I_2, I_3 , σε συνδυασμό με τις μετασχηματισμένες τους εικόνες ranklet RI για τις τρεις κατευθύνσεις (οριζόντια, κατακόρυφη και διαγώνια), για κλίμακα $r=8$ και επίπεδα κβάντισης $b=21$. Οι τιμές των εικόνων RI $[-1, +1]$ έχουν μετατραπεί στην κλίμακα $[0, +1]$ για λόγους οπτικοποίησης.	65
Εικόνα 3. 12: Οι τρεις εικόνες οριζόντιου ημικυκλίου, με απότομη και σταδιακή μεταβολή φωτεινότητας στα όρια του σχήματος I_1, I_2, I_3 , σε συνδυασμό με τις μετασχηματισμένες τους εικόνες ranklet RI για τις τρεις κατευθύνσεις (οριζόντια, κατακόρυφη και διαγώνια), για κλίμακα $r=8$ και επίπεδα κβάντισης $b=21$. Οι τιμές των εικόνων RI $[-1, +1]$ έχουν μετατραπεί στην κλίμακα $[0, +1]$ για λόγους οπτικοποίησης.	67
Εικόνα 3. 13: Οι τρεις εικόνες κατακόρυφου ημικυκλίου, με απότομη και σταδιακή μεταβολή φωτεινότητας στα όρια του σχήματος I_1, I_2, I_3 , σε συνδυασμό με τις μετασχηματισμένες τους εικόνες ranklet RI για τις τρεις κατευθύνσεις (οριζόντια, κατακόρυφη και διαγώνια), για κλίμακα $r=8$ και επίπεδα κβάντισης $b=21$. Οι τιμές	

των εικόνων RI [-1, +1] έχουν μετατραπεί στην κλίμακα [0, +1] για λόγους οπτικοποίησης.	69
Εικόνα 3. 14: Οι τρεις εικόνες οριζόντιας γραμμής με ημικύκλιο, με απότομη και σταδιακή μεταβολή φωτεινότητας στα όρια του σχήματος I_1 , I_2 , I_3 , σε συνδυασμό με τις μετασχηματισμένες τους εικόνες ranklet RI για τις τρεις κατευθύνσεις (οριζόντια, κατακόρυφη και διαγώνια), για κλίμακα $r=8$ και επίπεδα κβάντισης $b=21$. Οι τιμές των εικόνων RI [-1, +1] έχουν μετατραπεί στην κλίμακα [0, +1] για λόγους οπτικοποίησης.	71
Εικόνα 3. 15: Οι τρεις εικόνες κατακόρυφης γραμμής με ημικύκλιο, με απότομη και σταδιακή μεταβολή φωτεινότητας στα όρια του σχήματος I_1 , I_2 , I_3 , σε συνδυασμό με τις μετασχηματισμένες τους εικόνες ranklet RI για τις τρεις κατευθύνσεις (οριζόντια, κατακόρυφη και διαγώνια), για κλίμακα $r=8$ και επίπεδα κβάντισης $b=21$. Οι τιμές των εικόνων RI [-1, +1] έχουν μετατραπεί στην κλίμακα [0, +1] για λόγους οπτικοποίησης.	73
Εικόνα 3. 16: Απεικονίσεις των τριών μετασχηματισμένων εικόνων ranklet RI, μία για κάθε κατεύθυνση ανάλυσης, οριζόντια(h), κατακόρυφη (v) και διαγώνια (d), που προκύπτουν από την ανάλυση στην αρχική εικόνα I, την εικόνα I με φίλτρο εξισορρόπησης ιστογράμματος (hist), την εικόνα I με φίλτρο Gamma ($g_1=0.5$) και την εικόνα I με φίλτρο Gamma ($g_2=1.5$). Μέγεθος παραθύρου $r=8$, και επίπεδα κβάντισης $b=21$. Οι τιμές των εικόνων RI [-1, +1] έχουν μετατραπεί στην κλίμακα [0, +1] για λόγους οπτικοποίησης.	81
Εικόνα 3. 17: Απεικονίσεις των τριών μετασχηματισμένων εικόνων ranklet $R_{r,o}$, μία για κάθε κατεύθυνση ανάλυσης (δείκτης o), οριζόντια(h), κατακόρυφη (v) και διαγώνια (d), που προκύπτουν από την ανάλυση στην αρχική εικόνα I, για το σύνολο κλιμάκων $r=4, 8, 16$ και 32 (δείκτης r) και επίπεδα κβάντισης $b=21$. Οι τιμές των εικόνων RI [-1, +1] έχουν μετατραπεί στην κλίμακα [0, +1] για λόγους οπτικοποίησης.	84
Εικόνα 3. 18: Παράδειγμα απεικόνισης της απομονωμένης περιοχής πλάκας και των μετασχηματισμένων εικόνων ranklet $R_{r,o}$, όπου $r=8$ το μέγεθος παραθύρου ανάλυσης και ο η κατεύθυνση ανάλυσης, για περιστατικό (α) χαμηλής στένωσης (20%) και (β) υψηλής στένωσης (95%). Επίπεδα κβάντισης $b=21$. Η καρωτίδα με την υψηλή στένωση παρουσιάζει περισσότερες διακυμάνσεις από την καρωτίδα με τη χαμηλή στένωση, στην οριζόντια κατεύθυνση. Οι τιμές των εικόνων RI [-1, +1] έχουν μετατραπεί στην κλίμακα [0, +1] για λόγους οπτικοποίησης.	92

Περιεχόμενα πινάκων

Πίνακας 2. 1: Παράδειγμα υπολογισμού τάξης ενός συνόλου παρατηρήσεων	44
Πίνακας 2. 2: Παράδειγμα υπολογισμού τάξης ενός συνόλου παρατηρήσεων με ισοπαλίες	45
Πίνακας 3. 1: Ρυθμίσεις της διάταξης υπερήχων για την καταγραφή πραγματικών χρονικών ακολουθιών εικόνων υπερήχων β-σάρωσης της καρωτίδας σε διαμήκη τομή.....	55
Πίνακας 3. 2: Συντελεστές ranklet οριζόντιας σάρωσης για την εικόνα με την κατακόρυφη ευθεία (εικόνα 3.1(α)) για τις στήλες 110-118 (αριστερό όριο κατακόρυφης ευθείας)	56
Πίνακας 3. 3: Συντελεστές ranklet οριζόντιας σάρωσης για την εικόνα με την κατακόρυφη ευθεία (εικόνα 3.1(α)) για τις στήλες 131-138 (δεξιό όριο κατακόρυφης ευθείας)	56
Πίνακας 3. 4: Χαρακτηριστικά υφής για τις τρεις εικόνες οριζόντιας ευθείας με απότομη και σταδιακή μεταβολή φωτεινότητας στα όρια του σχήματος I_1 , I_2 και I_3 (εικόνα 3.8), για την οριζόντια κατεύθυνση, κλίμακα $r=8$ και επίπεδα κβάντισης $b=21$	60
Πίνακας 3. 5: Χαρακτηριστικά υφής για τις τρεις εικόνες κατακόρυφης ευθείας με απότομη και σταδιακή μεταβολή φωτεινότητας στα όρια του σχήματος I_1 , I_2 και I_3 (εικόνα 3.9), για την κατακόρυφη κατεύθυνση ανάλυσης, κλίμακα $r=8$ και επίπεδα κβάντισης $b=21$	61
Πίνακας 3. 6: Χαρακτηριστικά υφής για τις τρεις εικόνες κύκλου με απότομη και σταδιακή μεταβολή φωτεινότητας στα όρια του σχήματος I_1 , I_2 και I_3 (εικόνα 3.10), για τις τρεις κατευθύνσεις (οριζόντια, κατακόρυφη και διαγώνια), κλίμακα $r=8$ και επίπεδα κβάντισης $b=21$	63
Πίνακας 3. 7: Χαρακτηριστικά υφής για τις τρεις εικόνες δίσκου με απότομη και σταδιακή μεταβολή φωτεινότητας στα όρια του σχήματος I_1 , I_2 και I_3 (εικόνα 3.11), για τις τρεις κατευθύνσεις (οριζόντια, κατακόρυφη και διαγώνια), κλίμακα $r=8$ και επίπεδα κβάντισης $b=21$	65
Πίνακας 3. 8: Χαρακτηριστικά υφής για τις τρεις εικόνες οριζόντιου ημικυκλίου με απότομη και σταδιακή μεταβολή φωτεινότητας στα όρια του σχήματος I_1 , I_2 και I_3 (εικόνα 3.12), για τις τρεις κατευθύνσεις (οριζόντια, κατακόρυφη και διαγώνια), κλίμακα $r=8$ και επίπεδα κβάντισης $b=21$	67
Πίνακας 3. 9: Χαρακτηριστικά υφής για τις τρεις εικόνες κατακόρυφου ημικυκλίου με απότομη και σταδιακή μεταβολή φωτεινότητας στα όρια του σχήματος I_1 , I_2 και I_3 (εικόνα 3.13), για τις τρεις κατευθύνσεις (οριζόντια, κατακόρυφη και διαγώνια), κλίμακα $r=8$ και επίπεδα κβάντισης $b=21$	69
Πίνακας 3. 10: Χαρακτηριστικά υφής για τις τρεις εικόνες οριζόντιας γραμμής με ημικύκλιο με απότομη και σταδιακή μεταβολή φωτεινότητας στα όρια του σχήματος I_1 , I_2 και I_3 (εικόνα 3.14), για τις τρεις κατευθύνσεις (οριζόντια, κατακόρυφη και διαγώνια), κλίμακα $r=8$ και επίπεδα κβάντισης $b=21$	71

Πίνακας 3. 11: Χαρακτηριστικά υφής για τις τρεις εικόνες κατακόρυφης γραμμής με ημικύκλιο με απότομη και σταδιακή μεταβολή φωτεινότητας στα όρια του σχήματος I ₁ , I ₂ και I ₃ (εικόνα 3.15), για τις τρεις κατευθύνσεις (οριζόντια, κατακόρυφη και διαγώνια), κλίμακα r=8 και επίπεδα κβάντισης b=21.....	73
Πίνακας 3. 12: Μέσες τιμές ± τυπικές αποκλίσεις χαρακτηριστικών υφής για τις οκτώ συνθετικές εικόνες διαφορετικού σχήματος ανά είδος ορίου (I ₁ , I ₂ και I ₃). Η έντονη γραφή (bold) δείχνει στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των δύο κατηγοριών. Το μέγεθος του δείγματος κάθε κατηγορίας (I ₁ , I ₂ και I ₃) είναι ίσο με το πλήθος διαφορετικών ειδών συνθετικών εικόνων (n=8). Οι μετρήσεις αφορούν τον οριζόντιο προσανατολισμό ανάλυσης.	75
Πίνακας 3. 13: Μέσες τιμές ± τυπικές αποκλίσεις χαρακτηριστικών υφής για τις οκτώ συνθετικές εικόνες διαφορετικού σχήματος ανά είδος ορίου (I ₁ , I ₂ και I ₃). Η έντονη γραφή (bold) δείχνει στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των δύο κατηγοριών. Το μέγεθος του δείγματος κάθε κατηγορίας (I ₁ , I ₂ και I ₃) είναι ίσο με το πλήθος διαφορετικών ειδών συνθετικών εικόνων (n=8). Οι μετρήσεις αφορούν τον κατακόρυφο προσανατολισμό ανάλυσης.	75
Πίνακας 3. 14: Μέσες τιμές ± τυπικές αποκλίσεις χαρακτηριστικών υφής για τις οκτώ συνθετικές εικόνες διαφορετικού σχήματος ανά είδος ορίου (I ₁ , I ₂ και I ₃). Η έντονη γραφή (bold) δείχνει στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των δύο κατηγοριών. Το μέγεθος του δείγματος κάθε κατηγορίας (I ₁ , I ₂ και I ₃) είναι ίσο με το πλήθος διαφορετικών ειδών συνθετικών εικόνων (n=8). Οι μετρήσεις αφορούν τον διαγώνιο προσανατολισμό ανάλυσης.....	76
Πίνακας 3. 15: Χαρακτηριστικά υφής για την εικόνα I ₁ (απότομη μετάβαση στο όριο – εικόνα I ₁ των εικόνων 3.9-3.16) των διαφορετικών ειδών συνθετικών εικόνων. Μέγεθος παραθύρου r=8. Επίπεδα κβάντισης b=21. Οριζόντιος προσανατολισμός ανάλυσης.	77
Πίνακας 3. 16: Χαρακτηριστικά υφής για την εικόνα I ₁ (απότομη μετάβαση στο όριο – εικόνα I ₁ των εικόνων 3.9-3.16) των διαφορετικών ειδών συνθετικών εικόνων. Μέγεθος παραθύρου r=8. Επίπεδα κβάντισης b=21. Κατακόρυφος προσανατολισμός ανάλυσης.	77
Πίνακας 3. 17: Χαρακτηριστικά υφής για την εικόνα I ₁ (απότομη μετάβαση στο όριο – εικόνα I ₁ των εικόνων 3.9-3.16) των διαφορετικών ειδών συνθετικών εικόνων. Μέγεθος παραθύρου r=8. Επίπεδα κβάντισης b=21. Διαγώνιος προσανατολισμός ανάλυσης.	78
Πίνακας 3. 18: Άθροισμα των χαρακτηριστικών υφής των τριών κατευθύνσεων ανάλυσης (οριζόντιας, κατακόρυφης και διαγώνιας) για την εικόνα I ₁ (απότομη μετάβαση στο όριο – εικόνα I ₁ των εικόνων 3.9-3.16) των συνθετικών εικόνων διαφορετικού σχήματος. Μέγεθος παραθύρου r=8. Επίπεδα κβάντισης b=21.....	79
Πίνακας 3. 19: Μέσες τιμές ± τυπικές αποκλίσεις χαρακτηριστικών υφής για τις αρχικές εικόνες (original), τις εικόνες με φίλτρο εξισορρόπησης ιστογράμματος (histogram equalization - hist), τις εικόνες με φίλτρο Gamma (γ ₁ =0.5 – G ₁) και τις εικόνες με φίλτρο Gamma (γ ₂ =1.5 – G ₂). Όλες οι p τιμές είναι αρκετά μεγαλύτερες της τιμής 0.05 (p>0.05), που σημαίνει ότι οι τιμές μεταξύ των εικόνων με φίλτρο και	

χωρίς, δε διαφέρουν στατιστικά σημαντικά. Μέγεθος παραθύρου $r=8$. Επίπεδα κβάντισης $b=21$. Πλήθος εικόνων $n=89$. Οριζόντιος προσανατολισμός ανάλυσης. ...82

Πίνακας 3. 20: Μέσες τιμές $\pm$ τυπικές αποκλίσεις χαρακτηριστικών υφής για τις αρχικές εικόνες (original), τις εικόνες με φίλτρο εξισορρόπησης ιστογράμματος (histogram equalization - hist), τις εικόνες με φίλτρο Gamma ($\gamma_1=0.5 - G_1$) και τις εικόνες με φίλτρο Gamma ($\gamma_2=1.5 - G_2$). Όλες οι p τιμές είναι αρκετά μεγαλύτερες της τιμής 0.05 ($p>0.05$), που σημαίνει ότι οι τιμές μεταξύ των εικόνων με φίλτρο και χωρίς, δε διαφέρουν στατιστικά σημαντικά. Μέγεθος παραθύρου $r=8$. Επίπεδα κβάντισης $b=21$. Πλήθος εικόνων $n=89$. Κατακόρυφος προσανατολισμός ανάλυσης.82

Πίνακας 3. 21: Μέσες τιμές $\pm$ τυπικές αποκλίσεις χαρακτηριστικών υφής για τις αρχικές εικόνες (original), τις εικόνες με φίλτρο εξισορρόπησης ιστογράμματος (histogram equalization - hist), τις εικόνες με φίλτρο Gamma ($\gamma_1=0.5 - G_1$) και τις εικόνες με φίλτρο Gamma ($\gamma_2=1.5 - G_2$). Όλες οι p τιμές είναι αρκετά μεγαλύτερες της τιμής 0.05 ($p>0.05$), που σημαίνει ότι οι τιμές μεταξύ των εικόνων με φίλτρο και χωρίς, δε διαφέρουν στατιστικά σημαντικά. Μέγεθος παραθύρου $r=8$. Επίπεδα κβάντισης $b=21$. Πλήθος εικόνων $n=89$. Διαγώνιος προσανατολισμός ανάλυσης. ...83

Πίνακας 3. 22: Μέσες τιμές $\pm$ τυπικές αποκλίσεις χαρακτηριστικών υφής για μέγεθος παραθύρου (κλίμακα) $r=4, 8, 16$ ή 32 . Η έντονη γραφή (bold) δείχνει στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των δύο αναλύσεων με διαφορετική τιμή r . Επίπεδα κβάντισης $b=21$. Οριζόντιος προσανατολισμός ανάλυσης. Πλήθος εικόνων ανά κλίμακα $n=89$85

Πίνακας 3. 23: Μέσες τιμές $\pm$ τυπικές αποκλίσεις χαρακτηριστικών υφής για μέγεθος παραθύρου (κλίμακα) $r=4, 8, 16$ ή 32 . Η έντονη γραφή (bold) δείχνει στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των δύο αναλύσεων με διαφορετική τιμή r . Επίπεδα κβάντισης $b=21$. Κατακόρυφος προσανατολισμός ανάλυσης. Πλήθος εικόνων ανά κλίμακα $n=89$86

Πίνακας 3. 24: Μέσες τιμές $\pm$ τυπικές αποκλίσεις χαρακτηριστικών υφής για μέγεθος παραθύρου (κλίμακα) $r=4, 8, 16$ ή 32 . Η έντονη γραφή (bold) δείχνει στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των δύο αναλύσεων με διαφορετική τιμή r . Επίπεδα κβάντισης $b=21$. Διαγώνιος προσανατολισμός ανάλυσης. Πλήθος εικόνων ανά κλίμακα $n=89$86

Πίνακας 3. 25: Μέσες τιμές $\pm$ τυπικές αποκλίσεις χαρακτηριστικών υφής για πλήθος επιπέδων κβάντισης $b=15, 21$ ή 26 . Η έντονη γραφή (bold) δείχνει στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των δύο αναλύσεων με διαφορετική τιμή b . Μέγεθος παραθύρου $r=8$. Οριζόντιος προσανατολισμός ανάλυσης. Πλήθος εικόνων για κάθε αριθμό επιπέδων κβάντισης $n=94$87

Πίνακας 3. 26: Μέσες τιμές $\pm$ τυπικές αποκλίσεις χαρακτηριστικών υφής για πλήθος επιπέδων κβάντισης $b=15, 21$ ή 26 . Η έντονη γραφή (bold) δείχνει στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των δύο αναλύσεων με διαφορετική τιμή b . Μέγεθος παραθύρου $r=8$. Κατακόρυφος προσανατολισμός ανάλυσης. Πλήθος εικόνων για κάθε αριθμό επιπέδων κβάντισης $n=94$87

Πίνακας 3. 27: Μέσες τιμές $\pm$ τυπικές αποκλίσεις χαρακτηριστικών υφής για πλήθος επιπέδων κβάντισης $b=15, 21$ ή 26 . Η έντονη γραφή (bold) δείχνει στατιστικά

σημαντική διαφορά μεταξύ των δύο αναλύσεων με διαφορετική τιμή b. Μέγεθος παραθύρου r=8. Διαγώνιος προσανατολισμός ανάλυσης. Πλήθος εικόνων για κάθε αριθμό επιπέδων κβάντισης n=94.	88
Πίνακας 3. 28: Μέσες τιμές ± τυπικές αποκλίσεις χαρακτηριστικών υφής για τις περιπτώσεις χαμηλής (<70%) και υψηλής (≥70%) στένωσης με πλήθος εικόνων n _{χαμηλής} =26 και n _{υψηλής} =62 εικόνες αντίστοιχα. Η έντονη γραφή (bold) δείχνει στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των κατηγοριών. Μέγεθος παραθύρου r=8 και επίπεδα κβάντισης b=21. Οριζόντιος προσανατολισμός ανάλυσης.	90
Πίνακας 3. 29: Μέσες τιμές ± τυπικές αποκλίσεις χαρακτηριστικών υφής για τις περιπτώσεις χαμηλής (<70%) και υψηλής (≥70%) στένωσης με πλήθος εικόνων n _{χαμηλής} =26 και n _{υψηλής} =62 εικόνες αντίστοιχα. Η έντονη γραφή (bold) δείχνει στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των κατηγοριών. Μέγεθος παραθύρου r=8 και επίπεδα κβάντισης b=21. Κατακόρυφος προσανατολισμός ανάλυσης.	90
Πίνακας 3. 30: Μέσες τιμές ± τυπικές αποκλίσεις χαρακτηριστικών υφής για τις περιπτώσεις χαμηλής (<70%) και υψηλής (≥70%) στένωσης με πλήθος εικόνων n _{χαμηλής} =26 και n _{υψηλής} =62 εικόνες αντίστοιχα. Η έντονη γραφή (bold) δείχνει στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των κατηγοριών. Μέγεθος παραθύρου r=8 και επίπεδα κβάντισης b=21. Διαγώνιος προσανατολισμός ανάλυσης.	91
Πίνακας 3. 31: Μέσες τιμές ± τυπικές αποκλίσεις χαρακτηριστικών υφής για την πρώτη και τη δεύτερη πλάκα κάθε καρωτίδας. Η έντονη γραφή (bold) δείχνει στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των κατηγοριών. Μέγεθος παραθύρου r=8 και επίπεδα κβάντισης b=21. Μέγεθος δείγματος των πλακών 1 και 2, n=54. Οριζόντιος προσανατολισμός ανάλυσης.	93
Πίνακας 3. 32: Μέσες τιμές ± τυπικές αποκλίσεις χαρακτηριστικών υφής για την πρώτη και τη δεύτερη πλάκα κάθε καρωτίδας. Η έντονη γραφή (bold) δείχνει στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των κατηγοριών. Μέγεθος παραθύρου r=8 και επίπεδα κβάντισης b=21. Μέγεθος δείγματος των πλακών 1 και 2, n=54. Κατακόρυφος προσανατολισμός ανάλυσης.	93
Πίνακας 3. 33: Μέσες τιμές ± τυπικές αποκλίσεις χαρακτηριστικών υφής για την πρώτη και τη δεύτερη πλάκα κάθε καρωτίδας. Η έντονη γραφή (bold) δείχνει στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των κατηγοριών. Μέγεθος παραθύρου r=8 και επίπεδα κβάντισης b=21. Μέγεθος δείγματος των πλακών 1 και 2, n=54. Διαγώνιος προσανατολισμός ανάλυσης.	93

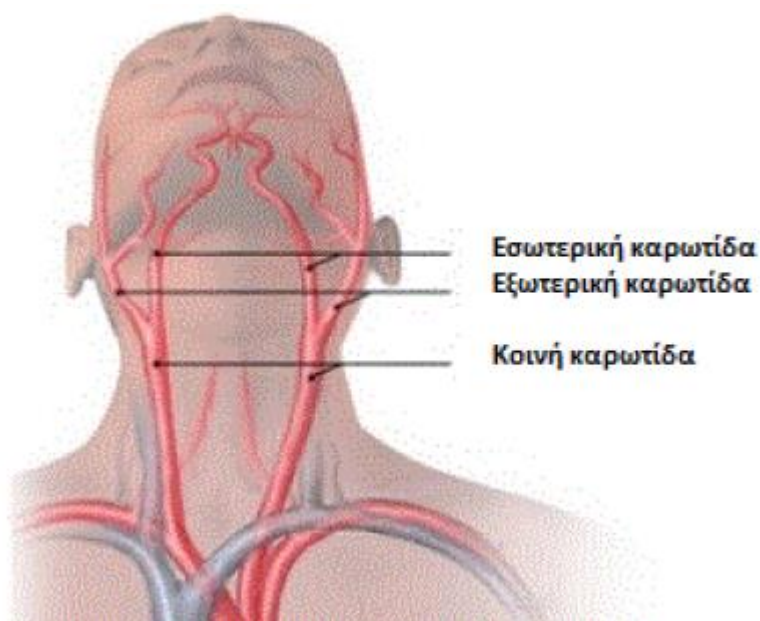
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο εισαγωγικό κεφάλαιο παρουσιάζεται η ανατομία της καρωτίδας, καθώς και η αθηρωματική νόσος, μία από τις σοβαρότερες καρδιαγγειακές παθήσεις. Περιγράφεται η υπερηχογραφία ως μέθοδος απεικόνισης του αρτηριακού τοιχώματος, και ο τρόπος με τον οποίο συμβάλλει στη διάγνωση της νόσου. Ακολουθεί βιβλιογραφική επισκόπηση των μετασχηματισμών που έχουν χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση υφής εικόνων υπερήχου καρωτίδας, καθώς και της χρήσης του μετασχηματισμού ranklet σε εικόνες υπερήχου μαστού και μαστογραφίες. Τέλος, αναφέρεται ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

1.1 Δομή και λειτουργία της καρωτίδας

1.1.1 Ανατομικά χαρακτηριστικά

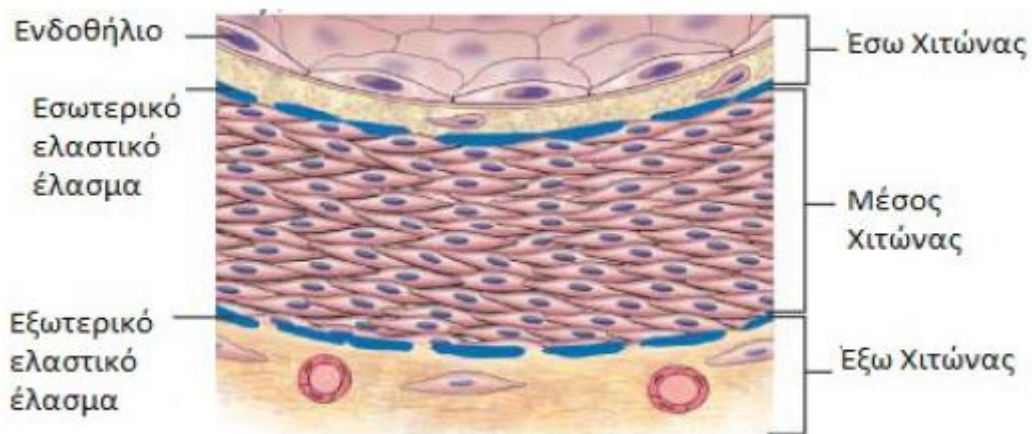
Οι κοινές καρωτίδες (αριστερή και δεξιά κοινή καρωτίδα) είναι δύο αρτηρίες που τροφοδοτούν με αίμα την κεφαλή και το λαιμό. Βρίσκονται μέσα στους ιστούς του λαιμού και μπορούν να ψηλαφιστούν αν πιέσει κανείς ελαφρά κατά μήκος κάθε πλευράς της τραχείας μέχρι να αισθανθεί παλμό. Κάθε μία από αυτές διακλαδίζεται στην έσω και την έξω καρωτίδα (Εικόνα 1.1). Οι εσωτερικές καρωτίδες μεταφέρουν αίμα προς το εσωτερικό του κρανίου, δηλαδή στον εγκέφαλο, αλλά και στα μάτια, το μέτωπο και τη μύτη. Οι έξω καρωτίδες διακλαδίζονται σε πολλές περιοχές εξωτερικά του κρανίου, όπως στο λαιμό, το λάρυγγα, το φάρυγγα και το πρόσωπο [1]. Το θωρακικό της μέρος πηγάζει από την αορτή. Η δεξιά καρωτίδα αποτελεί διακλάδωση της βραχιονοκεφαλικής αρτηρίας. Ξεκινάει από την περιοχή του αυχένα, ενώ δεν έχει καθόλου θωρακικό μέρος. Στο αυχενικό τμήμα τους, οι δύο κοινές καρωτίδες είναι όμοιες, αφού διασχίζουν το λαιμό προς τα πάνω έως το σημείο διαχωρισμού τους (bifurcation point) σε εσωτερική και εξωτερική [2].



Εικόνα 1. 1: Σχηματική απεικόνιση της ανατομίας της καρωτίδας

Η κοινή καρωτίδα ανήκει στην κατηγορία των ελαστικών αρτηριών. Το τοίχωμα της καρωτίδας, όπως και το τοίχωμα κάθε αρτηρίας, αποτελείται από τα εξής τρία ομόκεντρα στρώματα (χιτώνες) [3] [4], τα οποία απεικονίζονται στην εικόνα 1.2:

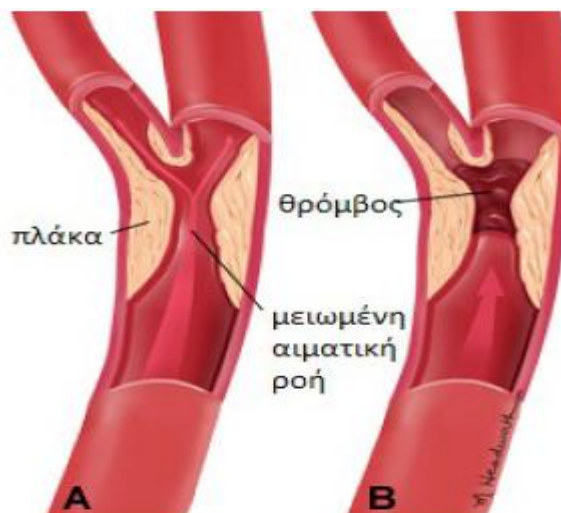
- i. Έσω Χιτώνας (Intima)
- ii. Μέσος Χιτώνας (Media)
- iii. Έξω Χιτώνας (Adventitia)



Εικόνα 1. 2: Τα τρία στρώματα του τοιχώματος της αρτηρίας: το εσωτερικό (intima), το μέσο (media), και το εξωτερικό (adventitia).

1.1.2 Αθηροσκλήρωση και καρδιαγγειακές παθήσεις

Η αθηρωμάτωση αποτελεί μια χρόνια πάθηση που οφείλεται στην εμφάνιση αλλοιώσεων στο εσωτερικό των αρτηριών. Αρχικά οι αλλοιώσεις εμφανίζονται στον έσω χιτώνα με τη συσσώρευση λιπιδίων πάνω στο αρτηριακό τοίχωμα. Με την πάροδο του χρόνου, παρατηρείται συσσώρευση λιπιδίων, μακροφάγων και ασβεστίου, δημιουργώντας τη λεγόμενη αθηρωματική πλάκα. Οι αλλοιώσεις σταδιακά επεκτείνονται στα υπόλοιπα στρώματα του αρτηριακού τοιχώματος προκαλώντας στένωση της καρωτίδας με αποτέλεσμα την εμφάνιση διαταραχών στην κυκλοφορία του αίματος και στην τροφοδότηση του εγκεφάλου με αίμα (Εικόνα 1.3).



Εικόνα 1. 3: Η αθηρωματική πλάκα στην καρωτίδα

Τα τμήματα της αρτηρίας στα οποία είναι περισσότερο πιθανόν να αναπτυχθεί αθηρωματική πλάκα, παρουσιάζουν ανομοιομορφία ως προς τις

μηχανικές καταπονήσεις που δέχονται, τόσο ως προς την ένταση, όσο και ως προς τη διεύθυνση [5]. Σημαντικό ρόλο στην εμφάνιση πλάκας έχει, επίσης, η διατμητική τάση που προκαλεί η αιματική ροή [3]. Συνεπώς, στο σημείο διαχωρισμού ο κίνδυνος δημιουργίας πλάκας είναι ιδιαίτερα αυξημένος λόγω της γεωμετρίας του.

Στην περίπτωση που η αθηρωματική πλάκα υποστεί ρήξη, παρουσιάζονται θρόμβοι στην κυκλοφορία του αίματος, με σοβαρή συνέπεια την ανεπαρκή τροφοδότηση του εγκεφάλου με αίμα, προκαλώντας ισχαιμικό επεισόδιο, εγκεφαλικό επεισόδιο ή και προσωρινή απώλεια όρασης. Μεγαλύτερη πιθανότητα ρήξης, έχουν οι ασταθείς ή ευάλωτες πλάκες (unstable or vulnerable), που αποτελούνται από υψηλά ποσοστά λιπιδίων. Αντίθετα, οι πλάκες με υψηλή συγκέντρωση ασβεστίου είναι πιο σταθερές (stable) με χαμηλή πιθανότητα ρήξης [6] [7].

Η στένωση της αρτηρίας επιδεινώνεται με την πάροδο του χρόνου και έχει παρατηρηθεί ότι το 6.9% των ηλικιωμένων ατόμων (>65 χρονών) εμφανίζει αθηρωμάτωση στην καρωτίδα [8]. Η στένωση υποβοηθά τη συγκόλληση των ερυθρών αιμοσφαιρίων και τη δημιουργία μικρών εμβολών, τα οποία με τη ροή του αίματος εισχωρούν σε μικρότερες αρτηρίες με κίνδυνο να τις φράξουν και να διακοπεί η παροχή αίματος στον εγκέφαλο. Όταν διακοπεί η παροχή του αίματος σε μία περιοχή του εγκεφάλου, τα κύτταρα δεν οξυγονώνονται φυσιολογικά και πεθαίνουν. Η βλάβη του εγκεφάλου που ακολουθεί ονομάζεται εγκεφαλικό επεισόδιο. Ένα εγκεφαλικό επεισόδιο μπορεί να είναι ελαφρύ ή σοβαρό, με προσωρινά ή μόνιμα αποτελέσματα. Η σοβαρότητα ενός εγκεφαλικού επεισοδίου εξαρτάται από την έκταση και την περιοχή της καταστροφής των νευρικών κυττάρων. Διαφορετικές περιοχές του εγκεφάλου ελέγχουν διαφορετικές λειτουργίες κι έτσι τα συμπτώματα εξαρτώνται από την περιοχή η οποία θα υποστεί τη βλάβη. Δηλαδή, ακόμα και ένα ελαφρύ εγκεφαλικό, μπορεί να είναι καταστροφικό, εάν επηρεάσει ένα κρίσιμο σημείο του εγκεφάλου.

Στις περισσότερες βιομηχανοποιημένες χώρες, τα καρδιαγγειακά νοσήματα (Cardiovascular diseases) αποτελούν την πρώτη αιτία θανάτου που μπορεί να προληφθεί [9]. Στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής ένας στους τρεις θανάτους προέρχεται από καρδιαγγειακές ασθένειες, ενώ στην Ευρώπη το ποσοστό αυτό αγγίζει το 50% (42% στους άνδρες και 52% στις γυναίκες) [10] [11]. Οι κυριότερες μορφές των καρδιαγγειακών νοσημάτων είναι η στεφανιαία νόσος και το εγκεφαλικό επεισόδιο, ενώ ότι το μεγαλύτερο ποσοστό ισχαιμικών και εγκεφαλικών επεισοδίων προκαλούνται από αθηρωματικές αλλοιώσεις (πλάκες) στην καρωτιδική αρτηρία.

Η αθηρωμάτωση στην καρωτίδα αντιμετωπίζεται είτε επεμβατικά με καρωτιδική ενδαρτηρεκτομή (endarterectomy), μία χειρουργική επέμβαση κατά την οποία αφαιρείται η αθηρωματική πλάκα από την αρτηρία, ή με τοποθέτηση ενδοπρόθεσης (stent), μία μη επεμβατική μέθοδο αγγειοπλαστικής, είτε με

συντηρητική θεραπεία μέσω φαρμακευτικής αγωγής και κατάλληλου διαιτολογίου [12]. Το κόστος των επεμβατικών μεθόδων αποκατάστασης είναι σημαντικό. Με γνώμονα ότι δεν προκαλούν εγκεφαλικά επεισόδια όλες οι αθηρωματικές πλάκες στην καρωτίδα, είναι σημαντική η προσεκτική επιλογή των ασθενών που υποβάλλονται σε χειρουργική επέμβαση, καθώς η ενδαρτηρεκτομή είναι μια αρκετά επικίνδυνη επέμβαση.

Το κύριο κριτήριο καθορισμού της θεραπείας που θα εφαρμοστεί, είναι το ποσοστό στένωσης της αρτηρίας σε συνδυασμό με αγγειοεγκεφαλικές διαταραχές που αναφέρονται από τον ασθενή ή διαγιγνώσκονται μέσω Αξονικής ή Μαγνητικής Τομογραφίας. Ωστόσο, υπάρχουν ενδείξεις ότι αυτή η κλινική πρακτική δεν εξασφαλίζει έγκυρη αναγνώριση των αλλοιώσεων, καθώς δε μπορούν να εντοπισθούν από τον ασθενή όλα τα συμπτώματα, ενώ αξονική ή μαγνητική τομογραφία χρησιμοποιείται μόνο σε ένα μικρό ποσοστό ασθενών με αυξημένη πιθανότητα εμφάνισης εγκεφαλικού επεισοδίου [1]. Η επέμβαση προτείνεται σε συμπτωματικούς ασθενείς με βαθμό στένωσης μεγαλύτερο του 50% και σε ασυμπτωματικούς ασθενείς με βαθμό στένωσης μεγαλύτερο του 70%. Οι υπόλοιποι ασθενείς ακολουθούν συντηρητική (φαρμακευτική) αγωγή.

Η ανάγκη για προσδιορισμό επιπρόσθετων παραμέτρων για ορθότερη διάγνωση και επιλογή των ασθενών προς επέμβαση καθώς και για μείωση του κόστους, διεύρυνε τη χρήση των υπερήχων. Η απεικόνιση των καρωτίδων μέσω υπερήχων χρησιμοποιείται ευρέως στη διάγνωση της αθηρωμάτωσης και στοχεύει στην περιγραφή της μορφολογίας, της υφής της πλάκας, καθώς και της ελαστικότητας του αγγείου. 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 ηχογένεια (echogenity) της αθηρωματικής πλάκας [13].

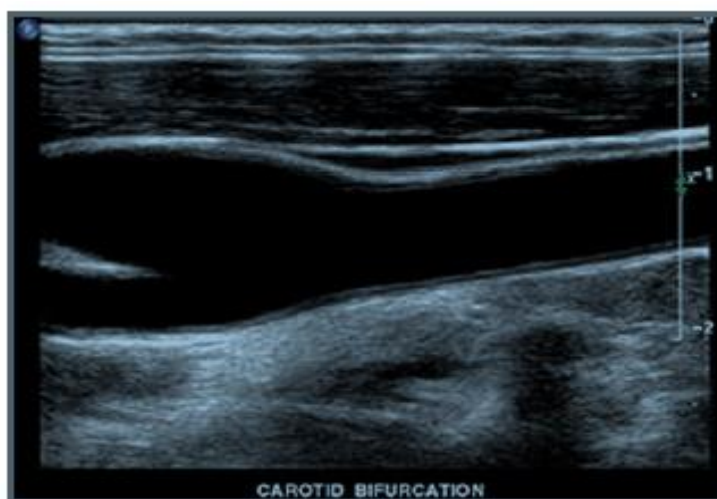
1.2 Απεικόνιση καρωτίδας

Το υπερηχογράφημα είναι μια απεικονιστική τεχνική που βασίζεται σε ηχητικά κύματα υψηλής συχνότητας. Ένας πιεζοηλεκτρικός μετατροπέας παράγει ηχητικά κύματα, τα οποία διαδίδονται στο ανθρώπινο σώμα. Τα κύματα απορροφώνται από τους ιστούς, αλλά ένα μέρος τους ανακλάται όταν προσπέσει στη διαχωριστική επιφάνεια δύο μέσων με διαφορετική ακουστική εμπίεση. Τα ανακλώμενα κύματα διεγείρουν το μετατροπέα, ο οποίος τα μετατρέπει σε ηλεκτρικά σήματα. Οι συνηθέστεροι τρόποι παρουσίασης των ληφθέντων σημάτων είναι τρεις: Η Α-μέθοδος (amplitude mode), η Μ-μέθοδος (motion mode) και η Β-μέθοδος (brightness mode).

Η μέθοδος που χρησιμοποιείται στη διάγνωση της αθηροσκλήρωσης στην καρωτίδα, συνεπώς και στην παρούσα εργασία, είναι η Β-mode. Με αυτή τη μέθοδο, η ένταση μιας ηχούς αντιστοιχίζεται στην τιμή φωτεινότητας (σε κλίμακα του γκρι)

ενός εικονοστοιχείου σε κατάλληλη θέση, ώστε να απεικονίζεται μια τομή του ιστού. Η τομή της ίδιας περιοχής καταγράφεται σε διαδοχικά στιγμιότυπα, ώστε τελικά να προκύπτει μια ακολουθία βίντεο [14]. Στην Εικόνα 1.4 φαίνεται ένα στιγμιότυπο της απεικόνισης της καρωτίδας ατόμου χωρίς αθηρωματική πλάκα με τη Β-μέθοδο.

Η χρήση υπερήχου για διαγνωστικούς σκοπούς παρουσιάζει πληθώρα πλεονεκτημάτων. Αρχικά, τα αντίστοιχα απεικονιστικά μηχανήματα έχουν χαμηλό κόστος, δεν απαιτούν ειδική προετοιμασία του χώρου στον οποίο θα εγκατασταθούν και μπορούν εύκολα να μεταφερθούν σε άλλο χώρο. Επιπλέον, η χρήση τους χαρακτηρίζεται ακίνδυνη καθώς δεν έχει αποδειχθεί τα κύτταρα ύστερα από ακτινοβολήση με υπερήχους να παρουσιάζουν βλάβη ή διαφοροποίηση. Τέλος, η διαδικασία της σάρωσης είναι γρήγορη και ανώδυνη για τον ασθενή ενώ ταυτόχρονα οι παρεχόμενες πληροφορίες εμφανίζουν υψηλή διαγνωστική αξία.



Εικόνα 1. 4: Το σημείο διαχωρισμού της υγιούς καρωτίδας σε εσωτερική και εξωτερική, όπως απεικονίζεται με συσκευή υπερήχων Β-σάρωσης [15]

Το ερευνητικό ενδιαφέρον στρέφεται προς την κατεύθυνση της ανάπτυξης δεικτών βασιζόμενων σε χαρακτηριστικά ανάλυσης εικόνας (markers) και της ενσωμάτωσής τους σε συστήματα διάγνωσης με τη βοήθεια υπολογιστή (Computer-aided diagnosis – CAD), τα οποία συμβάλλουν στην εγκυρότερη διάγνωση από ειδικούς αγγειολόγους. Σημαντικοί δείκτες για την κλινική αξιολόγηση του κινδύνου εμφάνισης εγκεφαλικού επεισοδίου αποτελούν το πάχος του ενδιάμεσου στρώματος, η οριοθέτηση της αθηρωματικής πλάκας, η διάμετρος, καθώς και το ποσοστό της στένωσης της καρωτιδικής αρτηρίας [16]. Η χρήση οικονομικών τεχνικών απεικόνισης και ανάλυσης είναι ένας από τους βασικούς στόχους των ερευνητών, συνεπώς παρουσιάζει ιδιαίτερο επιστημονικό ενδιαφέρον η αναβάθμιση του ρόλου της ανάλυσης εικόνων υπερήχου. Ένας επιπλέον λόγος για τον οποίο συγκεντρώνεται το ενδιαφέρον στην ένταξη της ανάλυσης εικόνων υπερήχων σε συστήματα υποβοηθούμενης από υπολογιστή διάγνωσης είναι η δυνατότητα προσαρμογής και χρήσης τους στην κλινική πράξη, καθώς οι εικόνες υπερήχου είναι η ευρέως

χρησιμοποιούμενη τεχνική απεικόνισης για τον έλεγχο, τη διάγνωση και την παρακολούθηση της αθηρωματικής πλάκας [8].

1.3 Ανάλυση υφής εικόνων καρωτίδας με χρήση μετασχηματισμών

1.3.1 Χαρακτηριστικά ανάλυσης υφής

Αφού απομονωθεί η περιοχή της πλάκας (είτε με αυτόματη κατάτμηση είτε από ειδικευμένο γιατρό), είναι δυνατή η ανάλυση της υφής της, δηλαδή η εξαγωγή στατιστικών ιδιοτήτων που σχετίζονται με την κατανομή φωτεινότητας της πλάκας. Ένα συχνά χρησιμοποιούμενο μέγεθος υφής, και ένα από τα πρώτα που βρέθηκε ότι διέφερε μεταξύ συμπτωματικών και ασυμπτωματικών πλακών, είναι η διάμεσος της φωτεινότητας των εικονοστοιχείων (pixels) της πλάκας (Gray-Scale Median-GSM). Χαμηλή GSM, δηλαδή πλάκα με σχετικά μικρή φωτεινότητα, σημαίνει μεγαλύτερο κίνδυνο εμφάνισης συμπτωμάτων [17]. Αυτό συμβαίνει επειδή οι ασταθείς πλάκες, λόγω της χημικής τους σύστασης, ανακλούν σε μικρό βαθμό τις ακτίνες υπερήχων (echolucet), με αποτέλεσμα να εμφανίζονται πιο «σκοτεινές» από τις σταθερές, οι οποίες τις ανακλούν (echogenic) και απεικονίζονται πιο «λευκές» [18]. Όπως προαναφέρθηκε, οι ασταθείς πλάκες αποτελούνται κυρίως από λιπίδια, ενώ οι σταθερές περιέχουν μεγάλη ποσότητα ασβεστίου. Αυτή η διαφορά στη σύσταση έχει ως συνέπεια οι δύο τύποι αθηρωματικής πλάκας να έχουν διαφορετική ακουστική διαπερατότητα. Η τιμή της ακουστικής εμπεδήσης των ασταθών πλακών είναι πιο κοντά στις ακουστικές εμπεδήσεις των γειτονικών μέσων διάδοσης με αποτέλεσμα να ευνοείται η απορρόφηση του κύματος. Αντίθετα, οι σταθερές πλάκες έχουν διαφορετική ακουστική εμπεδήση, γεγονός που οδηγεί στην ανάκλαση μεγάλου μέρους της εκπεμπόμενης δέσμης.

Η εξαγωγή πιο σύνθετων χαρακτηριστικών υφής, όπως στατιστικά πρώτης, δεύτερης ή και υψηλότερης τάξης, προσφέρουν επιπλέον πληροφορίες για τη δομή και την επικινδυνότητα της πλάκας [19]. Ως στατιστικές ιδιότητες πρώτης τάξης (First Order Statistics -- FOS) ορίζονται στατιστικές μετρήσεις που εξαρτώνται από τις τιμές μεμονωμένων εικονοστοιχείων και όχι από τη σχετική θέση των εικονοστοιχείων στο επίπεδο της εικόνας, όπως για παράδειγμα η μέση τιμή, η διάμεσος, χαρακτηριστικά που προκύπτουν από ανάλυση του ιστογράμματος φωτεινότητας της εικόνας. Από το ιστόγραμμα μπορεί να εξαχθεί πλήθος μετρήσεων, όπως το ποσοστό λευκών εικονοστοιχείων (percentage white). Χαρακτηρίζοντας ως λευκά τα εικονοστοιχεία με φωτεινότητα μεγαλύτερη από κάποιο κατώφλι, υπολογίζεται το ποσοστό των λευκών εικονοστοιχείων επί του συνόλου των εικονοστοιχείων της πλάκας [20]. Οι στατιστικές ιδιότητες δεύτερης τάξης (Second Order Statistics - SOS) εξετάζουν εξαρτήσεις μεταξύ ζευγών εικονοστοιχείων και είναι ενδεικτικές της κατανομής της φωτεινότητας στην εικόνα. Παράδειγμα ιδιοτήτων δεύτερης τάξης είναι η μήτρα συνεμφάνισης φωτεινότητας (Gray-Level Co-occurrence Matrix - GLCM), η οποία εκφράζει την πιθανότητα ένα εικονοστοιχείο με φωτεινότητα I1 να απέχει ορισμένη απόσταση από ένα εικονοστοιχείο με φωτεινότητα I2 [21]. Ιδιότητες υψηλότερης

τάξης (Higher Order Statistics - HOS) αφορούν συνδυασμούς περισσότερων από δύο εικονοστοιχεία, όπως, για παράδειγμα, οι μήτρες μήκους διαδρομής φωτεινότητας (Gray-Level Run-Length Matrices) [22], οι οποίες αποτελούν ένδειξη της συχνότητας ύπαρξης συνεχόμενων εικονοστοιχείων συγκεκριμένης φωτεινότητας σε κάποια διεύθυνση.

Επιπλέον, έχουν χρησιμοποιηθεί αρκετές φορές οι μετρήσεις ενέργειας του Laws [23], δηλαδή μετρήσεις ενέργειας σε εικόνες που προέκυψαν από το γραμμικό φιλτράρισμα της εικόνας της πλάκας με συγκεκριμένες μάσκες [24]. Ένα ακόμη χρήσιμο χαρακτηριστικό υφής είναι η κλασματική διάσταση (fractal dimension) της εικόνας, η οποία υπολογίζεται με διάφορους τρόπους [25]. Για ένα σήμα δύο διαστάσεων, όπως μια εικόνα, η διάσταση fractal είναι ένας ρητός αριθμός με δυνατές τιμές στο διάστημα $[2,3)$ και αποτελεί ένδειξη της “τραχύτητάς” της. Όσο πιο τραχεία φαίνεται η επιφάνεια της εικόνας, τόσο μεγαλύτερη είναι η κλασματική διάστασή της [26]. Επίσης, χαρακτηριστικά υφής μπορούν να εξαχθούν από μορφολογικά επεξεργασμένες εικόνες. Ως μορφολογική επεξεργασία ορίζεται η εφαρμογή συγκεκριμένων τελεστών συνόλων σε δυαδικές εικόνες (θεωρώντας ότι τα μαύρα εικονοστοιχεία αποτελούν ένα σύνολο και τα λευκά το συμπλήρωμά του) ή γενίκευση τέτοιων τελεστών σε εικόνες της κλίμακας του γκρι. Παραδείγματα τελεστών είναι το «άνοιγμα» (open), το «κλείσιμο» (close), η «διαστολή» (dilation) και η «συστολή» (erosion). Αυτού του τύπου η επεξεργασία εξετάζει μια εικόνα σε πολλές διαφορετικές κλίμακες και μπορεί, επομένως, να ενταχθεί και στο πλαίσιο της πολυ-κλιμακωτής ανάλυσης. Πολυ-κλιμακωτή ανάλυση ή αποσύνθεση, όπως ονομάζεται, μπορεί να γίνει και με άλλους τρόπους, όπως είναι η χρήση πολυ-κλιμακωτών μετασχηματισμών (wavelet [27] ή ridgelet [28]).

1.3.2 Μετασχηματισμοί ανάλυσης υφής καρωτίδας

Τα τελευταία χρόνια έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές μελέτες με στόχο την εξαγωγή χαρακτηριστικών υφής που έχουν διαγνωστική αξία στη διαφοροποίηση μεταξύ συμπτωματικών και ασυμπτωματικών πλακών, όπως με χρήση μετασχηματισμού Fourier, μετασχηματισμού κυματιδίου (wavelet transform) και των φίλτρων Gabor [29]. Οι μέθοδοι που βασίζονται στο μετασχηματισμό Fourier έχουν το μειονέκτημα ότι δε συμπεριλαμβάνουν την πληροφορία της χωρικής θέσης, συνεπώς δεν είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικοί στην εξαγωγή χρήσιμων χαρακτηριστικών.

Η χρήση του μετασχηματισμού κυματιδίου για την ανάλυση υφής των εικόνων έχει σημαντικά πλεονεκτήματα. Δύο από αυτά είναι η δυνατή αναπαράσταση της υφής στο κατάλληλο επίπεδο μεταβάλλοντας τη χωρική ανάλυση και η δυνατότητα επιλογής από μια πληθώρα μητρικών συναρτήσεων με σκοπό τη χρήση του κυματιδίου που χαρακτηρίζει καλύτερη την υφή σε κάθε εφαρμογή.

Επίσης, η χρήση ενός συνόλου από φίλτρα Gabor έχει σημαντικά αποτελέσματα στην ανάλυση υφής μια εικόνας. Επειδή τα φίλτρα αυτά

εφαρμόζονται σε διαφορετικά επίπεδα χωρικής ανάλυσης και σε διαφορετικές κατευθύνσεις υπάρχει καλύτερη χρόνο-χωρική ικανότητα αναπαράστασης υφής [30], και μεγάλη ομοιότητα με τον τρόπο λειτουργίας του ανθρώπινου συστήματος όρασης [31].

Σε πρώτη φάση εξετάστηκαν οι τέσσερις παρακάτω μετασχηματισμοί κυματιδίου:

Διακριτός μετασχηματισμός κυματιδίου (DWT)

Ο διακριτός μετασχηματισμός κυματιδίου βασίζεται στο εσωτερικό γινόμενο ενός σήματος $x[n]$ με μια οικογένεια συναρτήσεων $\varphi_{j,k}(t) = 2^{\frac{j}{2}}\varphi(2^j t - k)$ και $\psi_{j,k}(t) = 2^{\frac{j}{2}}\psi(2^j t - k)$, σχηματίζοντας έτσι ένα ορθοκανονικό σετ διανυσμάτων που περιγράφει απόλυτα το σήμα και επιτρέπει την πολυ-επίπεδη ανάλυση. Οι συντελεστές προσέγγισης, A, και λεπτομέρειας, D, του μετασχηματισμού προκύπτουν μέσω ενός βαθυπερατού και ενός υψιπερατού φίλτρου μισής ζώνης αντίστοιχα.

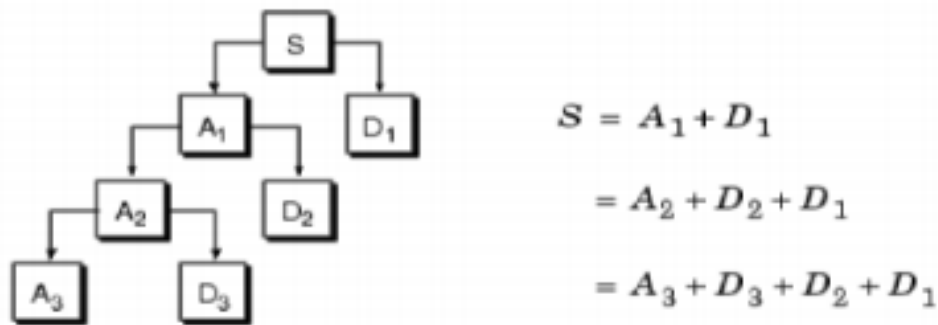
Στην περίπτωση μιας εικόνας, δηλαδή δισδιάστατων σημάτων, εφαρμόζεται DWT δύο διαστάσεων, ένας στις γραμμές της εικόνας και έπειτα, ένας στις στήλες της προκύπτουσας εικόνας. Για κάθε εικόνα προκύπτουν τέσσερις υποεικόνες, μία για κάθε δυνατό συνδυασμό φίλτρων, καθώς σε κάθε εφαρμογή DWT επιλέγεται είτε υψιπερατό είτε βαθυπερατό φίλτρο για τη συνέλιξη. Μετά από κάθε εφαρμογή DWT ακολουθεί υποδειγματοληψία στις στήλες και τις γραμμές αντίστοιχα [32].

Στατικός μετασχηματισμός κυματιδίου (SWT)

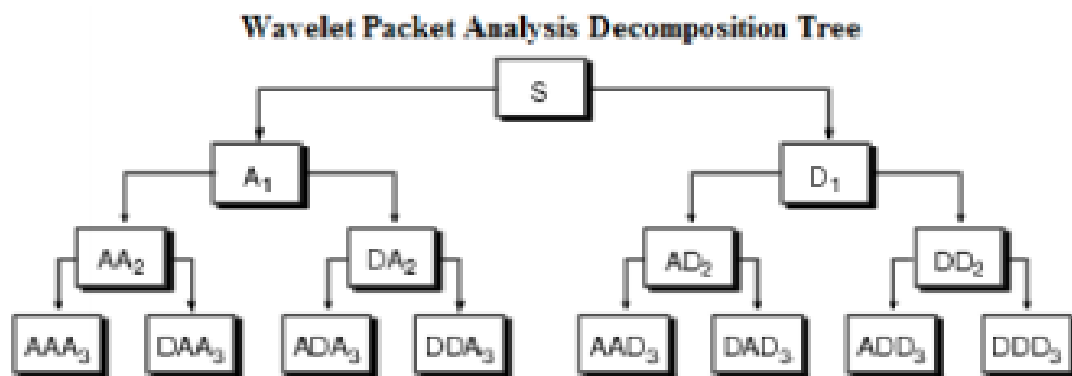
Ο στατικός μετασχηματισμός κυματιδίου αποτελεί μια τροποποιημένη, χρονικά ανεξάρτητη εκδοχή του διακριτού, καθώς στο στατικό δεν εφαρμόζεται υποδειγματοληψία μετά από κάθε εφαρμογή φίλτρου. Ωστόσο, είναι μη ορθογωνικός και πλεονάζων (η είσοδος και η έξοδος έχουν το ίδιο μέγεθος πληροφορίας) μετασχηματισμός με αποτέλεσμα να δίνει καλύτερα αποτελέσματα από το διακριτό, αλλά να έχει υψηλό υπολογιστικό κόστος [32].

Αποσύνθεση κυματιδιακών πακέτων (WPD)

Ο μετασχηματισμός κυματιδιακών πακέτων (wavelet packets decomposition) αποτελεί γενίκευση του δισδιάστατου DWT, με μεγαλύτερο εύρος δυνατοτήτων για την ανάλυση του σήματος. Το σήμα χωρίζεται σε μια συνιστώσα προσέγγισης και μια συνιστώσα λεπτομέρειας. Η συνιστώσα προσεγγίσεων διασπάται ξανά με τον ίδιο τρόπο και η διαδικασία επαναλαμβάνεται ανάλογα με το πλήθος των δειγμάτων (εικόνα 1.5). Συνεπώς, ο WPT επιτρέπει την αναπαράσταση του σήματος με περισσότερους από 2^{2^n-1} διαφορετικούς τρόπους, με μια ακολουθία συντελεστών που δεν παρέχεται από τον DWT, όπως φαίνεται στην εικόνα 1.6 [32]. Αυτή η μέθοδος εφαρμοσμένη σε εικόνες B-σάρωσης από καρωτίδα με αθηρωματική πλάκα είναι ικανή να αποκαλύπτει διαφορές τόσο σε υψηλές συχνότητες όσο και σε χαμηλές και συνεπώς να χαρακτηρίζει αποτελεσματικά τον αθηρωματικό ιστό [33].



Εικόνα 1. 5: Αναπαράσταση σήματος με χρήση του WPT



Εικόνα 1. 6: Δέντρο κυματιδιακής ανάλυσης WPT

Φίλτρα Gabor

Τα φίλτρα Gabor αποτελούν μια κατηγορία κυματιδίου. Η εικόνα συνελίσσεται με τα γραμμικά φίλτρα Gabor και έτσι προκύπτει ένα σύνολο από φιλτραρισμένες εικόνες. Από κάθε εικόνα είναι δυνατόν να υπολογισθούν χαρακτηριστικά υφής και να χρησιμοποιηθούν για την περιγραφή της υφής της εικόνας. Οι παράμετροι που επιλέγονται για την εφαρμογή των φίλτρων είναι το μέγεθος του φίλτρου, ο αριθμός των διαφορετικών επιπέδων ανάλυσης και ο αριθμός των διευθύνσεων [34]. Το μέγεθος του φίλτρου δεν πρέπει να είναι πολύ μεγάλο αλλά ούτε και πολύ μικρό [35]. Η μέθοδος αυτή φαίνεται να έχει καλή διαχωριστική ικανότητα μεταξύ των συμπτωματικών και ασυμπτωματικών πλακών [32].

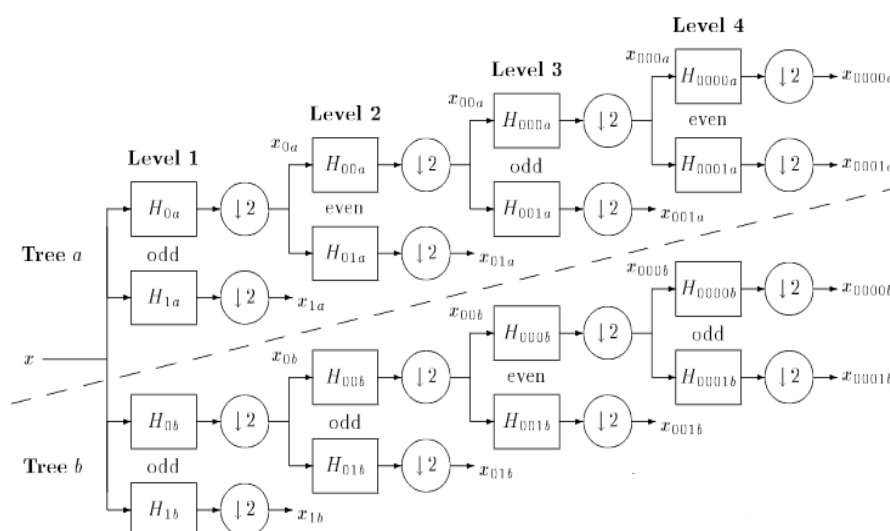
Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η αποσύνθεση πακέτων κυματιδίου ήταν περισσότερο ικανή μέθοδος στο διαχωρισμό συμπτωματικής και ασυμπτωματικής πλάκας [32]. Ο μετασχηματισμός DWT έφτασε ως 80% επιτυχία ταξινόμησης των αθηρωματικών πλακών, ενώ ο SWT έφτασε ως 75%. Τα υψηλότερα ποσοστά του WP που σημειώθηκαν ήταν 75% και 90% ανάλογα την κατάσταση της καρωτίδας (συστολή ή διαστολή αντίστοιχα), ενώ οι ανάλογες τιμές των φίλτρων Gabor ήταν 85% και 65%. Όσον αφορά τους μέσους όρους ακρίβειας με τη μέθοδο ταξινόμησης

support vector machine (SVM), πρώτη βγήκε η μέθοδος με τα φίλτρα Gabor (75%), ακολούθησαν οι DWT και WP (68.8%) και τελευταία ήταν η SWT (67.5%) [32].

Ωστόσο, αυτοί οι μετασχηματισμοί είχαν μερικά μειονεκτήματα, όπως οι συσχετιζόμενοι συντελεστές που προέκυπταν από τα φίλτρα Gabor. Επίσης, οι πληροφορίες που παράγονταν από την εφαρμογή των DWT και SWT μετασχηματισμών, παρουσίαζαν χαμηλή ακρίβεια σε εικόνες κυρίως με μεσαίες συχνότητες και ήταν περιορισμένες ως προς την κατεύθυνση (οριζόντια 0° , κατακόρυφα 90° , και διαγώνια 45° , 135°) [28]. Για το λόγο αυτό, αργότερα εξετάστηκαν τρεις επιπλέον μέθοδοι κυματιδίου περισσότεροι περιγραφικοί και παρουσιάζονται παρακάτω:

Διαδικό δέντρο σύνθετου μετασχηματισμού κυματιδίου - dual-tree complex wavelet transform (DTCWT)

Ο μετασχηματισμός αυτός αποτελεί μια επέκταση του DWT, καθώς είναι σχεδόν ανεξάρτητος του χρόνου και μπορεί να παρέχει πληροφορία για την υφή ως προς τις κατευθύνσεις $\pm 15^\circ$, $\pm 45^\circ$ και $\pm 75^\circ$. Υλοποιείται εφαρμόζοντας παράλληλα δύο DWT στην είσοδο για κάθε επίπεδο ανάλυσης, παράγοντας δύο μέρη συντελεστών με 3 υποεικόνες το καθένα, το πραγματικό και το φανταστικό, χρησιμοποιώντας διαφορετικά φίλτρα. Ο μετασχηματισμός αυτός παρέχει λεπτομερή πληροφορία για την ανάλυση της εικόνας, αλλά έχει υψηλό υπολογιστικό κόστος [28] [36].



Εικόνα 1. 7: Διαδικό δέντρο φίλτρων για το σύνθετο μετασχηματισμό κυματιδίου

Μετασχηματισμός Ridgelet (RT)

Ο μετασχηματισμός αυτός παρέχει πληροφορίες προς μια κατεύθυνση και προέρχεται από την εφαρμογή DWT σε κάθε προβολή radon, έπειτα από την εφαρμογή του μετασχηματισμού radon στην εικόνα [37] [38]. Μια αρχική προσέγγισή του περιλάμβανε τη χρήση δισδιάστατου FFT, μετατροπή των καρτεσιανών συντεταγμένων σε πολικές και την κατασκευή πολικού πλέγματος από ομόκεντρους

κύκλους. Αργότερα οι κύκλοι στο πλέγμα αντικαταστάθηκαν από ομόκεντρα τετράγωνα με γραμμική αύξηση της πλευράς τους. Τέλος, βασίστηκε στη χρήση του μετασχηματισμού *radon*, αντιστοιχώντας κάθε διαφορετικό σημείο σε μοναδική ευθεία γραμμή [28].

Καμπυλωτός μετασχηματισμός - Curvelet transform (CT)

Αυτή η μέθοδος αποτελεί επέκταση των μεθόδων κυματιδίου και είναι ικανή να απεικονίσει πληροφορίες σχετικές με τη γεωμετρική δομή μιας εικόνας. Μπορεί να εντοπίσει ασυνέχειες σε μια ευθεία γραμμή ή γενικά κατά μήκος μιας καμπύλης της εικόνας. Σε πρώτη φάση ο μετασχηματισμός αυτός αποτελούσε επέκταση του μετασχηματισμού *ridgelet* σε μικρή κλίμακα, όπου ένα κομμάτι καμπύλης μπορεί να θεωρηθεί ευθεία. Σε δεύτερη φάση απαλλάχθηκε από τη χρήση των *ridgelets* και βασίστηκε στην εφαρμογή FFT στην εικόνα, τη δημιουργία παραθύρου με παραλληλόγραμμα διαφορετικής κλίμακας και γωνίας και το τύλιγμα γύρω από την αρχή των αξόνων, με αποτέλεσμα να γίνει πολύ πιο γρήγορος από ότι ήταν σε πρώτη φάση [28] [39].

Τα ποσοστά μέσης επίδοσης ταξινόμησης σε κατάσταση συστολής (διαστολής) ήταν 70% (65.2%), 72.6% (70.4%) και 84.9% (73.6%) για τους DTCWT, RT και CT αντίστοιχα, συμπεραίνοντας ότι ο μετασχηματισμός *curvelet* συμβάλλει σημαντικά στην εκτίμηση ευστάθειας της πλάκας σε καρωτίδες με στένωση. Αποδείχθηκε ότι ο καμπυλωτός μετασχηματισμός είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικός στην ταξινόμηση βιολογικών ιστών σε κλάσεις διαφορετικών οργάνων μέσω ανάλυσης υφής, όπως καρδιά, σπλήνα και συκώτι, με ποσοστά 97.9% [28], ενώ ο *ridgelet* με ποσοστά 94.8%, ξεπερνώντας τα ποσοστά 89.9% των προαναφερθέντων μετασχηματισμών κυματιδίου [40]. Ανάλογα είναι τα αποτελέσματα και στις μαστογραφίες, όπου διαχωρίζει τους όγκους σε κανονικούς, καλοήθεις και κακοήθεις με ποσοστά επιτυχίας 94.07%, έναντι του ποσοστού 90.05% που έχουν οι υπόλοιποι [41]. Σχετικά με την ταξινόμηση συμπτωματικών και ασυμπτωματικών πλακών καρωτίδας, ο *curvelet* σημείωσε συνολικά ποσοστά ακρίβειας (διαστολή και συστολή) 79.3%, ο *ridgelet* 71.5%, ενώ τα αποτελέσματα ακριβείας με χρήση *wavelet packets* ήταν 70.9%. Ο DTCWT είχε τα χαμηλότερα ποσοστά 67.6% [28].

1.4 Εφαρμογές μετασχηματισμού Ranklet

Ο μετασχηματισμός *ranklet* σχετίζεται με την εξαγωγή συντελεστών, ανεξάρτητων της έντασης των εικονοστοιχείων της εικόνας στην οποία εφαρμόζεται, που περιγράφουν την κατανομή εντάσεων φωτεινότητας σε μια γειτονική περιοχή. Χρησιμοποιείται σε *gray scale* εικόνες με στόχο να αντιμετωπίσει το πρόβλημα της εξάρτησης της τιμής των δεδομένων και βασίζεται στον υπολογισμό αθροισμάτων τύπου Mann–Whitney–Wilcoxon (MWW). Αυτό, επιτυγχάνεται υπολογίζοντας τη σχετική τάξη (*relative rank*) ενός εικονοστοιχείου σε ένα συγκεκριμένο πλήθος τιμών. Επιτυγχάνει ανάλυση της εικόνας σε διαφορετικές κλίμακες (παράθυρα ανάλυσης) και κατευθύνσεις, επιλέγοντας την παράμετρο της κλίμακας *r* και της κατεύθυνσης

(οριζόντια, κατακόρυφα και διαγώνια). Χρησιμοποιεί επικαλυπτόμενα παράθυρα μεγέθους $r \times r$, τα οποία χωρίζονται σε δύο σετ X και Y, σύμφωνα με τις συναρτήσεις Haar του μετασχηματισμού κυματιδίου [27]. Για κάθε τέτοιο παράθυρο υπολογίζεται μια τιμή που περιγράφει το κατά πόσο πιο «φωτεινά» είναι τα εικονοστοιχεία του σετ X σε σχέση με αυτά του Y.

Τέτοιου είδους μετασχηματισμοί είναι δημοφιλείς στην ανάλυση και επεξεργασία εικόνων λόγω της ικανότητάς τους να εντοπίζουν ακραίες τιμές και της ανεξαρτησίας τους ως προς μονοτονικούς μετασχηματισμούς (φωτεινότητα, αντίθεση διόρθωση Γάμα). Για την αξιολόγηση της διακριτικής ικανότητας του μετασχηματισμού ranklet χρησιμοποιήθηκαν οι δείκτες της ευαισθησίας και της ειδικότητας. Οι δείκτες αυτοί είναι ταυτόσημοι με τους λόγους αληθινά θετικό και αληθινά αρνητικό, αντίστοιχα, δηλαδή: $\text{ευαισθησία} = TP_s / (TP_s + FN_s)$ και $\text{ειδικότητα} = TN_s / (TN_s + FP_s)$. Ωστόσο, οι δείκτες αυτοί μεταβάλλονται καθώς μεταβάλλεται το κατώφλι εμπιστοσύνης. Για το λόγο αυτό λήφθηκε υπόψη ο δείκτης απόδοσης που ορίζεται ως το εμβαδό Az κάτω από μια καμπύλη χαρακτηριστικής λειτουργίας του δέκτη (ROC), η οποία απεικονίζεται το πώς μεταβάλλεται η ευαισθησία καθώς μεταβάλλεται η ειδικότητα.

Ο μετασχηματισμός ranklet έχει εφαρμοστεί ήδη σε εικόνες υπερήχου μαστού και σε μαστογραφίες. Στην πρώτη περίπτωση είχε ως στόχο την αφαίρεση μη χρήσιμου βιολογικού ιστού από όγκους στις εικόνες υπερήχων. Για τρία διαφορετικά σύνολα δεδομένων η τιμή Az πήρε τιμές 0.918 (0.848 μέχρι 0.961), 0.943 (0.906 μέχρι 0.968), και 0.934 (0.883 μέχρι 0.961), αντίστοιχα, ενώ αυτή των σχηματισμών κυματιδίου ήταν 0.847 (0.762 μέχρι 0.910), 0.922 (0.878 μέχρι 0.958), και 0.867 (0.798 μέχρι 0.914), αντίστοιχα [42]. Σε άλλη παρόμοια μελέτη για το διαχωρισμό του καλοήθους όγκου από τον κακοήγη για την αξιολόγηση του μετασχηματισμού, έγινε εξαγωγή χαρακτηριστικών υφής με και χωρίς εφαρμογή του μετασχηματισμού ranklet [43]. Τα χαρακτηριστικά υφής που εξάγονται αφού εφαρμοστεί ο μετασχηματισμός οδηγούν σε τιμές Az 0.83 και 0.80, για χαρακτηριστικά σε δεδομένα περιοχής όγκου έναντι χαρακτηριστικών σε δεδομένα μικρών κηλίδων αντίστοιχα, ενώ αυτά από τις αρχικές εικόνες σε 0.58 και 0.56. Από αυτά συμπεραίνεται ότι ο μετασχηματισμός μπορεί να εφαρμοστεί αποτελεσματικά ακόμα και σε πολύ μικρές περιοχές. Σε μια μελέτη για τη διάκριση ινοαδενωμάτων από τριπλά αρνητικούς καρκίνους μαστού [44], τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η απόδοση που επιτυγχάνεται από ένα σετ χαρακτηριστικών που συνδυάζει τέσσερα μορφολογικά χαρακτηριστικά, ένα συμβατικό χαρακτηριστικό υφής και είκοσι-τέσσερα χαρακτηριστικά μετά από εφαρμογή του ranklet, γίνεται μέγιστη με τιμή Az = 0.9702 (0.9334-0.9882) και ακρίβεια 93.49%. Για όλες τις στατιστικές αναλύσεις για τις τιμές p ισχύει: $p < 0.05$, που σημαίνει ότι η πιθανότητα τα αποτελέσματα να προκύπτουν κατά τυχαίο τρόπο είναι αρκετά μικρή.

Στη δεύτερη περίπτωση, χρησιμοποιήθηκε για το διαχωρισμό όγκων (καλοήθων ή κακοήθων) από φυσιολογικούς βιολογικούς ιστούς σε μαστογραφίες. Τα αποτελέσματα αξιολογήθηκαν μέσω της καμπύλης ROC και του εμβαδού Az. Η απόδοση του μετασχηματισμού ranklet είναι πολύ υψηλότερη από τους υπόλοιπους μετασχηματισμούς κυματιδίου που έχουν εφαρμοστεί, επιτυγχάνοντας εμβαδόν Az = 0.978 ± 0.003 και 90% ευαισθησία. Μάλιστα, αποδείχθηκε ότι όταν ελήφθησαν υπόψη χαμηλές, αλλά και υψηλές κλίμακες r του μετασχηματισμού, σημειώθηκαν σημαντικές διαφορές στα ποσοστά απόδοσης σε σχέση με όταν ελήφθησαν υπόψη αμιγώς υψηλές κλίμακες. Για τα χαρακτηριστικά υφής που εξήχθησαν για το σύνολο κλιμάκων $r=\{16,14,12,10\}$ η τιμή Az ήταν 0.957 ± 0.004 , ενώ για $r=\{16,8,4,2\}$ η τιμή Az ήταν 0.978 ± 0.003 [45]. Στην ίδια μελέτη, συγκρίνονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν, όταν στις εικόνες, που αναλύονται μέσω του μετασχηματισμού τάξης, προηγείται επεξεργασία με εξισορρόπηση ιστογράμματος, με αυτά που προκύπτουν χωρίς προεπεξεργασία. Η ανάλυση και στις δύο συνθήκες πραγματοποιήθηκε για το ίδιο σύνολο κλιμάκων $r=\{2,4,8,16\}$. Συγκεκριμένα, η τιμή Az για την περίπτωση με εξισορρόπηση ήταν 0.977 ± 0.003 , ενώ χωρίς εξισορρόπηση ήταν 0.978 ± 0.003 . Το αποτέλεσμα ήταν ότι η εξισορρόπηση ιστογράμματος δεν επιφέρει σημαντικές διαφορές στην απόδοση του μετασχηματισμού, αφού οι τιμές και στις δύο περιπτώσεις είναι σχεδόν ίδιες. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο μετασχηματισμός τάξης σχετίζεται με την σχετική διάταξη των εικονοστοιχείων του παραθύρου ανάλυσης και όχι με τις εντάσεις τους.

1.5: Σκοπός της εργασίας

Η απεικόνιση της καρωτίδας με υπερήχους αποτελεί μια ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνική διάγνωσης της αθηροσκλήρωσης, καθώς επιτρέπει τη μη παρεμβατική αξιολόγηση του βαθμού στένωσης και της μορφολογίας της πλάκας [46]. Μέσω της ανάλυσης με τη χρήση υπολογιστών και κατάλληλου λογισμικού επεξεργασίας εικόνας, το υπερηχογράφημα μπορεί να αποδειχθεί πολύ χρήσιμο σαν ένα επικουρικό εργαλείο στην ανίχνευση βλαβών, την εκτίμηση της σοβαρότητας της ασθένειας καθώς και στη λήψη σχετικών αποφάσεων.

Από τη βιβλιογραφική επισκόπηση (ενότητα 1.3.2), συμπεραίνεται ότι η χρήση πολυ-κλιμακωτών μετασχηματισμών και μετασχηματισμών κυματιδίου σε εικόνες υπερήχου, με στόχο την ανάλυση υφής της πλάκας στην καρωτίδα, παράγουν χαρακτηριστικά υφής υψηλής διακριτικής ικανότητας στην εκτίμηση της σοβαρότητας της νόσου. Δεδομένου ότι ο πολυ-κλιμακωτός μετασχηματισμός ranklet έχει παρουσιάσει εξίσου ικανοποιητικά αποτελέσματα σε υπερήχους μαστού και μαστογραφίες (ενότητα 1.4), η παρούσα εργασία εστιάζει στην υλοποίηση του μετασχηματισμού και την αξιολόγηση της χρήσης του σε εικόνες υπερήχου καρωτίδας με αθηρωματική πλάκα.

Η υλοποίηση του μετασχηματισμού ranklet περιλαμβάνει τρία επιμέρους στάδια. Στο πρώτο στάδιο χρησιμοποιείται η εικόνα Β-σάρωσης του υπερηχογραφήματος από την οποία απομονώνεται η περιοχή ενδιαφέροντος, δηλαδή η περιοχή που περιέχει την πλάκα, για την οποία γίνεται η μορφολογική ανάλυση. Το δεύτερο στάδιο περιλαμβάνει την εξαγωγή των συντελεστών ranklet της εικόνας και την κβάντιση των τιμών των συντελεστών. Τέλος, στο τρίτο στάδιο, εξάγονται τα χαρακτηριστικά υφής δεύτερης τάξης, με βάση τη μήτρα συνεμφάνισης φωτεινότητων (Gray-Level Co-occurrence Matrix – GLCM) [21], για κάθε εικόνα σε μορφή διανύσματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ RANKLET

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο του μετασχηματισμού τάξης, που χρησιμοποιείται για την ανάλυση υψής αθροισματικής πλάκας καρωτίδας από εικόνες υπερήχου. Συγκεκριμένα, αρχικά αναφέρονται βασικά χαρακτηριστικά των μεθόδων στις οποίες βασίζεται ο μετασχηματισμός ranklet, ενώ στη συνέχεια αναλύονται βασικές αρχές του, καθώς και οι διαδικασίες υλοποίησης του αλγορίθμου που εφαρμόζει το μετασχηματισμό ranklet σε μια δισδιάστατη εικόνα. Επίσης, περιγράφονται τα χαρακτηριστικά υψής που εξάγονται για το σύνολο των εικόνων που αναλύονται και αναφέρονται οι παράμετροι που επηρεάζουν τα αποτελέσματα του μετασχηματισμού.

Στη στατιστική, ranklet είναι ένα μη-παραμετρικό χαρακτηριστικό, που μπορεί να θεωρηθεί ως περιγραφέας διάταξης των τιμών μιας τοπικής περιοχής ως προς μια κατεύθυνση, που βασίζεται στη μέθοδο ελέγχου αθροίσματος διατάξεων (rank sum test) Mann-Whitney-Wilcoxon (MWW). Τα χαρακτηριστικά περιγραφής τάξης (ranklets), που αναλύονται στη συνέχεια, παρουσιάζουν αρκετές ομοιότητες με τα κυματίδια Haar, καθώς ακολουθούν το ίδιο μοτίβο επιλογής κατεύθυνσης και είναι πολυ-κλιμακωτής φύσης. Τα τελευταία χρόνια τα χαρακτηριστικά τάξης έχουν γίνει ιδιαίτερα δημοφιλή στην επεξεργασία εικόνας και η συμβολή τους έχει εκτιμηθεί κυρίως από την κοινότητα της όρασης υπολογιστών, λόγω της ανεξαρτησίας τους ως προς μονοτονικούς μετασχηματισμούς (φωτεινότητας, αντίθεσης, φίλτρου Gamma Correction) και της ευρωστίας των αποτελεσμάτων τους [47].

2.1 Έλεγχος αθροίσματος διατάξεων MWW

Τα αθροίσματα MWW αποτελούν μια μη-παραμετρική μέθοδο σύγκρισης δύο ανεξάρτητων κατανομών. Οι μη-παραμετρικοί έλεγχοι εφαρμόζονται όταν δεν είναι γνωστή η κατανομή των μετρήσεων [48], τα δείγματα των μετρήσεων είναι μικρά και βασίζονται κυρίως στη διάταξη των μετρήσεων και όχι στις ίδιες τις μετρήσεις [49]. Τέτοιου είδους έλεγχοι προτιμώνται γιατί έχουν μεγαλύτερη υπολογιστική ταχύτητα και είναι λιγότεροι ευαίσθητοι σε ακραίες τιμές.

Η μέθοδος αξιολογεί εάν δύο δείγματα παρατηρήσεων προέρχονται από την ίδια κατανομή, χωρίς να ακολουθούν απαραίτητα κανονική κατανομή [50]. Στόχος είναι η ανίχνευση διαφορών μεταξύ των δύο κατανομών με βάση τυχαία δείγματα από αυτές. Συνήθως γίνεται συνένωση των δύο δειγμάτων σε ένα ενιαίο, στο οποίο οι τιμές διατάσσονται κατά αύξουσα σειρά μεγέθους. Στις τιμές του ενιαίου συνόλου αντιστοιχίζονται βαθμοί από την μικρότερη ως τη μεγαλύτερη, ανεξάρτητα της κατανομής από την οποία προέρχεται η κάθε μία τιμή. Ως ελεγχοσυνάρτηση μπορεί να ορισθεί το άθροισμα των βαθμών που αντιστοιχούν σε εκείνες τις τιμές που προέρχονται από τη μία εκ των δύο κατανομών. Το γεγονός αν το άθροισμα αυτό είναι αρκετά μικρό (ή μεγάλο) αποτελεί ένδειξη ότι οι τιμές της μιας κατανομής είναι πολύ μικρότερες (ή μεγαλύτερες) σε σχέση με αυτές της άλλης κατανομής. Συνήθως τα δύο αυτά δείγματα ονομάζονται ομάδα πειράματος (treatment group - T) και ομάδα ελέγχου (control group - C) αντίστοιχα. Τα αθροίσματα τάξης Wilcoxon ορίζονται ως εξής:

$$Ws = \sum_{i=1}^N \pi_i V_i, \text{ όπου } \pi_i = \text{rank του στοιχείου } i \text{ και } V_i = \begin{cases} 0, & \text{αν } \pi_i \in C \\ 1, & \text{αν } \pi_i \in T \end{cases} \quad (1)$$

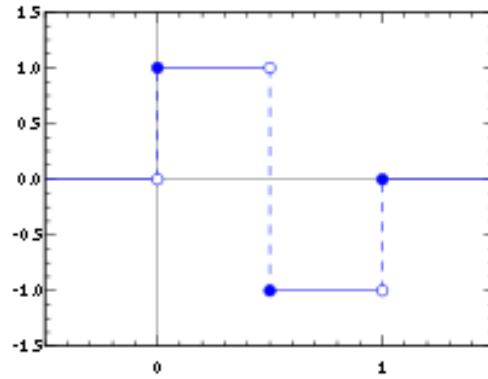
Έπειτα, ορίζονται τα στατιστικά Mann-Whitney (MW) ως εξής [45]:

$$MW = Ws - \frac{m(m+1)}{2}, \text{ όπου } m \text{ είναι το πλήθος των τιμών του συνόλου πειράματος } T \quad (2)$$

2.2 Κυματίδιο Haar

Στην επιστήμη των μαθηματικών είναι μια ακολουθία τετραγώνων διαφορετικής κλίμακας, τα οποία αν συνδυαστούν διαμορφώνουν τη βάση μιας οικογένειας κυματιδίων. Το κυματίδιο Haar προτάθηκε από τον Alfred Haar [51] και αποτελεί το πιο απλό παράδειγμα ενός ορθοκανονικού κυματιδίου. Η συνάρτηση κλιμάκωσης έχει μόνο δύο μη μηδενικούς συντελεστές κλιμάκωσης ($c_0=c_1=1$) και δίνεται από την εξίσωση: $\varphi(t) = \varphi(2t) + \varphi(2t - 1)$. Το πρακτικό μειονέκτημα του συγκεκριμένου κυματιδίου είναι η ασυνέχεια που παρουσιάζει και κατ' επέκταση η μη-διαφορισιμότητά του. Λόγω της ιδιαιτερότητάς του αυτής, είναι χρήσιμο στην ανάλυση σημάτων που παρουσιάζουν απότομες μεταβάσεις. Το κυματίδιο Haar απεικονίζεται στην εικόνα 2.1 και η συνάρτηση που το περιγράφει είναι:

$$\psi(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t < \frac{1}{2} \\ -1, & \frac{1}{2} \leq t < 1 \\ 0, & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (3)$$



Εικόνα 2. 1: Απεικόνιση του κυματιδίου Haar

2.3 Μετασχηματισμός Ranklet

Ο μετασχηματισμός ranklet σχετίζεται με μη-παραμετρική ανάλυση και χαρακτηρίζεται από πολυ-κλιμακωτές ιδιότητες προς μια κατεύθυνση επιλογής, όπως και τα κυματίδια Haar [27]. Χρησιμοποιείται ως περιγραφέας τάξης των εικονοστοιχείων εντός μιας τοπικής περιοχής [52]. Δεδομένου ότι ο μετασχηματισμός αυτός λαμβάνει υπόψη του τη σχετική διάταξη των εικονοστοιχείων και όχι τις ίδιες τις τιμές τους, μπορεί να προσδιοριστεί ως τελεστής ανεξάρτητος από οποιαδήποτε μονοτονική αλλαγή των εικονοστοιχείων παρατήρησης. Συγκεκριμένα, έστω μία τυχαία μήτρα S και μία προσθετική μήτρα P (όλα τα στοιχεία της έχουν την ίδια τιμή), η μήτρα περιγραφής τάξης RS με το μετασχηματισμό ranklet π του S , $S+P$, ή $c \cdot S$ (όπου c είναι μια θετική μεταβλητή) περιγράφεται ως εξής:

$$S = \begin{pmatrix} 12 & 28 & 25 & 78 \\ 72 & 55 & 44 & 13 \\ 46 & 11 & 22 & 89 \\ 14 & 58 & 33 & 10 \end{pmatrix}, P = \begin{pmatrix} 3 & 3 & 3 & 3 \\ 3 & 3 & 3 & 3 \\ 3 & 3 & 3 & 3 \\ 3 & 3 & 3 & 3 \end{pmatrix},$$

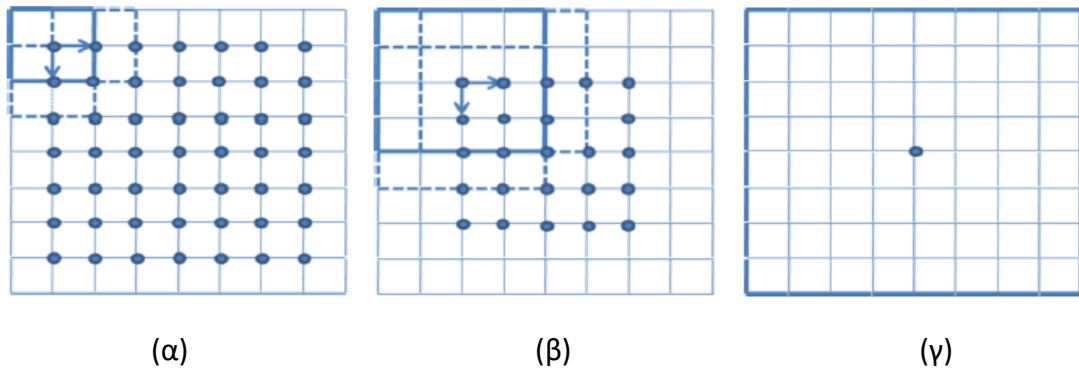
$$RS = \pi(S) = \pi(S \pm P) = \pi(c \cdot S) = \begin{pmatrix} 3 & 8 & 7 & 15 \\ 14 & 12 & 10 & 4 \\ 11 & 2 & 6 & 16 \\ 5 & 13 & 9 & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

Στη σχέση (4), η τιμή τάξης κάθε στοιχείου της μήτρας RS κυμαίνεται από 1 έως N , όπου N το μέγεθος της μήτρας. Αξίζει να σημειωθεί, ότι οι τιμές των στοιχείων του πίνακα RS παραμένουν αμετάβλητες σε οποιαδήποτε μονοτονική αλλαγή (c ή P) κι αν γίνει στην αρχική μήτρα S [42].

Ο μετασχηματισμός ranklet μιας εικόνας I περιλαμβάνει τρεις φάσεις: α) πολυ-κλιμακωτή, β) επιλεκτική ως προς μια κατεύθυνση και γ) μη-παραμετρική ανάλυση. Το αποτέλεσμα της εφαρμογής του μετασχηματισμού αυτού σε μια εικόνα

I , είναι η παραγωγή n_{RI} το πλήθος μη-παραμετρικών εικόνων περιγραφής τάξης RI . Το πλήθος n_{RI} ισούται με το γινόμενο του πλήθους των διαφορετικών κλιμάκων (resolution) n_R με το πλήθος των διαφορετικών κατευθύνσεων n_O που επιλέγονται για να γίνει η ανάλυση, δηλαδή $n_{RI} = n_R * n_O$.

Η πολυ-κλιμακωτή ανάλυση επιτυγχάνεται επιλέγοντας ένα σύνολο κλιμάκων r (resolution), σύμφωνα με τις οποίες εξάγεται ένας μεταβλητός αριθμός επικαλυπτόμενων τετραγωνικών παραθύρων (squared crops) της εικόνας I , μεταβλητής πλευράς ίση με την κάθε μία κλίμακα, που μετατοπίζονται κατά ένα εικονοστοιχείο μέσα στο χώρο της εικόνας [43]. Γενικά, για κάθε κλίμακα, το πλήθος των τετραγωνικών crops που προκύπτουν υπολογίζεται από τον τύπο: $(I_l + 1 - I_c)^2$, όπου I_l είναι το μέγεθος (πλήθος γραμμών) της εικόνας I και I_c το μέγεθος των τετραγωνικών παραθύρων. Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.2, για μια εικόνα μεγέθους 8×8 , η ανάλυση για το σύνολο κλιμάκων $\{2, 4, 8\}$ οδηγεί σε 49, 25 και 1 τετραγωνικά παράθυρα με πλευρά 2, 4 και 8, αντίστοιχα.

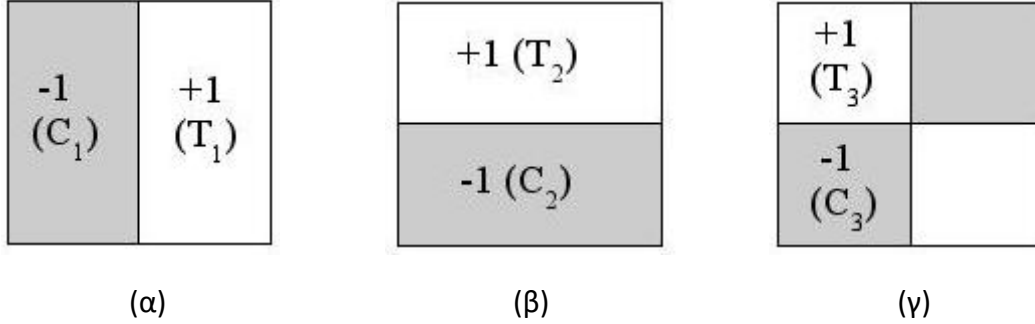


Εικόνα 2. 2: Παράδειγμα εφαρμογής πολυ-κλιμακωτού μετασχηματισμού ranklet σε εικόνα 8×8 για ανάλυση $r=2$ (α), $r=4$ (β) και $r=8$ (γ), με τη βοήθεια των κυματιδίων Haar με μεγέθη παραθύρων 2×2 , 4×4 και 8×8 , αντίστοιχα. Η κλίμακα (resolution) $r=2$ οδηγεί σε 49 τετραγωνικά παράθυρα (crops) (α), ενώ για $r=4$ (β) και $r=8$ (γ) προκύπτουν 25 και 1 παράθυρα αντίστοιχα [44].

Για κάθε τιμή του συνόλου κλιμάκων r , η δυνατότητα κατευθυντικής ανάλυσης επιτυγχάνεται αν κάθε τετραγωνικό παράθυρο χωριστεί σε δύο ίσα μέρη, ένα υποσύνολο T και ένα υποσύνολο C , με διαφορετικό τρόπο κάθε φορά. Ο τρόπος που προσδιορίζονται τα δύο αυτά υποσύνολα εξαρτάται από την κατεύθυνση ανάλυσης, ο (orientation), που έχει επιλεγθεί. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 2.3, τα σύνολα T και C έχουν διαφορετική χωρική κατανομή ανάλογα με την επιλεγμένη κατεύθυνση (οριζόντια, κατακόρυφα και διαγώνια). Τα υποσύνολα αυτά, θυμίζουν προφανώς, τις συναρτήσεις βάσης Haar στο πλαίσιο της ιστορίας του κυματιδίου [27], καθώς τα σύνολα T και C μπορούν να περιγραφούν από τις εξισώσεις [53]:

$T_j = \left\{ \vec{x}: h_j \left(\frac{\vec{x} - \vec{x}_0}{s} \right) = +1 \right\}$ και $C_j = \left\{ \vec{x}: h_j \left(\frac{\vec{x} - \vec{x}_0}{s} \right) = -1 \right\}$, όπου s ο συντελεστής αλλαγής κλίμακας από τη θεωρία κυματιδίου. Η πολυ-κλιμακωτή ανάλυση

επιτυγχάνεται χάρη στην ικανότητα μεταβολής της κλίμακας s και μετατόπισης των κυματιδίων Haar, στα οποία βασίζονται τα σύνολα-παράθυρα [45].



Εικόνα 2. 3: Τα τρία δισδιάστατα κυματίδα Haar, για την (α) κατακόρυφη, (β) οριζόντια και (γ) διαγώνια κατεύθυνση. Τα γράμματα T και C αναφέρονται στα υποσύνολα πειράματος και ελέγχου.

Για κάθε συνδυασμό κλίμακας r και κατεύθυνσης o , πραγματοποιείται μη-παραμετρική ανάλυση σε όλα τα αντίστοιχα τετραγωνικά παράθυρα. Σκοπός του μετασχηματισμού ranklet είναι η σύγκριση των εντάσεων των εικονοστοιχείων μεταξύ δύο γειτονικών περιοχών. Για να υπολογιστεί ο συντελεστής τάξης που εκφράζει αυτή τη σύγκριση των περιοχών πρέπει να συγκριθεί κάθε δυνατός συνδυασμός εικονοστοιχείων, όπου το ένα ανήκει στην περιοχή T και το άλλο στην περιοχή C. Για εξοικονόμηση χρόνου και αποφυγή όλων αυτών των συγκρίσεων, υπολογίζονται τα αθροίσματα Wilcoxon. Τα αθροίσματα, όπως προαναφέρθηκε, περιγράφονται από μια αύξουσα συνάρτηση της σχετικής φωτεινότητας της περιοχής πειράματος [47]. Από το «κεντράρισμα» των αθροισμάτων γύρω από τη μέση τιμή τους προκύπτουν τα στατιστικά Mann-Whitney. Ουσιαστικά, αυτά εκφράζουν το πλήθος των ζευγαριών εικονοστοιχείων (p_m, p_n) για τα οποία ισχύει η ανισότητα: $p_m > p_n$, όπου $p_m \in T$ και $p_n \in C$. Εφόσον, N είναι το πλήθος των στοιχείων του παραθύρου, για να υπολογιστεί το πλήθος των ζευγών, πρέπει να γίνουν $\frac{N}{2} * \frac{N}{2} = N^2/4$ συγκρίσεις. Το πλήθος αυτό κυμαίνεται από 0 έως $N^2/4$, αλλά με κατάλληλη κανονικοποίηση μπορεί να μεταβεί στο διάστημα $[-1, +1]$, το οποίο αποτελεί το συντελεστή τάξης (ranklet coefficient).

Η πολυπλοκότητα του παραπάνω υπολογισμού απαιτεί χρόνο $O(N^2)$. Ωστόσο, η διαδικασία μπορεί να πραγματοποιηθεί σε χρόνο $O(N \log N)$ λαμβάνοντας υπόψη τα αθροίσματα Wilcoxon, δηλαδή τη σχετική διάταξη των εικονοστοιχείων, και ο συντελεστής τάξης, για συγκεκριμένη κλίμακα r , να υπολογιστεί με βάση τον τύπο:

$$R_j = \frac{\sum_{p \in T_j} \pi(p) - \frac{N}{4}(\frac{N}{2} + 1)}{\frac{N^2}{8}} - 1, j = V, H, D, \text{ όπου } -1 \leq R_j \leq +1 \quad (5)$$

Ο τύπος, κάνοντας απλές πράξεις, μπορεί να γραφεί και ως εξής [44]:

$$R_o^r = \frac{\sum_{p \in T_o^r} \pi(p) - \frac{N}{4}}{\frac{N^2}{8}} - 2, o \in \{h, v, d\}, r \in \{2, 4, 8, \dots\} \quad (6)$$

Το άθροισμα του αριθμητή αντιστοιχεί στο άθροισμα των τάξεων των εικονοστοιχείων του συνόλου πειράματος T_j , όπως περιγράφεται στα αθροίσματα τάξης Wilcoxon. Ο συντελεστής R_j που προκύπτει παίρνει τιμή κοντά στο +1 αν τα στοιχεία του συνόλου T έχουν υψηλότερες gray-scale τιμές από αυτά του συνόλου ελέγχου C . Αντίστροφα, αν τα στοιχεία του συνόλου T έχουν χαμηλότερες gray-scale τιμές από αυτά του συνόλου ελέγχου C , τότε η τιμή του συντελεστή πλησιάζει το -1. Είναι προφανές ότι ο οριζόντιος συντελεστής R_H είναι κοντά στη μηδενική τιμή για ένα παράθυρο με καμία μεταβολή κατά την οριζόντια διάσταση της εικόνας, το οποίο ισχύει και για τις άλλες δύο κατευθύνσεις, αντίστοιχα [52].

Σύμφωνα με την παραπάνω προσέγγιση, η αποσύνθεση μιας εικόνας I μέσω του μετασχηματισμού ranklet οδηγεί για κάθε κλίμακα σε ένα σετ τριών εικόνων περιγραφής τάξης R_I , μία για κάθε κατεύθυνση. Το σετ αυτό ονομάζεται τριπλέτα $R_{V,H,D}$. Τα εικονοστοιχεία κάθε εικόνας R_I , αναπαρίστανται από τους συντελεστές ranklet R_H , R_V και R_D , που υπολογίστηκαν από τα παράθυρα που προέκυψαν από μια δεδομένη κλίμακα. Σε μια συγκεκριμένη θέση των εικόνων ranklet, ο συντελεστής διάταξης αποτελεί ένα είδος μέτρου της κανονικότητας της γειτονιάς του για τη συγκεκριμένη κλίμακα και κατεύθυνση, ένα μέτρο υφής. Όσο υψηλότερος είναι κατά απόλυτη τιμή, τόσο πιο μεταβαλλόμενη είναι η γειτονιά του [52].

2.4 Υπολογισμός τάξης ενός συνόλου παρατηρήσεων με τον αλγόριθμο distribution counting

Όπως προαναφέρθηκε, ο συντελεστής ranklet (ranklet coefficient) προκύπτει από την κανονικοποίηση των MW στατιστικών στο διάστημα $[-1, +1]$, όπου θετική τιμή σημαίνει ότι η περιοχή θεραπείας T είναι φωτεινότερη από την περιοχή ελέγχου C , ενώ αρνητική το αντίθετο [44]. Για παράδειγμα, έστω το ταξινομημένο σύνολο τιμών που φαίνεται στον πίνακα 2.1. Στον ίδιο πίνακα παρουσιάζεται, επίσης, η τάξη για καθεμία παρατήρηση του συνόλου.

Πίνακας 2. 1: Παράδειγμα υπολογισμού τάξης ενός συνόλου παρατηρήσεων

Ένταση	1	4	5	7	9	10	11	13	15	19	20
Περιοχή	T	C	T	C	T	T	C	C	T	C	C
Τάξη	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

Η διαδικασία είναι προφανής για περιπτώσεις στις οποίες κάθε τιμή που παρατηρείται στο σύνολο παρατηρήσεων είναι μοναδική. Το ερώτημα είναι τι γίνεται σε περιπτώσεις που διαφορετικά εικονοστοιχεία του παραθύρου παίρνουν την ίδια

τιμή. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, σε κάθε ομάδα εικονοστοιχείων με την ίδια τιμή έντασης, αντιστοιχίζεται η μέση τιμή των βαθμίδων που καταλαμβάνουν [45]. Πρακτικά, για να υλοποιηθεί αυτό, υπολογίζεται το αθροιστικό ιστόγραμμα του παραθύρου W , $H_W(i) = \#\{x \in W \mid I(x) \leq i\}$. Ο υπολογισμός, τότε, γίνεται μέσω του αλγορίθμου ταξινόμησης με μέτρηση κατανομής (distribution counting algorithm) [54]. Ο αλγόριθμος αυτός ταξινομεί η τιμές που είναι ακέραιες τιμές από 1 έως m . Συνεπώς, για την τάξη του εικονοστοιχείου x ισχύουν οι ανισότητες: $H_W(I(x) - 1) + 1 \leq \pi(x) \leq H_W(I(x))$, με την προϋπόθεση ότι $H_W(-1) = 0$. Η ισότητα ισχύει όταν την ένταση i την έχει ακριβώς ένα εικονοστοιχείο. Επομένως, για κάθε τιμή του παραθύρου πρέπει να υπολογιστούν στατιστικά τάξης, που αντιπροσωπεύουν το μέσο όρο κάποιων τάξεων, γνωστά ως μέσα των τάξεων (midranks) [55]. Αυτά υπολογίζονται από τον τύπο:

$$\pi'(x) = \frac{1}{2} \left(H_W(I(x) - 1) + H_W(I(x)) \right) + \frac{1}{2} \quad (7)$$

Ο τύπος αυτός, δηλαδή, γράφεται ως ημιάθροισμα της πρώτης και της τελευταίας βαθμίδας του επόμενου δεσμού (εικονοστοιχεία με την ίδια τιμή) που θα δίνονταν αν γινόταν η υπόθεση ότι δεν υπάρχουν ισοτιμίες. Η πρώτη επόμενη βαθμίδα που θα έπρεπε να αποδοθεί είναι η τελευταία που έχει δοθεί προηγουμένως αυξημένη κατά μία μονάδα ($H_W(I(x) - 1) + 1$). Η τελευταία επόμενη βαθμίδα που θα έπρεπε να δοθεί είναι το αθροιστικό ιστόγραμμα μέχρι την τιμή $I(x)$, δηλαδή η $H_W(I(x))$. Ο μέσος όρος των βαθμίδων προκύπτει από το ημιάθροισμα της πρώτης και της τελευταίας, αφού όλες οι ενδιάμεσες βαθμίδες διαφέρουν στη σειρά κατά μία μονάδα.

Τελικά, σε περίπτωση ισοπαλίας-δεσμού (tie) αποδίδεται ο μέσος όρος των αρχικών βαθμίδων. Για παράδειγμα, έστω το ταξινομημένο σύνολο τιμών που φαίνεται στον πίνακα 2.2. Στον ίδιο πίνακα παρουσιάζεται για καθεμία παρατήρηση του συνόλου η αντίστοιχη τάξη που προκύπτει με βάση τα midranks.

Πίνακας 2. 2: Παράδειγμα υπολογισμού τάξης ενός συνόλου παρατηρήσεων με ισοπαλίες

Ένταση	1	4	4	4	9	10	11	11	15	19	20
Περιοχή	T	C	T	C	T	T	C	C	T	C	C
Τάξεις	1	3	3	3	5	6	7.5	7.5	9	10	11

Η υπολογιστική πολυπλοκότητα, έτσι, γίνεται $O(N+I)$, όπου I είναι το πλήθος των μη-μηδενικών τιμών του ιστογράμματος, δηλαδή το πλήθος των διαφορετικών τιμών που παίρνουν τα εικονοστοιχεία του παραθύρου.

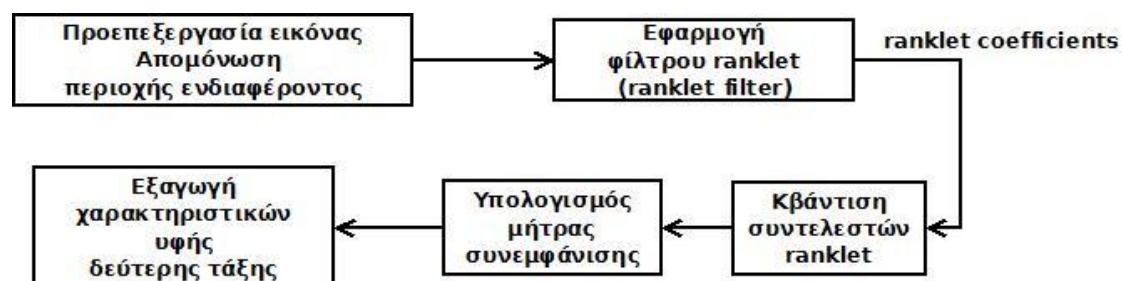
Εν κατακλείδι, Ranklets ονομάζονται τα χαρακτηριστικά τάξης μιας οικογένειας πολυ-κλιμακωτών, μη-παραμετρικών φίλτρων τάξης που περιλαμβάνουν μοτίβα επιλογής κατεύθυνσης, όπως τα κυματίδια Haar. Υπολογίζονται, δηλαδή, προς

μια κατεύθυνση επιλογής και βρίσκουν εφαρμογή στην αναγνώριση προσώπου, την ανάλυση υφής και ιατρικές απεικονίσεις. Όπως όλα τα χαρακτηριστικά περιγραφής τάξης, βασίζονται στον υπολογισμό της σχετικής τάξης-βαθμίδας των τιμών έντασης εικονοστοιχείων και όχι στις τιμές καθαυτές. Συνεπώς, για να μπορέσουν να υπολογιστούν πρέπει να προηγηθεί μια ταξινόμηση των τιμών ενός συνόλου [47]. Αφού επιλεγθεί η κλίμακα και η κατεύθυνση για τη δημιουργία των παραθύρων, τα οποία χωρίζονται σε δύο περιοχές, πειράματος και ελέγχου, και τη σύγκριση των φωτεινότητων τους, γίνεται ταξινόμηση των τιμών του παραθύρου, και στη συνέχεια, υπολογίζεται η τάξη της κάθε τιμής με βάση τα midranks. Έπειτα, γίνεται υπολογισμός των αθροισμάτων Wilcoxon και τέλος υπολογίζονται οι κανονικοποιημένοι στο διάστημα $[-1, +1]$ συντελεστές τάξης. Τιμές κοντά στο 0 αναπαριστούν συγκεκριμένο μοτίβο υφής σε μια τοπική περιοχή, ενώ τιμές κοντά στο ± 1 υποδεικνύουν την ύπαρξη ακμών και απότομων μεταβολών.

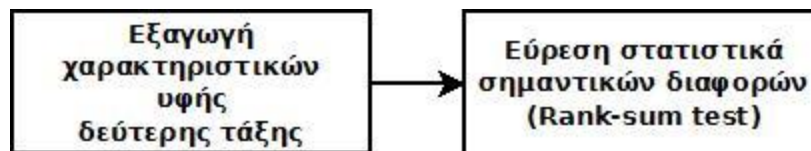
2.5 Ανάπτυξη μεθοδολογίας εφαρμογής του μετασχηματισμού ranklet

Η υλοποίηση του αλγορίθμου που ενσωματώνει την εφαρμογή του μετασχηματισμού ranklet, που περιγράφηκε στις προηγούμενες ενότητες του κεφαλαίου, πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον Matlab (The MathWorks, Natick, Massachusetts, USA).

Στην εικόνα 2.4 παρουσιάζεται η αλληλουχία των ενεργειών που απαιτούνται για την εφαρμογή του μετασχηματισμού σε μια εικόνα και την εξαγωγή χαρακτηριστικών δεύτερης τάξης από αυτήν. Οι διαδικασίες που απαιτούνται περιλαμβάνουν την προεπεξεργασία της εικόνας που αναλύεται, ώστε να απομονωθεί η κατάλληλη περιοχή ενδιαφέροντος (π.χ. της αθηρωματικής πλάκας), την εφαρμογή του φίλτρου ranklet στην υποεικόνα ενδιαφέροντος που προκύπτει, την εφαρμογή του φίλτρου ranklet σε αυτήν για την εξαγωγή των συντελεστών ranklet της εικόνας, την κβάντιση αυτών, ώστε να είναι δυνατός ο υπολογισμός της μήτρας συνεμφάνισης φωτεινότητων GLCM προς τις 4 κατευθύνσεις και τέλος, την εξαγωγή των χαρακτηριστικών υφής δεύτερης τάξης. Σημειώνεται ότι μετά την εξαγωγή των χαρακτηριστικών υφής ακολουθεί η εύρεση των στατιστικά σημαντικών διαφορών τους (εικόνα 2.5), σύμφωνα με το τεστ αθροίσματος βαθμών (rank-sum test).



Εικόνα 2. 4: Αλληλουχία των διαδικασιών που απαιτούνται για την ανάλυση υφής μέσω της εφαρμογής του μετασχηματισμού ranklet σε μια δισδιάστατη εικόνα υπερήχου καρωτίδας.



Εικόνα 2. 5: Εύρεση στατιστικά σημαντικών διαφορών μεταξύ των χαρακτηριστικών υφής.

Το δεύτερο βήμα του αλγορίθμου περιλαμβάνει όλες τις ενέργειες που σχετίζονται αποκλειστικά με τον μετασχηματισμό, όπως αυτός αναλύθηκε στις ενότητες 2.1-2.4. Το αποτέλεσμα της εφαρμογής του μετασχηματισμού ranklet είναι συντελεστές διαφορετικής κλίμακας και κατεύθυνσης, των οποίων οι τιμές είναι συνεχείς πραγματικές που ανήκουν στο διάστημα $[-1, +1]$. Επειδή η μήτρα συνεμφάνισης φωτεινότητας (Gray-Level Co-occurrence Matrix - GLCM) εκφράζει την πιθανότητα ένα εικονοστοιχείο με φωτεινότητα I_1 να απέχει ορισμένη απόσταση από ένα εικονοστοιχείο με φωτεινότητα I_2 , οι φωτεινότητες πρέπει να είναι πεπερασμένες. Για το λόγο αυτό η κβάντιση των συντελεστών είναι απαραίτητη, ώστε να διακριτοποιηθούν οι τιμές αυτές σε b το πλήθος επίπεδα και να γίνει εφικτός ο υπολογισμός των πινάκων συνεμφάνισης φωτεινότητας και έπειτα των χαρακτηριστικών υφής που περιγράφονται στην ενότητα 2.6.

Οι κώδικες που υλοποιούν τον αλγόριθμο παρατίθενται στο παράρτημα. Οι συναρτήσεις Ranklet_filter.m και ranklet_coefficients.m υλοποιούν το δεύτερο βήμα του αλγορίθμου, ενώ η συνάρτηση main.m περιλαμβάνει όλες τις απαραίτητες διαδικασίες.

2.6 Εξαγωγή χαρακτηριστικών υφής

Ο μετασχηματισμός ranklet που αναπτύχθηκε, έχει ως απώτερο σκοπό την εξαγωγή χαρακτηριστικών δεύτερης τάξης (Second Order Statistics – SOS) που περιγράφουν την κατανομή της φωτεινότητας στην εικόνα. Αυτές οι στατιστικές ιδιότητες εξάγονται από τις εικόνες ranklet, δηλαδή αφού εφαρμοστεί ο μετασχηματισμός στις αρχικές εικόνες, ώστε να επιτευχθεί η μη-παραμετρική ανάλυση. Για κάθε μετασχηματισμένη εικόνα RI , που προκύπτει για κλίμακα r και κατεύθυνση ανάλυσης θ , τα βήματα εξαγωγής των χαρακτηριστικών περιλαμβάνουν δύο φάσεις [52]:

1. Κβάντιση των μετασχηματισμένων εικόνων ranklet RI σε b επίπεδα (QRI εικόνες, τρίτο βήμα του αλγορίθμου – εικόνα 2.4)
2. Εξαγωγή των χαρακτηριστικών υφής από τις κβαντισμένες εικόνες, μέσω της μήτρας GLCM (τέταρτο και πέμπτο βήμα του αλγορίθμου – εικόνα 2.4)

Η συμβατική ανάλυση υφής χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της τοπικής πληροφορίας υφής, όπως το ιστόγραμμα, για να χαρακτηρίσει την υφή των βιολογικών ιστών κατά τη διάγνωση με υπερήχους. Η σχετική θέση μεταξύ των εικονοστοιχείων σε μια τοπική περιοχή μπορεί να προσφέρει περισσότερη γεωμετρική πληροφορία για την αναπαράσταση των χαρακτηριστικών.

Ο πίνακας “Gray Level Co-occurrence Matrix”, GLCM, για τον οποίο χρησιμοποιείται επίσης ο χαρακτηρισμός “Gray Tone Spatial Dependency Matrix”,

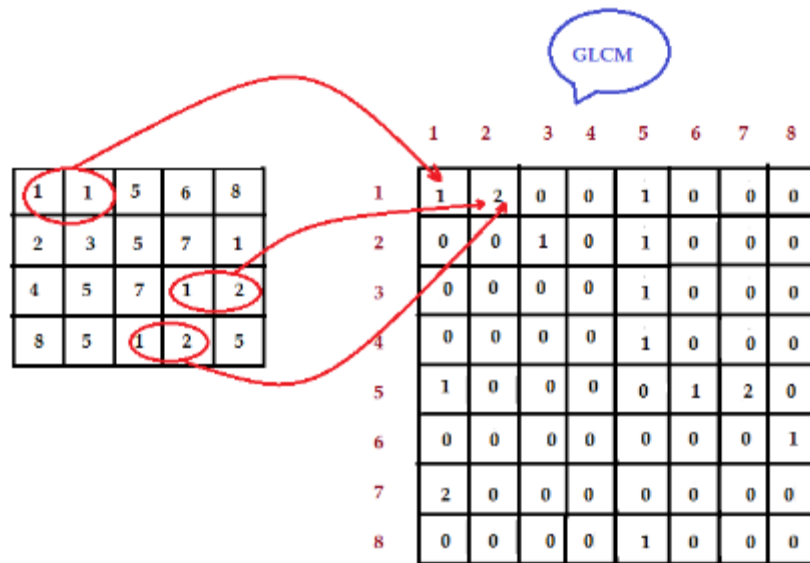
προτάθηκε από τον Haralick τη δεκαετία του 1970 και αφορά στατιστικές ιδιότητες δεύτερης τάξης (Second Order Statistics - SOS), που εξετάζουν εξαρτήσεις μεταξύ ζευγών εικονοστοιχείων και είναι ενδεικτικές της κατανομής της φωτεινότητας σε μια εικόνα [56]. Συγκεκριμένα, η μήτρα συνεμφάνισης αποτελεί μια καταμέτρηση της συχνότητας εμφάνισης διαφορετικών συνδυασμών τιμών φωτεινότητας (εδώ των επιπέδων κβάντισης p και q) μεταξύ δύο pixel (k,l) και (m,n) εντός μια περιοχής ενδιαφέροντος (ROI) [42].

Ένας πίνακας GLCM είναι πάντα τετραγωνικός. Οι διαστάσεις του είναι $b \times b$, όπου b είναι το εύρος τιμών των εικονοστοιχείων (επίπεδα κβάντισης). Σε αυτόν απαριθμούνται ζεύγη εικονοστοιχείων των οποίων η σχετική θέση περιγράφεται από την μεταξύ τους απόσταση d και τη μεταξύ τους γωνία θ . Για παράδειγμα, το στοιχείο του πίνακα $(1,2)$, αντιστοιχεί στο πλήθος των ζευγών των οποίων οι τιμές είναι 1 και 2 αντίστοιχα. Η εξίσωση από την οποία περιγράφεται η μήτρα GLCM είναι η εξής:

$$GLCM_{\theta}(p, q) = \# \left\{ (k, l), (m, n) \left| \begin{array}{l} m - k = d \cos \theta, n - l = d \sin \theta, \\ I(k, l) = p, I(m, n) = q \end{array} \right. \right\}, \quad (8)$$

$$1 \leq p, q \leq b, \forall \{(k, l), (m, n)\} \in R$$

Δηλαδή, τα χαρακτηριστικά υφής glcm εξαρτώνται χωρικά από τις τιμές της μήτρας υπολογισμού.



Εικόνα 2. 6: Αριθμητικό παράδειγμα κατασκευής GLCM για απόσταση $d=1$ και γωνία $\theta=0^\circ$

Για κάθε κλίμακα r και προσανατολισμό ανάλυσης θ , κατασκευάζονται τέσσερις πίνακες GLCM ένας για κάθε γωνία $\theta=\{0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ\}$ και απόσταση $d=1$. Στην παρούσα εργασία μελετάται η μέση τιμή των τεσσάρων αυτών χαρακτηριστικών με στόχο την ταξινόμηση εικόνων με βάση την υφή, όπως ακριβώς προτείνεται και από τον Massoti [52]:

$$Feature = \sum_{j=1}^4 \frac{Feature(\theta_j)}{4}, \theta_j \in \{0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ\} \quad (9)$$

Μετά την κατασκευή του πίνακα GLCM, ακολουθεί ο υπολογισμός δέκα χαρακτηριστικών υφής, τα οποία εξάγονται μετά τον υπολογισμό των ranklet coefficients και περιγράφονται από τις παρακάτω εξισώσεις [52] [57] [58]:

$$1. \text{ Autocorrelation} \quad \sum_{i=1}^b \sum_{j=1}^b (i * j) GLCM_{\theta}(i, j) \quad (10)$$

$$2. \text{ Cluster Prominence} \quad \sum_{i=1}^b \sum_{j=1}^b ((i - \mu_{x,\theta}) + ((j - \mu_{y,\theta})^4 GLCM_{\theta}(i, j) \quad (11)$$

$$3. \text{ Cluster Shade} \quad \sum_{i=1}^b \sum_{j=1}^b ((i - \mu_{x,\theta}) + ((j - \mu_{y,\theta})^3 GLCM_{\theta}(i, j) \quad (12)$$

$$4. \text{ Contrast (Inertia)} \quad \sum_{i=1}^b \sum_{j=1}^b (i - j)^2 GLCM_{\theta}(i, j) \quad (13)$$

$$5. \text{ Correlation} \quad \frac{\sum_{i=1}^b \sum_{j=1}^b (i - \mu_{x,\theta})(j - \mu_{y,\theta}) GLCM_{\theta}(i, j)}{\sigma_{x,\theta} \sigma_{y,\theta}} \quad (14)$$

$$6. \text{ Dissimilarity} \quad \sum_{i=1}^b \sum_{j=1}^b (i - j) GLCM_{\theta}(i, j) \quad (15)$$

$$7. \text{ Energy} \quad \sum_{i=1}^b \sum_{j=1}^b GLCM_{\theta}(i, j)^2 \quad (16)$$

$$8. \text{ Haralick Correlation} \quad \frac{\sum_{i=1}^b \sum_{j=1}^b (i \cdot j) GLCM_{\theta}(i, j) - (\mu_{x,\theta} \cdot \mu_{y,\theta})}{\sigma_{x,\theta} \sigma_{y,\theta}} \quad (17)$$

$$9. \text{ Homogeneity} \quad \sum_{i=1}^b \sum_{j=1}^b \frac{1}{1 + (i - j)^2} GLCM_{\theta}(i, j) \quad (18)$$

$$10. \text{ Inverse Difference Moment Normalized} \quad \sum_{i=1}^b \sum_{j=1}^b \frac{1}{1 + \frac{(i - j)^2}{b}} GLCM_{\theta}(i, j) \quad (19)$$

όπου $GLCM_{\theta}(i, j)$ το στοιχείο (i, j) του GLCM πίνακα για συγκεκριμένη κλίμακα r , κατεύθυνση θ και γωνία θ ,

$$\begin{aligned} \mu_{x,\theta} &= \sum_{i=1}^b \sum_{j=1}^b i \cdot GLCM_{\theta}(i, j), & \sigma_{x,\theta} &= \sum_{i=1}^b \sum_{j=1}^b (i - \mu_{x,\theta})^2 \cdot GLCM_{\theta}(i, j) \\ \mu_{y,\theta} &= \sum_{i=1}^b \sum_{j=1}^b j \cdot GLCM_{\theta}(i, j), & \sigma_{y,\theta} &= \sum_{i=1}^b \sum_{j=1}^b (j - \mu_{y,\theta})^2 \cdot GLCM_{\theta}(i, j) \end{aligned}$$

2.7 Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση του μετασχηματισμού

Δεδομένου ότι ο μετασχηματισμός ranklet είναι πολυ-κλιμακωτής φύσης πρέπει να ληφθεί υπόψη το πλήθος αλλά και οι τιμές των κλιμάκων που θα επιλεγθούν. Προκειμένου να διατηρηθεί η υπολογιστική ταχύτητα του αλγορίθμου με τον οποίο υπολογίζονται οι συντελεστές ranklet, το μέγεθος του παραθύρου δεν πρέπει να είναι πολύ μεγάλο, επομένως και η τιμή της κλίμακας r . Μεγάλο μέγεθος παραθύρου, επίσης, σημαίνει μεγαλύτερες περιοχές ελέγχου και πειράματος, πράγμα που ενδεχομένως να οδηγήσει σε απώλεια πληροφορίας και μείωση της διακριτικής ικανότητας, αν το μοτίβο υφής είναι τέτοιο που επαναλαμβάνεται ανά περιοχές μεγέθους όσο και το μέγεθος των περιοχών των υποσυνόλων T και C . Ωστόσο, το μέγεθος αυτό δε θα πρέπει να είναι και πολύ μικρό, καθώς σε αυτήν την περίπτωση δε θα μπορεί να εξαχθεί χρήσιμη πληροφορία για την υφή της εικόνας, αν η υφή του παραθύρου ακολουθεί ένα συγκεκριμένο μοτίβο και δεν υπάρχουν μεταβολές. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η κατανομή των διαφορετικών κλιμάκων πρέπει να είναι ομοιόμορφη στο διάστημα που ορίζεται από τη μέγιστη και την ελάχιστη κλίμακα που θα επιλεγθούν, ώστε όλες αυτές συνδυαστικά να περιγράψουν αποτελεσματικά την

υφή της εξεταζόμενης εικόνας. Όσον αφορά το πλήθος των διαφορετικών κλιμάκων, δε χρειάζεται να είναι αρκετά μεγάλο καθώς αυξάνεται το υπολογιστικό κόστος.

Σημαντικό ρόλο στην αποτελεσματική ανάλυση υφής της εικόνας παίζουν οι κατευθύνσεις ως προς τις οποίες γίνεται η ανάλυση. Είναι απαραίτητη, αλλά και επαρκής, η εξαγωγή των συντελεστών τάξης και ως προς τις τρεις κατευθύνσεις (οριζόντια, κατακόρυφη και διαγώνια) για να μην παραλειφθεί κάποια χρήσιμη πληροφορία υφής. Όταν αυτές συνδυαστούν αποδίδουν πληροφορία χρήσιμη ως προς την κατεύθυνση των μεταβολών φωτεινότητας στην περιοχή που εξετάζεται.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΥΛΙΚΟ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί περιγράφεται το απεικονιστικό υλικό που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν (α) οκτώ διαφορετικά είδη συνθετικών εικόνων, που περιλαμβάνουν γεωμετρικά σχήματα κλιμακούμενης φωτεινότητας, για την αξιολόγηση του μετασχηματισμού χρησιμοποιώντας τα χαρακτηριστικά δεύτερης τάξης που εξάγονται, και (β) 94 ακολουθίες εικόνων υπερήχου της καρωτίδας για την εφαρμογή του αλγορίθμου. Οι συνθετικές εικόνες δημιουργήθηκαν με στόχο την εκτίμηση των δυνατοτήτων εφαρμογής του μετασχηματισμού ranklet σε εικόνες υπερήχου καρωτίδας, δεδομένου ότι μέχρι σήμερα δεν έχουν πραγματοποιηθεί σχετικές μελέτες. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα εφαρμογής του φίλτρου ranklet τόσο στις συνθετικές εικόνες, όσο και στις πραγματικές εικόνες Β-σάρωσης του νοσοκομείου «Αττικόν». Αρχικά, εφαρμόζεται ο μετασχηματισμός ranklet στις συνθετικές εικόνες που περιέχουν το ίδιο σχήμα, αλλά παρουσιάζουν διαφορετικό τύπο ορίου σχήματος (απότομη ή σταδιακή μεταβολή φωτεινότητας στα όρια του σχήματος), με στόχο τη σύγκριση των χαρακτηριστικών υφής σε εικόνες με λίγες διαφορές. Έπειτα, συγκρίνονται τα αποτελέσματα εφαρμογής του μετασχηματισμού ranklet σε όλες τις συνθετικές εικόνες διαφορετικών σχημάτων για την αξιολόγηση της ικανότητας του μετασχηματισμού να διακρίνει τα σχήματα. Επίσης, εξάγονται χαρακτηριστικά υφής για το σύνολο των πραγματικών εικόνων υπερήχων, με στόχο τη σύγκριση των αποτελεσμάτων εφαρμογής του μετασχηματισμού στις εικόνες καθαυτές σε σχέση με την εφαρμογή του στις ίδιες εικόνες αφού υποστούν κάποια προεπεξεργασία, με στόχο τη βελτίωση της ποιότητάς της, όπως εξισορρόπηση ιστογράμματος και φίλτρο Gamma. Το ίδιο σύνολο χρησιμοποιείται επιπλέον, για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων εφαρμογής του μετασχηματισμού στην ίδια εικόνα για διαφορετικές τιμές του μεγέθους του παραθύρου ανάλυσης (r) και των επιπέδων κβάντισης (b). Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των χαρακτηριστικών υφής για το σύνολο των πραγματικών εικόνων υπερήχων καρωτίδας με στόχο α) τη σύγκριση χαρακτηριστικών υφής αθηρωματικών πλακών με υψηλή και χαμηλή στένωση και β) τη σύγκριση χαρακτηριστικών υφής αθηρωματικών πλακών που εντοπίζονται στην ίδια καρωτιδική αρτηρία, αφού σε ένα μεγάλο ποσοστό ($54/94 \approx 60\%$) των πραγματικών δεδομένων οι ασθενείς εμφάνιζαν δύο αθηρωματικές πλάκες στην υπό εξέταση καρωτίδα.

Υπενθυμίζεται ότι το σύνολο των πραγματικών εικόνων, στο οποίο γίνεται η ανάλυση υφής, αφορά μόνο την περιοχή της πλάκας και όχι ολόκληρη την καρωτίδα.

Στις περιπτώσεις που δεν εξετάζεται η επίδραση της μεταβολής του πλήθους των επιπέδων κβάντισης (b), και του μεγέθους του παραθύρου ανάλυσης (κλίμακας r), στα χαρακτηριστικά υφής, επιλέγονται 21 επίπεδα κβάντισης ($b=21$) και παράθυρο ανάλυσης 8×8 ($r=8$). Οι τιμές αυτές, προέκυψαν ύστερα από πειραματισμούς στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, καθώς και από μελέτες που έχουν γίνει, σχετικές με την εφαρμογή του μετασχηματισμού ranklet σε εικόνες υπερήχου μαστού και μαστογραφίες. Οι τιμές των συντελεστών ranklet που είναι συνεχείς πραγματικές στο

διάστημα $[-1, +1]$, με 21 επίπεδα κβάντισης, κβαντίζονται στα επίπεδα $\{-1, -0.9, \dots, -0.1, 0, +0.1, \dots, +0.9, +1\}$, ένα κατάλληλο σύνολο για τον υπολογισμό, αργότερα, της μήτρας GLCM, αφού από πειραματισμούς βρέθηκε ότι σε περιοχές με λεία υφή (ομοιόμορφη κατανομή φωτεινότητας) οι τιμές συντελεστών ranklet διέφεραν λιγότερο από 0.1, ενώ σε περιοχές με τραχεία υφή (έντονες αλλαγές φωτεινότητας) οι συντελεστές διέφεραν περισσότερο από 0.15, για το σύνολο κλιμάκων $r=4, 8, 16$ και 32 που μελετήθηκε στην εργασία. Τα αποτελέσματα χαρακτηριστικών υφής αφορούν τους μέσους όρους των χαρακτηριστικών υφής προς τις κατευθύνσεις $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ και 135° και για $d=1$.

3.1 Απεικονιστικά δεδομένα

3.1.1 Συνθετικές εικόνες

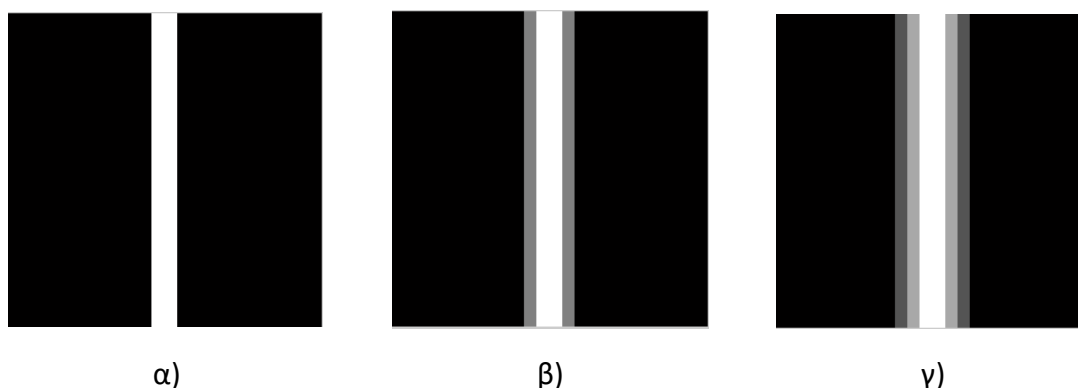
Για την αξιολόγηση του μετασχηματισμού ranklet και την εξαγωγή χαρακτηριστικών υφής δεύτερης τάξης, δημιουργήθηκαν οκτώ εικόνες διαφορετικού σχήματος, πάνω στις οποίες εφαρμόστηκε ο μετασχηματισμός και υπολογίστηκαν χαρακτηριστικά δεύτερης τάξης. Οι εικόνες που κατασκευάστηκαν είχαν ανάλυση 256×256 , καθώς οι πραγματικές εικόνες υπερήχων έχουν μέγεθος περίπου 512×512 , αλλά η περιοχή ενδιαφέροντος συνήθως έχει μέγεθος μικρότερο από 256×256 . Τα είδη συνθετικών εικόνων που δημιουργήθηκαν περιλαμβάνουν τα εξής γεωμετρικά σχήματα:

- Οριζόντια ευθεία
- Κατακόρυφη ευθεία
- Κύκλος
- Δίσκος
- Οριζόντιο ημικύκλιο
- Κατακόρυφο ημικύκλιο
- Οριζόντια ευθεία με ημικύκλιο
- Κατακόρυφη ευθεία με ημικύκλιο

Η δημιουργία συνθετικών εικόνων των παραπάνω ειδών καθοδηγήθηκε από το γεγονός ότι σε διαμήκη τομή υπερήχου η καρωτίδα απεικονίζεται από δύο περίπου οριζόντιες ευθείες που αντιστοιχούν στα τοιχώματά της, εκτός των σημείων διακλαδώσεων, ενώ η αθηρωματική πλάκα απεικονίζεται με καμπύλο σχήμα, αντίστοιχο του ημικυκλίου.

Η δημιουργία των συνθετικών εικόνων πραγματοποιήθηκε στο περιβάλλον Matlab. Για κάθε γεωμετρικό σχήμα από τα παραπάνω, δημιουργήθηκαν τρεις εικόνες με κλιμακούμενη μεταβολή της φωτεινότητας (απότομη και σταδιακή μεταβολή φωτεινότητας στο όριο του γεωμετρικού σχήματος). Στην εικόνα 3.1 φαίνονται οι τρεις εικόνες που αντιστοιχούν στην περίπτωση κατακόρυφης ευθείας. Η πρώτη εικόνα αποτελείται από μια κατακόρυφη ευθεία στις στήλες 118-138 της εικόνας με μέγιστη φωτεινότητα (255), ενώ τα υπόλοιπα εικονοστοιχεία της έχουν την ελάχιστη δυνατή φωτεινότητα (0). Η δεύτερη εικόνα περιλαμβάνει δύο επιπλέον κατακόρυφες ευθείες, μία δεξιά και μία αριστερά της πρώτης ευθείας, με πλάτος ίσο

με το μισό του πλάτους της πρώτης και φωτεινότητα ίση με το μισό της μέγιστης δυνατής (128). Η τρίτη εικόνα περιλαμβάνει τέσσερις επιπλέον κατακόρυφες ευθείες σε σχέση με την πρώτη, με πλάτος ίσο με το μισό του πλάτους της πρώτης. Η φωτεινότητα των ακραίων ευθειών είναι ίση με το ένα τρίτο της μέγιστης δυνατής (85), ενώ των μεσαίων ευθειών είναι ίση με τα δύο τρίτα μέγιστης δυνατής (170). Με ανάλογο τρόπο, προκύπτουν οι εικόνες με απότομη και σταδιακή μεταβολή φωτεινότητας στα όρια του σχήματος και για τα υπόλοιπα σχήματα συνθετικών εικόνων.



Εικόνα 3. 1: Συνθετικές εικόνες κατακόρυφης ευθείας με απότομη και σταδιακή μεταβολή έντασης φωτεινότητας. (α) μία, (β) δύο και (γ) τρεις κατακόρυφες ευθείες διαφορετικής έντασης.

Σκοπός της δημιουργίας εικόνων με απότομη και σταδιακή μεταβολή της φωτεινότητας είναι η μελέτη της εξάρτησης της ικανότητας του μετασχηματισμού να διακρίνει σχήματα ανάλογα με τον τύπο του ορίου του σχήματος.

3.1.2 Εικόνες υπερήχου β-σάρωσης της καρωτίδας

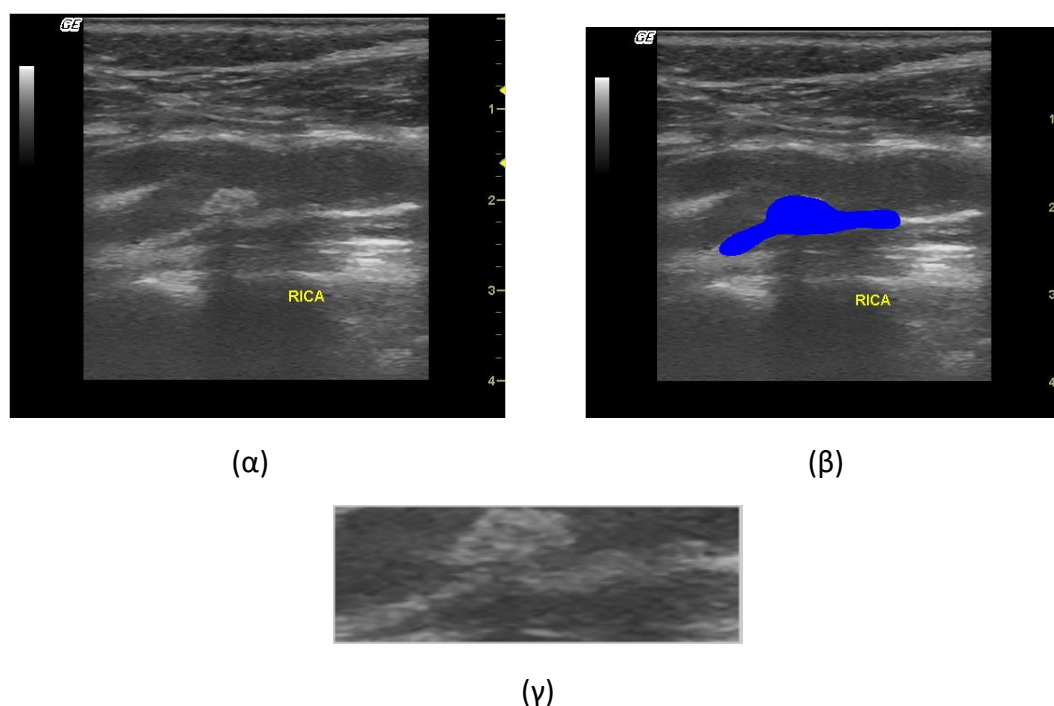
Το σύνολο δεδομένων εικόνων υπερήχου β-σάρωσης της καρωτίδας περιλαμβάνει ακολουθίες εικόνων για 94 περιστατικά αθηρωμάτωσης, εκ των οποίων τα 62 ήταν υψηλής στένωσης, ενώ τα 26 χαμηλής. Για τα υπόλοιπα περιστατικά δεν ήταν γνωστός ο βαθμός στένωσης. Οι ακολουθίες εικόνων καταγράφηκαν στην Αγγειοχειρουργική Κλινική του Πανεπιστημιακού Γενικού Νοσοκομείου «Αττικόν» στην Αθήνα. Η αποθήκευση των απεικονιστικών δεδομένων έγινε σε πρότυπο DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine), το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως για την αποθήκευση, διαχείριση και μεταφορά ιατρικών απεικονιστικών δεδομένων, κυρίως επειδή επιτρέπει τη διασύνδεση, συμβατότητα και βελτιστοποίηση της ροής πληροφορίας σε πληροφοριακά συστήματα υγείας.

Από τη διαδικασία καταγραφής προκύπτουν ακολουθίες εικόνων υπερήχων τόσο Β-σάρωσης, όσο και εικόνες Doppler ή spectral Doppler. Ωστόσο, στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιούνται μόνο Β-mode εικόνες. Οι εικόνες που ανακτώνται περιλαμβάνουν διάφορες περιοχές, δηλαδή την αριστερή έξω καρωτιδική αρτηρία (Left external carotid artery - LECA), δεξιά έξω καρωτιδική αρτηρία (Right external carotid artery - RECA), αριστερή έσω καρωτιδική αρτηρία (Left internal carotid artery

- LICA), δεξιά έσω καρωτιδική αρτηρία (Right internal carotid artery - RICA), και κοινή καρωτιδική αρτηρία (Common carotid artery – CCA).

Για τη λήψη των ακολουθιών εικόνων Β-σάρωσης, οι εξεταζόμενοι τοποθετήθηκαν σε ύπτια θέση και με μια ελαφριά κλίση του κεφαλιού προς τα πίσω και προς την αντίθετη πλευρά της υπό εξέταση καρωτίδας. Πριν ξεκινήσει η διαδικασία του απεικονιστικού ελέγχου, υπήρξε ένα διάστημα ανάπαυσης του ασθενούς διάρκειας τουλάχιστον 5 λεπτών, ώστε να έχουν σταθεροποιηθεί ο καρδιακός ρυθμός και η πίεση του αίματός του. Για την αποφυγή καταγραφής κίνησης που οφείλεται σε παράγοντες διαφορετικούς από τους αιμοδυναμικούς, ο χειριστής κρατούσε την κεφαλή του μηχανήματος υπερήχων όσο πιο σταθερά ήταν δυνατόν και ο εξεταζόμενος κρατούσε όσο μπορούσε την αναπνοή του κατά τη διάρκεια της καταγραφής. Η κεφαλή τοποθετήθηκε με μικρή πίεση στο λαιμό του εξεταζόμενου, ώστε να διασφαλιστούν η μέγιστη δυνατή σταθερότητά της και η ελάχιστη παραμόρφωση του υποκείμενου ιστού. Στο χώρο της εξέτασης διατηρήθηκε σταθερή θερμοκρασία δωματίου (26° C). Σε μια εικόνα Β-σάρωσης η κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των τοιχωμάτων θεωρήθηκε ότι αντιστοιχεί στην διάμετρο του αγγείου.

Στις εικόνες υπερήχου καρωτίδας, η περιοχή ενδιαφέροντος αφορά το τμήμα της καρωτίδας που αντιστοιχεί στην αθηρωματική πλάκα. Επομένως, στην παρούσα εργασία απομονώθηκε το τμήμα της πλάκας από την υπόλοιπη εικόνα. Στην εικόνα 3.2 παρουσιάζεται μια πραγματική εικόνα από τις ακολουθίες Β-σάρωσης, μαζί με την αντίστοιχη υποεικόνα πλάκας που προκύπτει από αυτήν.



Εικόνα 3. 2: Παράδειγμα εικόνας υπερήχου Β-σάρωσης. Ο βαθμός στένωσης της καρωτίδας του συγκεκριμένου παραδείγματος είναι 80%. (α) η εικόνα όπως προκύπτει από την καταγραφή, (β) η ίδια εικόνα με σκιασμένη την περιοχή ενδιαφέροντος (πλάκα) και (γ) η

υποεικόνα της πλάκας, που προκύπτει από την αρχική εικόνα. Ο μετασχηματισμός εφαρμόζεται στην εικόνα (γ).

Πίνακας 3. 1: Ρυθμίσεις της διάταξης υπερήχων για την καταγραφή πραγματικών χρονικών ακολουθιών εικόνων υπερήχων β-σάρωσης της καρωτίδας σε διαμήκη τομή.

Παράμετρος	Ρύθμιση
Τομή	Διαμήκης/Εγκάρσια
Διάρκεια καταγραφής	≥ 3 sec
Κεφαλή	Γραμμική 3-12 MHz
Είδος εικόνων	B-σάρωση
Βάθος	3.5-4 cm
Persistence (Frame Average)	0
Δυναμική περιοχή	75 dB
Χρονική ανάλυση	≥ 30 πλαίσια/s

3.2 Εφαρμογή μετασχηματισμού ranklet σε συνθετικές εικόνες

Σε αυτήν την ενότητα, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του μετασχηματισμού για τις συνθετικές εικόνες που κατασκευάστηκαν στο πλαίσιο αξιολόγησής του. Αρχικά, εξηγούνται οι τιμές των εικόνων RI που προκύπτουν για κάθε κατεύθυνση για τρία από τα είδη των συνθετικών εικόνων. Έπειτα, συγκρίνονται τα αποτελέσματα χαρακτηριστικών υφής, εικόνων που παρουσιάζουν ομοιότητες ως προς το σχήμα και την υφή, και τέλος, συγκρίνονται τα αποτελέσματα χαρακτηριστικών υφής και για τα οκτώ διαφορετικά είδη εικόνων. Η ανάλυση έγινε για παράθυρα μεγέθους 8x8 ($r=8$) και το πλήθος των επιπέδων κβάντισης ορίστηκε ίσο με 21 ($b=21$). Οι συνθετικές εικόνες έχουν μέγεθος 256x256, συνεπώς, οι εικόνες RI που προκύπτουν έχουν μέγεθος 249x249. Σημειώνεται ότι στις εικόνες 3.3, 3.5, 3.7 και 3.8-3.15, που απεικονίζονται οι εικόνες ranklet RI, οι τιμές των RI [-1, +1] έχουν μετατραπεί στην κλίμακα [0, +1] για λόγους οπτικοποίησης. Δηλαδή με γκρι (0.5) δηλώνεται το αντίστοιχο 0 των συντελεστών (όπου δεν υπάρχει κάποια μεταβολή), με λευκό (1) το αντίστοιχο 1 των συντελεστών (όπου υπάρχει κάποια μεταβολή από σκοτεινή σε φωτεινή περιοχή) και με μαύρο (0) το αντίστοιχο -1 των συντελεστών (όπου υπάρχει κάποια μεταβολή από φωτεινή σε σκοτεινή περιοχή).

3.2.1 Συντελεστές ranklet για εικόνες με ευθεία και κύκλο

Κατακόρυφη ευθεία

Στην εικόνα 3.1(α) παρουσιάζεται η εικόνα με την κατακόρυφη ευθεία. Η κατακόρυφη ευθεία εντοπίζεται στις στήλες 118-138. Οι συντελεστές RI, που προκύπτουν για την εικόνα 3.1(α), σε οριζόντιο και διαγώνιο προσανατολισμό ανάλυσης, είναι μηδενικοί. Αυτό είναι αναμενόμενο γιατί η εικόνα αυτή παρουσιάζει μεταβολές μόνο στον οριζόντιο άξονα, οι οποίες υπολογίζονται μόνο από την κατακόρυφη κατεύθυνση χωρισμού του παραθύρου στα σύνολα πειράματος T και ελέγχου C (εικόνα 2.3(α)). Οι συντελεστές κατακόρυφης κατεύθυνσης σε όλες τις γραμμές (οριζόντια σάρωση της μετασχηματισμένης εικόνας RI) στις στήλες (κατακόρυφη σάρωση) 111-117 (δηλαδή στις στήλες που το παράθυρο ανάλυσης

περιλαμβάνει τμήματα της κατακόρυφης ευθείας και της υπόλοιπης εικόνας), παίρνουν θετικές τιμές, και με τον τρόπο αυτόν δηλώνουν τη μεταβολή από σκοτεινή περιοχή σε φωτεινή στην περιοχή αυτή, σύμφωνα με τον τρόπο που ορίζονται τα σύνολα T και C ($[C|T]$). Οι τιμές ανά γραμμή σάρωσης είναι της μορφής του πίνακα 3.2.

Πίνακας 3. 2: Συντελεστές *ranklet* οριζόντιας σάρωσης για την εικόνα με την κατακόρυφη ευθεία (εικόνα 3.1(α)) για τις στήλες 110-118 (αριστερό όριο κατακόρυφης ευθείας)

στήλες	110	111	112	113	114	115	116	117	118
συντελεστές ανά γραμμή σάρωσης	0	0,250	0,500	0,750	1	0,750	0,500	0,250	0

Καθώς το παράθυρο μετατοπίζεται, περιλαμβάνει περισσότερες φωτεινές στήλες, με αποτέλεσμα οι τιμές να αυξάνονται μέχρι την τιμή 1, όπου το σύνολο T είναι εξ ολοκλήρου λευκό και το σύνολο C εξ ολοκλήρου μαύρο. Έπειτα, μειώνονται σταδιακά, καθώς και το σύνολο C αρχίζει να περιλαμβάνει λευκές στήλες, και καταλήγουν στο 0 όταν το παράθυρο έχει μόνο εικονοστοιχεία μέγιστης φωτεινότητας (κατακόρυφη ευθεία). Ανάλογα διαμορφώνονται και οι τιμές των συντελεστών στις στήλες 132-138, με τη διαφορά ότι τώρα οι τιμές είναι αρνητικές, καθώς η μετάβαση γίνεται από φωτεινή περιοχή σε σκοτεινή. Στις υπόλοιπες στήλες οι συντελεστές είναι μηδενικοί αφού δεν εντοπίζεται διαφορά φωτεινότητων στα δύο σύνολα του παραθύρου ανάλυσης. Οι τιμές κάθε γραμμής είναι της μορφής του πίνακα 3.3.

Πίνακας 3. 3: Συντελεστές *ranklet* οριζόντιας σάρωσης για την εικόνα με την κατακόρυφη ευθεία (εικόνα 3.1(α)) για τις στήλες 131-138 (δεξιό όριο κατακόρυφης ευθείας)

στήλες	131	132	133	134	135	136	137	138	139
συντελεστές ανά γραμμή σάρωσης	0	-0,250	-0,500	-0,750	-1	-0,750	-0,500	-0,250	0



(α) RI horizontal



(β) RI vertical



(γ) RI diagonal

Εικόνα 3. 3: Εικόνες *ranklet* RI της κατακόρυφης ευθείας (εικόνα 3.1(α)) για τις τρεις κατευθύνσεις ανάλυσης (οριζόντια, κατακόρυφη και διαγώνια), για κλίμακα $r=8$ και επίπεδα κβάντισης $b=21$. Οι τιμές των εικόνων RI $[-1, +1]$ έχουν μετατραπεί στην κλίμακα $[0, +1]$ για λόγους οπτικοποίησης.

Οριζόντια ευθεία

Στην εικόνα 3.4 παρουσιάζεται η εικόνα με την οριζόντια ευθεία στο μέσο της. Τα αποτελέσματα είναι όμοια με αυτά της κατακόρυφης ευθείας, με τη διαφορά ότι οι μη μηδενικές τιμές συντελεστών ranklet, εντοπίζονται στην οριζόντια κατεύθυνση.



Εικόνα 3. 4: Οριζόντια ευθεία



(α) RI horizontal



(β) RI vertical

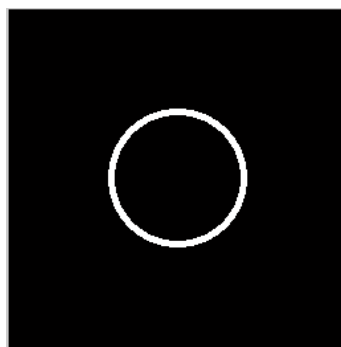


(γ) RI diagonal

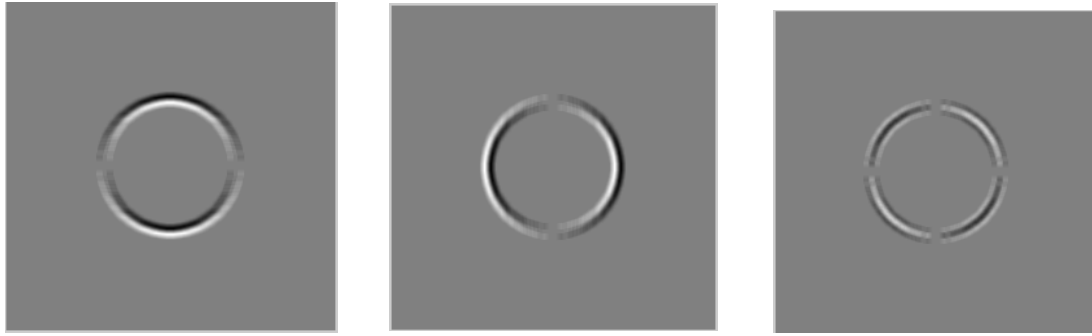
Εικόνα 3. 5: Εικόνες ranklet RI της οριζόντιας ευθείας (εικόνα 3.4) για τις τρεις κατευθύνσεις ανάλυσης (οριζόντια, κατακόρυφη και διαγώνια), για κλίμακα $r=8$ και επίπεδα κβάντισης $b=21$. Οι τιμές των εικόνων RI $[-1, +1]$ έχουν μετατραπεί στην κλίμακα $[0, +1]$ για λόγους οπτικοποίησης.

Κύκλος

Στην εικόνα 3.6 παρουσιάζεται η εικόνα με έναν κύκλο του οποίου το κέντρο ταυτίζεται με το κέντρο της εικόνας. Τα αποτελέσματα προκύπτουν όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις και παρουσιάζονται στη συνέχεια.



Εικόνα 3. 6: Κύκλος



(α) RI horizontal

(β) RI vertical

(γ) RI diagonal

Εικόνα 3. 7: Εικόνες ranklet RI του κύκλου (εικόνα 3.6) για τις τρεις κατευθύνσεις ανάλυσης (οριζόντια, κατακόρυφη και διαγώνια), για κλίμακα $r=8$ και επίπεδα κβάντισης $b=21$. Οι τιμές των εικόνων RI $[-1, +1]$ έχουν μετατραπεί στην κλίμακα $[0, +1]$ για λόγους οπτικοποίησης.

Στην οριζόντια κατεύθυνση ανάλυσης, είναι εμφανή τα σημεία όπου ξεκινά και τερματίζει ο κύκλος, δηλαδή εκεί που υπάρχουν η πρώτη και η δεύτερη έντονη εναλλαγή μαύρου και άσπρου, με λιγότερο έντονες τις εναλλαγές προς τα δεξιά και αριστερά. Το αντίστοιχο συμβαίνει και στις άλλες δύο κατευθύνσεις. Ειδικότερα, για τη διαγώνια διεύθυνση, σύμφωνα με τον τρόπο που ορίζεται το σύνολο πειράματος T (2° και 4° τεταρτημόριο του τετραγωνικού παραθύρου), οι συντελεστές ranklet θα έχουν τιμή κοντά στο $+1$ στις περιοχές του κύκλου που ανήκουν στο 1° και το 3° τεταρτημόριο της εικόνας ranklet, αφού εκεί το σύνολο T είναι καθαρά φωτεινότερο από το σύνολο C .

3.2.2 Διερεύνηση της επίδρασης του τύπου του ορίου του σχήματος (απότομη ή σταδιακή μεταβολή φωτεινότητας)

Αφού παρουσιαστούν όλα τα είδη των εικόνων σε συνδυασμό με τα χαρακτηριστικά υψής που προκύπτουν από αυτές, ακολουθεί στατιστικός έλεγχος για την ανάδειξη στατιστικά σημαντικών διαφορών μεταξύ των εικόνων διαφορετικού τύπου ορίου του σχήματος.

Οριζόντια ευθεία

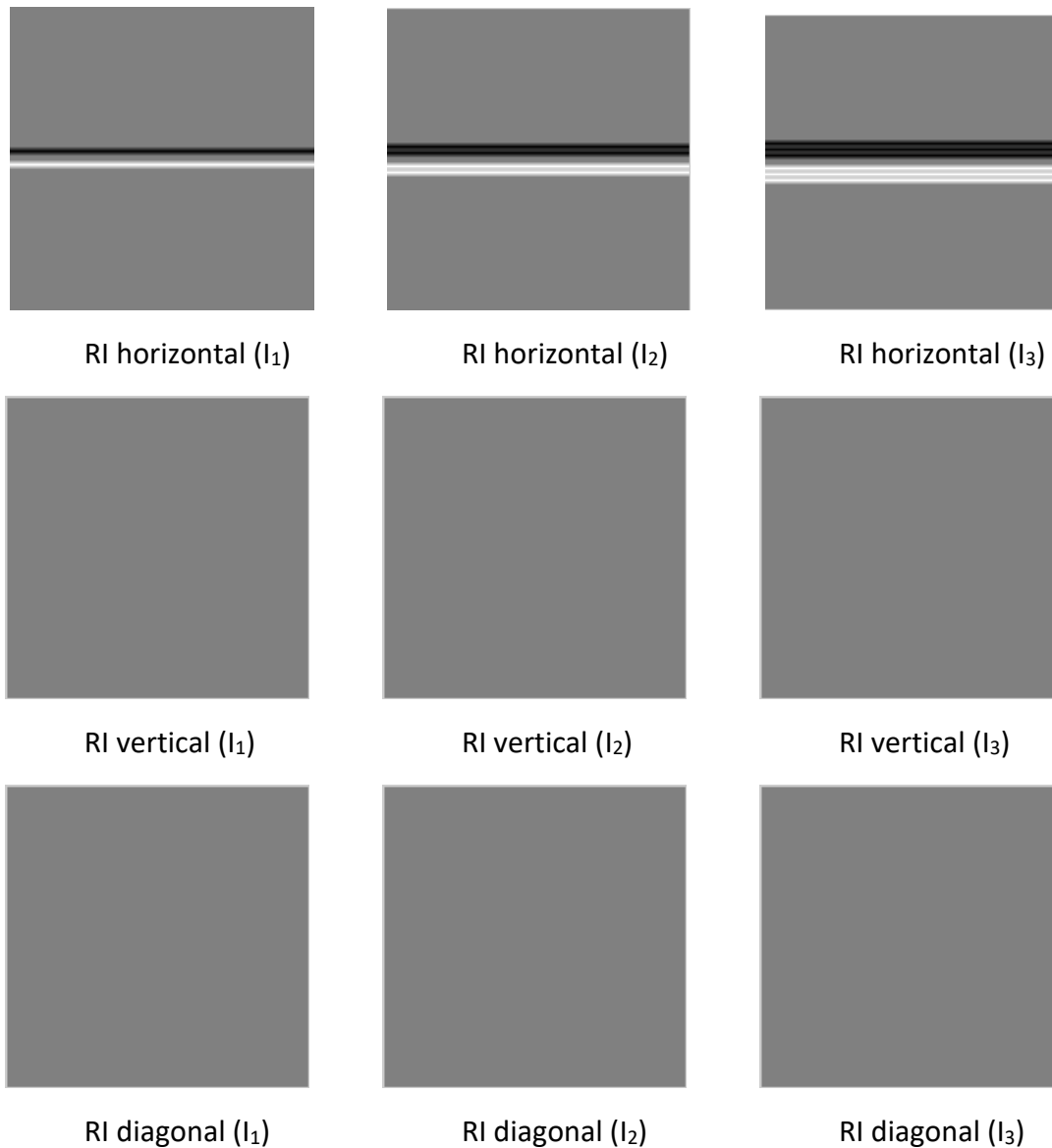
Στην εικόνα 3.8 παρουσιάζονται οι τρεις εικόνες I_1 , I_2 , I_3 , που περιλαμβάνουν μια οριζόντια ευθεία στο μέσο τους, με απότομη και σταδιακή μεταβολή φωτεινότητας.



I_1

I_2

I_3



Εικόνα 3. 8: Οι τρεις εικόνες οριζόντιας ευθείας, με απότομη και σταδιακή μεταβολή φωτεινότητας στα όρια του σχήματος I_1 , I_2 , I_3 , σε συνδυασμό με τις μετασχηματισμένες τους εικόνες ranklet RI για τις τρεις κατευθύνσεις (οριζόντια, κατακόρυφη και διαγώνια), για κλίμακα $r=8$ και επίπεδα κβάντισης $b=21$. Οι τιμές των εικόνων RI $[-1, +1]$ έχουν μετατραπεί στην κλίμακα $[0, +1]$ για λόγους οπτικοποίησης.

Οι συντελεστές ranklet που προκύπτουν για την οριζόντια κατεύθυνση είναι διαφορετικοί. Όσο περισσότερες διακυμάνσεις εντάσεων υπάρχουν, τόσο περισσότερες εναλλαγές φωτεινότητων καταγράφονται. Ωστόσο, είναι εμφανές, από τη μορφή των μετασχηματισμένων εικόνων, ότι η εναλλαγή φωτεινότητας της εικόνας I_1 είναι όμοια με τις εναλλαγές φωτεινότητων των εικόνων I_2 και I_3 . Μια ακόμα διαφορά στις οριζόντιες ευθείες των μετασχηματισμένων εικόνων είναι η θέση τους. Αυτή η διαφορά είναι λογική, αφού στην εικόνα I_2 οι εναλλαγές φωτεινότητας ξεκινούν νωρίτερα σε σχέση με την εικόνα I_1 και η θέση τους είναι διαφορετική. Στον πίνακα 3.4 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά υψής για αυτές τις εικόνες, μόνο για τον οριζόντιο προσανατολισμό ανάλυσης, αφού διαφορές στην κατακόρυφη και διαγώνια κατεύθυνση δεν υπάρχουν (μηδενικοί συντελεστές).

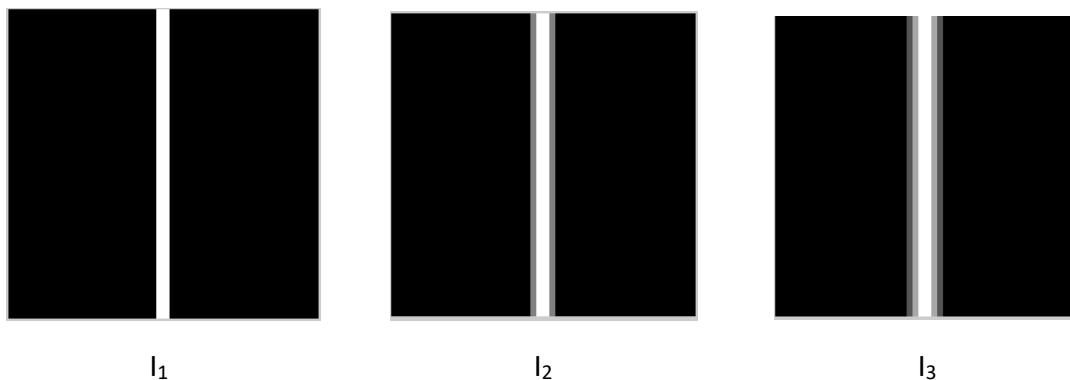
Πίνακας 3. 4: Χαρακτηριστικά υφής για τις τρεις εικόνες οριζόντιας ευθείας με απότομη και σταδιακή μεταβολή φωτεινότητας στα όρια του σχήματος I_1 , I_2 και I_3 (εικόνα 3.8), για την οριζόντια κατεύθυνση, κλίμακα $r=8$ και επίπεδα κβάντισης $b=21$.

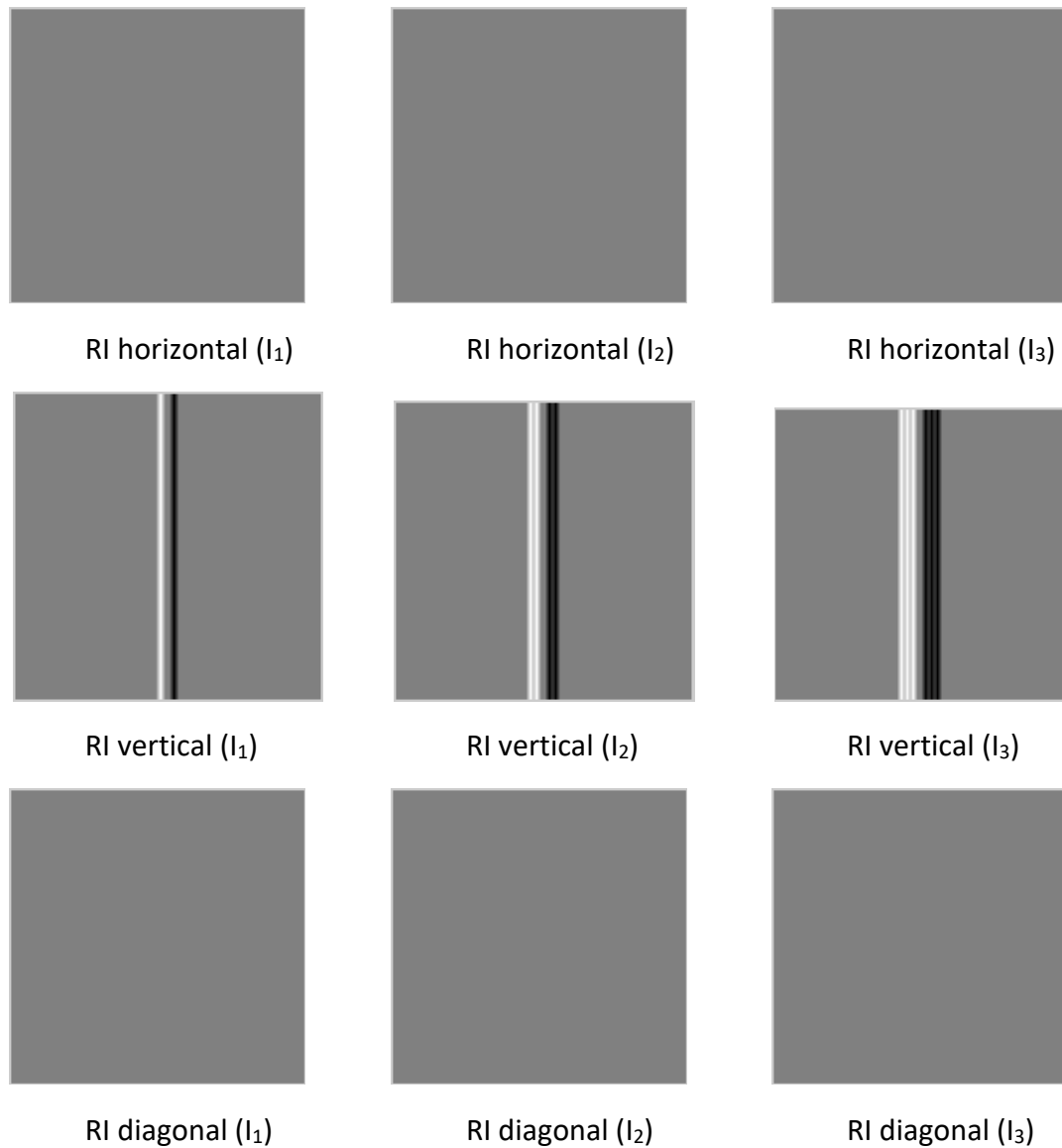
horizontal	I_1	I_2	I_3
Autocorrelation	122,7118	124,7762	126,8406
Cluster Prominence	2049,89	4330,961	6610,765
Cluster Shade	-11,723	-21,5741	-30,5481
Contrast	0,314516	0,423387	0,532258
Correlation	0,92934	0,953203	0,960987
Dissimilarity	0	0	0
Energy	0,879325	0,805788	0,735884
Haralick Correlation	-23875,3	-11728,6	-7765,89
Homogeneity	0,965726	0,950101	0,934476
Inverse_Dif_Normalized	0,988871	0,984846	0,980821

Παρατηρείται ότι τα χαρακτηριστικά υφής των τριών μετασχηματισμένων εικόνων διαφέρουν, πράγμα που είναι λογικό αφού η καθεμία έχει πληροφορία που οι άλλες δεν έχουν. Επειδή για τις εικόνες I_2 και I_3 η μεταβολή της φωτεινότητας στα όρια του σχήματος γίνεται σταδιακά, αλλά κλιμακωτά οι διαφορές των αποτελεσμάτων είναι ανάλογες του πλήθους των σταδιακών μεταβάσεων. Δηλαδή, καθώς προστίθενται κατακόρυφες ευθείες στην εικόνα, επέρχεται ανάλογη αύξηση ή μείωση του καθενός χαρακτηριστικού που μελετάται. Ωστόσο είναι σημαντικές για την πληροφόρηση πως πρόκειται για εικόνες με διαφορετική υφή.

Κατακόρυφη ευθεία

Στην εικόνα 3.9 παρουσιάζονται οι τρεις εικόνες I_1 , I_2 , I_3 , που περιλαμβάνουν μια κατακόρυφη ευθεία στο μέσο τους, με απότομη και σταδιακή μεταβολή φωτεινότητας.





Εικόνα 3. 9: Οι τρεις εικόνες κατακόρυφης ευθείας, με απότομη και σταδιακή μεταβολή φωτεινότητας στα όρια του σχήματος I_1 , I_2 , I_3 , σε συνδυασμό με τις μετασχηματισμένες τους εικόνες ranklet RI για τις τρεις κατευθύνσεις (οριζόντια, κατακόρυφη και διαγώνια), για κλίμακα $r=8$ και επίπεδα κβάντισης $b=21$. Οι τιμές των εικόνων RI $[-1, +1]$ έχουν μετατραπεί στην κλίμακα $[0, +1]$ για λόγους οπτικοποίησης.

Πίνακας 3. 5: Χαρακτηριστικά υψής για τις τρεις εικόνες κατακόρυφης ευθείας με απότομη και σταδιακή μεταβολή φωτεινότητας στα όρια του σχήματος I_1 , I_2 και I_3 (εικόνα 3.9), για την κατακόρυφη κατεύθυνση ανάλυσης, κλίμακα $r=8$ και επίπεδα κβάντισης $b=21$.

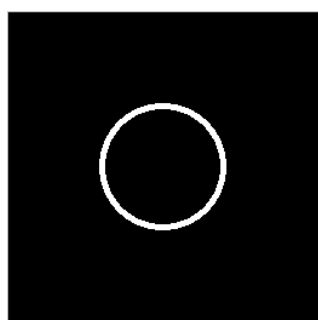
Vertical orientation	I_1	I_2	I_3
Autocorrelation	122,7118	124,7762	126,8406
Cluster Prominence	2049,89	4330,961	6610,765
Cluster Shade	-11,723	-21,5741	-30,5481
Contrast	0,314516	0,423387	0,532258
Correlation	0,92934	0,953203	0,960987
Dissimilarity	0	0	0
Energy	0,879325	0,805788	0,735884

Haralick Correlation	-23875,3	-11728,6	-7765,89
Homogeneity	0,965726	0,950101	0,934476
Inverse_Dif_Normalized	0,988871	0,984846	0,980821

Παρατηρείται, όπως είναι αναμενόμενο, ότι τα χαρακτηριστικά υφής κατακόρυφης κατεύθυνσης της κατακόρυφης ευθείας είναι ίδια με αυτά της οριζόντιας κατεύθυνσης της οριζόντιας ευθείας.

Κύκλος

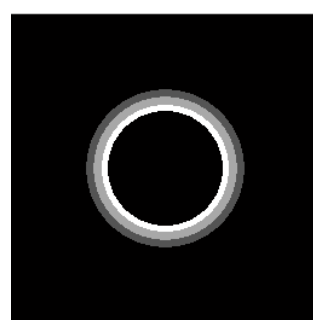
Στην εικόνα 3.10 παρουσιάζονται οι τρεις εικόνες I_1 , I_2 , I_3 , που περιλαμβάνουν έναν κύκλο, με απότομη και σταδιακή μεταβολή φωτεινότητας.



I_1



I_2



I_3



RI horizontal (I_1)



RI horizontal (I_2)



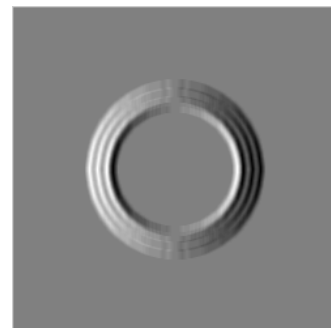
RI horizontal (I_3)



RI vertical (I_1)



RI vertical (I_2)



RI vertical (I_3)



RI diagonal (I_1)



RI diagonal (I_2)



RI diagonal (I_3)

Εικόνα 3. 10: Οι τρεις εικόνες κύκλου, με απότομη και σταδιακή μεταβολή φωτεινότητας στα όρια του σχήματος I_1 , I_2 , I_3 , σε συνδυασμό με τις μετασχηματισμένες τους εικόνες ranklet RI για τις τρεις κατευθύνσεις (οριζόντια, κατακόρυφη και διαγώνια), για κλίμακα $r=8$ και επίπεδα κβάντισης $b=21$. Οι τιμές των εικόνων RI $[-1, +1]$ έχουν μετατραπεί στην κλίμακα $[0, +1]$ για λόγους οπτικοποίησης.

Πίνακας 3. 6: Χαρακτηριστικά υφής για τις τρεις εικόνες κύκλου με απότομη και σταδιακή μεταβολή φωτεινότητας στα όρια του σχήματος I_1 , I_2 και I_3 (εικόνα 3.10), για τις τρεις κατευθύνσεις (οριζόντια, κατακόρυφη και διαγώνια), κλίμακα $r=8$ και επίπεδα κβάντισης $b=21$.

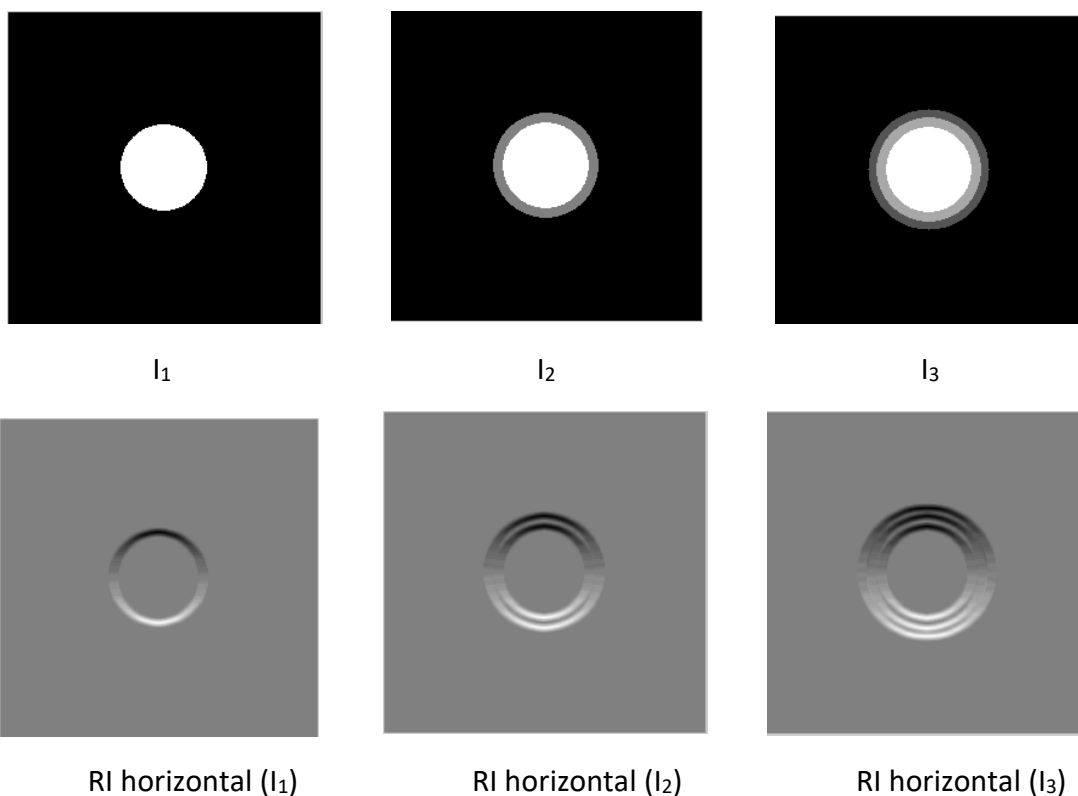
Horizontal			
	I_1	I_2	I_3
Autocorrelation	121,9138	122,6773	123,4947
Cluster Prominence	670,9315	1153,004	1705,432
Cluster Shade	-1,10076	-1,18734	-2,07245
Contrast	0,203135	0,25806	0,302317
Correlation	0,904844	0,930211	0,944564
Dissimilarity	$1,68 \times 10^{-18}$	$-2,76 \times 10^{-18}$	$-2,75 \times 10^{-18}$
Energy	0,871787	0,796563	0,727197
Haralick Correlation	-49888	-28803	-19523,3
Homogeneity	0,973329	0,962521	0,951816
Inverse_Dif_Normalized	0,993664	0,991661	0,989907
Vertical			
	I_1	I_2	I_3
Autocorrelation	121,9138	122,6773	123,4947
Cluster Prominence	670,9315	1153,004	1705,432
Cluster Shade	-1,10076	-1,18734	-2,07245
Contrast	0,203135	0,25806	0,302317
Correlation	0,904844	0,930211	0,944564
Dissimilarity	$6,78 \times 10^{-19}$	$2,85 \times 10^{-19}$	$1,71 \times 10^{-18}$
Energy	0,871787	0,796563	0,727197
Haralick Correlation	-49888	-28803	-19523,3
Homogeneity	0,973329	0,962521	0,951816
Inverse_Dif_Normalized	0,993664	0,991661	0,989907
Diagonal			
	I_1	I_2	I_3

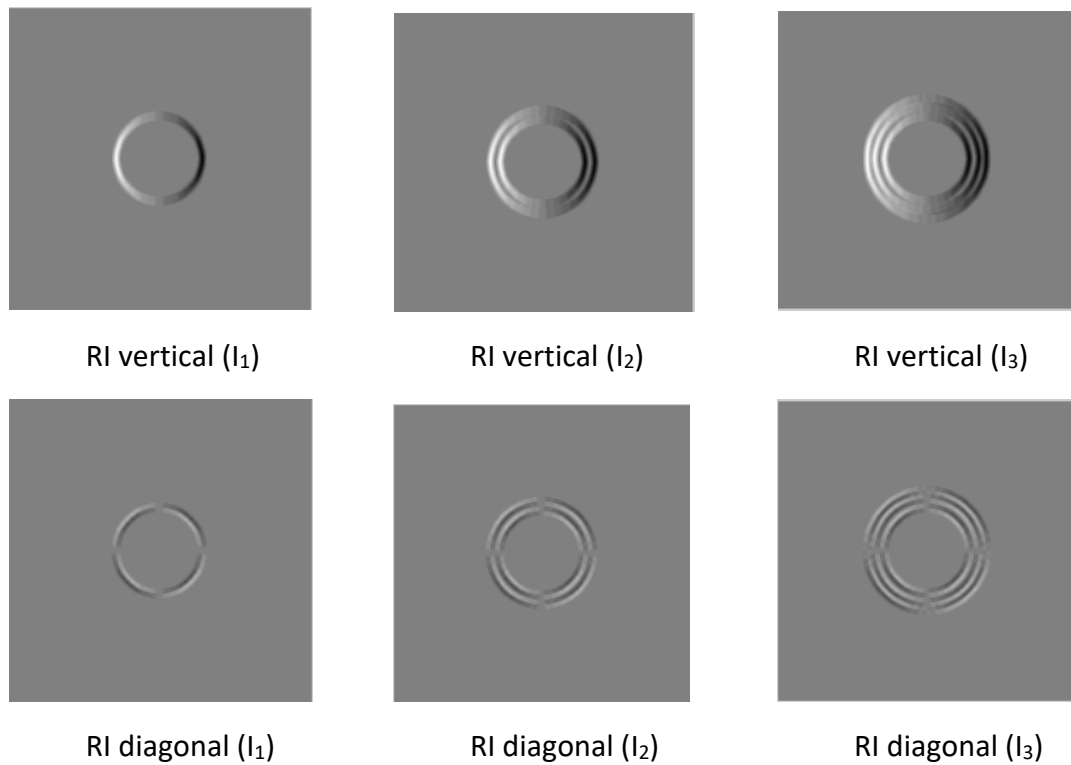
Autocorrelation	121,2497	121,3379	121,3769
Cluster Prominence	69,9872	82,73474	89,22097
Cluster Shade	-0,28484	-0,23084	-0,34588
Contrast	0,121946	0,199924	0,274736
Correlation	0,829665	0,79216	0,763867
Dissimilarity	$1,15 \times 10^{-18}$	$1,96 \times 10^{-18}$	$-2,16 \times 10^{-18}$
Energy	0,873698	0,803405	0,741426
Haralick Correlation	-148758	-110718	-91518,2
Homogeneity	0,976559	0,963125	0,949141
Inverse_Dif_Normalized	0,995575	0,992802	0,990055

Σε αυτήν την περίπτωση, παρατηρείται ότι λόγω συμμετρίας του κύκλου τα χαρακτηριστικά υφής της οριζόντιας και της κατακόρυφης κατεύθυνσης, για κάθε εικόνα χωριστά, είναι ίδια. Συνεπώς, συνδυαστικά, μπορούν να δώσουν πολύ σημαντική πληροφορία για το είδος της εικόνας και την υφή της.

Δίσκος

Στην εικόνα 3.11 παρουσιάζονται οι τρεις εικόνες I_1 , I_2 , I_3 , που περιλαμβάνουν ένα δίσκο, με απότομη και σταδιακή μεταβολή φωτεινότητας.





Εικόνα 3. 11: Οι τρεις εικόνες δίσκου, με απότομη και σταδιακή μεταβολή φωτεινότητας στα όρια του σχήματος I_1 , I_2 , I_3 , σε συνδυασμό με τις μετασχηματισμένες τους εικόνες ranklet RI για τις τρεις κατευθύνσεις (οριζόντια, κατακόρυφη και διαγώνια), για κλίμακα $r=8$ και επίπεδα κβάντισης $b=21$. Οι τιμές των εικόνων RI $[-1, +1]$ έχουν μετατραπεί στην κλίμακα $[0, +1]$ για λόγους οπτικοποίησης.

Πίνακας 3. 7: Χαρακτηριστικά υφής για τις τρεις εικόνες δίσκου με απότομη και σταδιακή μεταβολή φωτεινότητας στα όρια του σχήματος I_1 , I_2 και I_3 (εικόνα 3.11), για τις τρεις κατευθύνσεις (οριζόντια, κατακόρυφη και διαγώνια), κλίμακα $r=8$ και επίπεδα κβάντισης $b=21$.

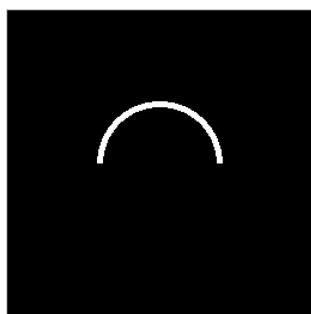
Horizontal			
	I_1	I_2	I_3
Autocorrelation	121,3916	121,9039	122,5095
Cluster Prominence	271,1083	603,9855	1015,384
Cluster Shade	-0,54443	-0,76891	-1,41695
Contrast	0,052735	0,104998	0,147674
Correlation	0,940508	0,94738	0,955405
Dissimilarity	$8,13 \times 10^{-20}$	$2,71 \times 10^{-20}$	$-1,57 \times 10^{-18}$
Energy	0,938919	0,872731	0,814544
Haralick Correlation	-120169	-53375,5	-32154
Homogeneity	0,988926	0,978606	0,969775
Inverse_Dif_Normalized	0,99798	0,995992	0,994359
Vertical			
	I_1	I_2	I_3
Autocorrelation	121,3916	121,9039	122,5095
Cluster Prominence	271,1083	603,9855	1015,384
Cluster Shade	-0,54443	-0,76891	-1,41695

Contrast	0,052735	0,104998	0,147674
Correlation	0,940508	0,94738	0,955405
Dissimilarity	$1,08 \times 10^{-19}$	$2,03 \times 10^{-19}$	$-1,36 \times 10^{-19}$
Energy	0,938919	0,872731	0,814544
Haralick Correlation	-120169	-53375,5	-32154
Homogeneity	0,988926	0,978606	0,969775
Inverse_Dif_Normalized	0,99798	0,995992	0,994359
Diagonal			
	I_1	I_2	I_3
Autocorrelation	121,0572	121,1176	121,1606
Cluster Prominence	8,239624	16,42502	23,70072
Cluster Shade	-0,11903	-0,23855	-0,35979
Contrast	0,03937	0,092525	0,154479
Correlation	0,796967	0,77626	0,746826
Dissimilarity	$4,88 \times 10^{-19}$	$-1,90 \times 10^{-19}$	$1,06 \times 10^{-18}$
Energy	0,941661	0,877298	0,824926
Haralick Correlation	-549323	-257535	-174507
Homogeneity	0,990474	0,979624	0,9689
Inverse_Dif_Normalized	0,998476	0,996457	0,994235

Και σε αυτήν την περίπτωση, παρατηρείται ότι λόγω συμμετρίας του δίσκου, τα χαρακτηριστικά υφής της οριζόντιας και της κατακόρυφης κατεύθυνσης, για κάθε εικόνα χωριστά, είναι ίδια.. Συνεπώς, συνδυαστικά, μπορούν να δώσουν πολύ σημαντική πληροφορία για το είδος της εικόνας και την υφή της.

Οριζόντιο ημικύκλιο

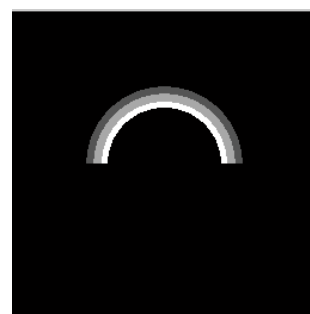
Στην εικόνα 3.12 παρουσιάζονται οι τρεις εικόνες I_1 , I_2 , I_3 , που περιλαμβάνουν το άνω μισό ενός κύκλου, με απότομη και σταδιακή μεταβολή φωτεινότητας.



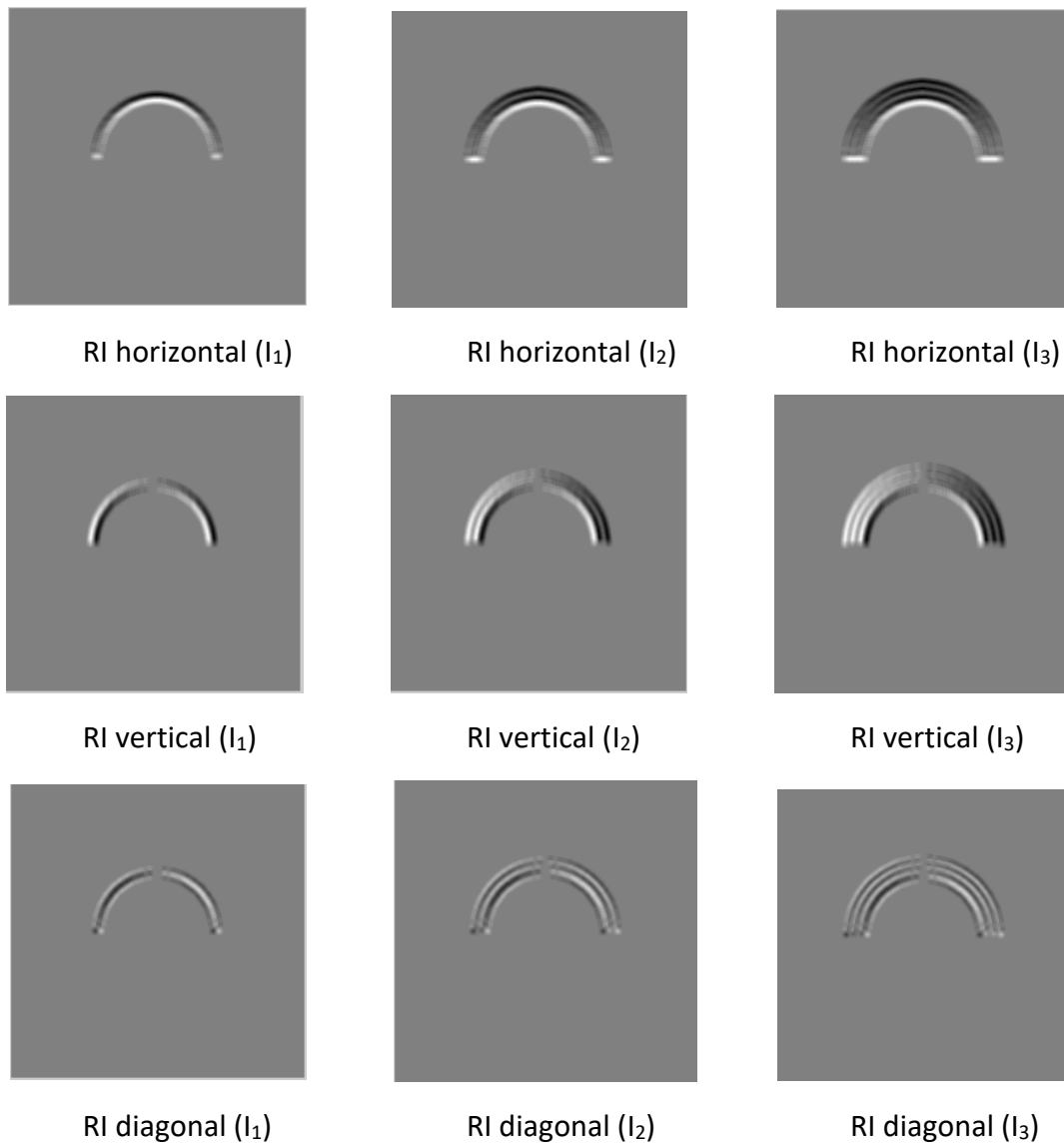
I_1



I_2



I_3



Εικόνα 3. 12: Οι τρεις εικόνες οριζόντιου ημικυκλίου, με απότομη και σταδιακή μεταβολή φωτεινότητας στα όρια του σχήματος l_1 , l_2 , l_3 , σε συνδυασμό με τις μετασχηματισμένες τους εικόνες ranklet RI για τις τρεις κατευθύνσεις (οριζόντια, κατακόρυφη και διαγώνια), για κλίμακα $r=8$ και επίπεδα κβάντισης $b=21$. Οι τιμές των εικόνων RI $[-1, +1]$ έχουν μετατραπεί στην κλίμακα $[0, +1]$ για λόγους οπτικοποίησης.

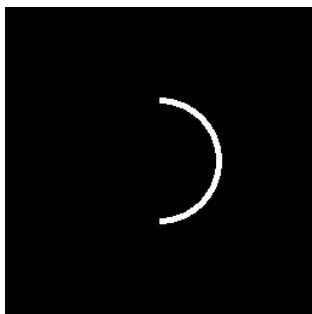
Πίνακας 3. 8: Χαρακτηριστικά υφής για τις τρεις εικόνες οριζόντιου ημικυκλίου με απότομη και σταδιακή μεταβολή φωτεινότητας στα όρια του σχήματος l_1 , l_2 και l_3 (εικόνα 3.12), για τις τρεις κατευθύνσεις (οριζόντια, κατακόρυφη και διαγώνια), κλίμακα $r=8$ και επίπεδα κβάντισης $b=21$.

Horizontal			
	l_1	l_2	l_3
Autocorrelation	121,4711	120,5528	119,3774
Cluster Prominence	340,9055	627,2172	929,9565
Cluster Shade	-1,2163	-13,4111	-28,6181
Contrast	0,105602	0,143367	0,174556
Correlation	0,904979	0,928406	9,41E-01

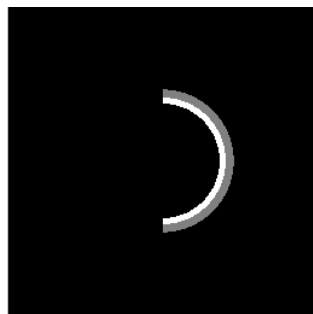
Dissimilarity	$-5,42 \times 10^{-20}$	$-3,66 \times 10^{-18}$	$-1,63 \times 10^{-18}$
Energy	0,929277	0,888043	0,848836
Haralick Correlation	-95845,1	-52599,9	-35007,2
Homogeneity	0,985508	0,979215	0,973044
Inverse_Dif_Normalized	0,996659	0,995319	0,994133
Vertical			
	l_1	l_2	l_3
Autocorrelation	121,4368	121,792	122,1786
Cluster Prominence	290,2087	503,0758	750,1915
Cluster Shade	-0,3183	-0,3564	-0,73000
Contrast	0,096761	0,122039	0,143226
Correlation	0,904216	0,929915	0,944266
Dissimilarity	$8,61 \times 10^{-19}$	$2,11 \times 10^{-18}$	$2,17 \times 10^{-18}$
Energy	0,932375	0,892205	0,854496
Haralick Correlation	-105452	-61177,1	-41447,2
Homogeneity	0,986213	0,980689	0,975295
Inverse_Dif_Normalized	0,996908	0,995953	0,995106
Diagonal			
	l_1	l_2	l_3
Autocorrelation	121,1327	121,1775	121,1991
Cluster Prominence	36,81179	43,24158	46,65245
Cluster Shade	-0,15905	-0,13882	-0,19753
Contrast	0,065202	0,104313	0,14219
Correlation	0,829425	0,795002	0,768256
Dissimilarity	$-1,19 \times 10^{-19}$	$-8,30 \times 10^{-19}$	$8,78 \times 10^{-19}$
Energy	0,930717	0,892755	0,858102
Haralick Correlation	-278661	-209330	-173587
Homogeneity	0,987186	0,980243	0,973042
Inverse_Dif_Normalized	0,997615	0,996218	0,994824

Κατακόρυφο ημικύκλιο

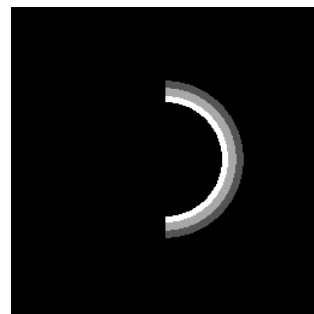
Στην εικόνα 3.13 παρουσιάζονται οι τρεις εικόνες l_1 , l_2 , l_3 , που περιλαμβάνουν το δεξί μισό ενός κύκλου, με απότομη και σταδιακή μεταβολή φωτεινότητας.



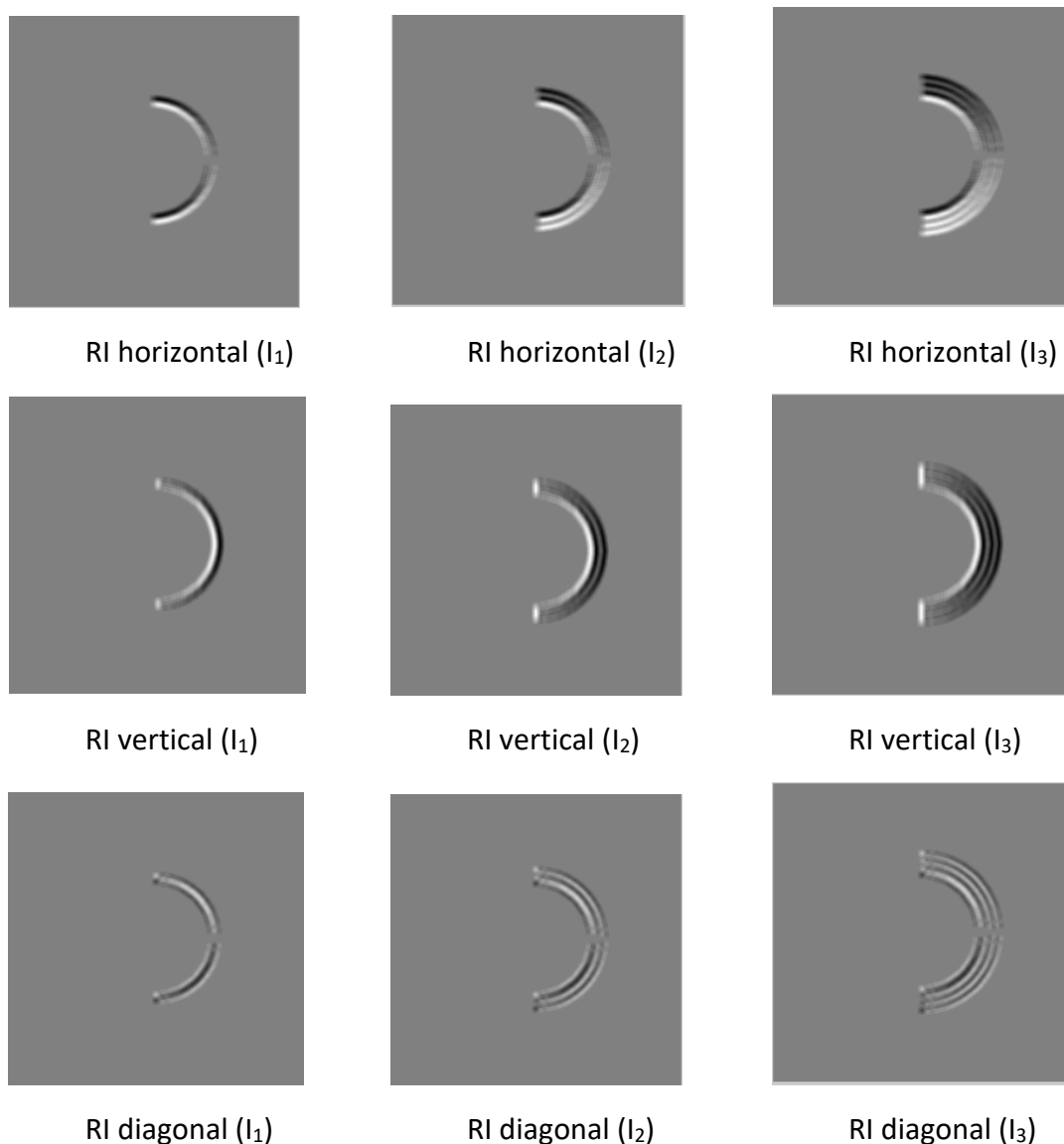
l_1



l_2



l_3



Εικόνα 3. 13: Οι τρεις εικόνες κατακόρυφου ημικυκλίου, με απότομη και σταδιακή μεταβολή φωτεινότητας στα όρια του σχήματος I_1 , I_2 , I_3 , σε συνδυασμό με τις μετασχηματισμένες τους εικόνες ranklet RI για τις τρεις κατευθύνσεις (οριζόντια, κατακόρυφη και διαγώνια), για κλίμακα $r=8$ και επίπεδα κβάντισης $b=21$. Οι τιμές των εικόνων RI $[-1, +1]$ έχουν μετατραπεί στην κλίμακα $[0, +1]$ για λόγους οπτικοποίησης.

Πίνακας 3. 9: Χαρακτηριστικά υψής για τις τρεις εικόνες κατακόρυφου ημικυκλίου με απότομη και σταδιακή μεταβολή φωτεινότητας στα όρια του σχήματος I_1 , I_2 και I_3 (Εικόνα 3.13), για τις τρεις κατευθύνσεις (οριζόντια, κατακόρυφη και διαγώνια), κλίμακα $r=8$ και επίπεδα κβάντισης $b=21$.

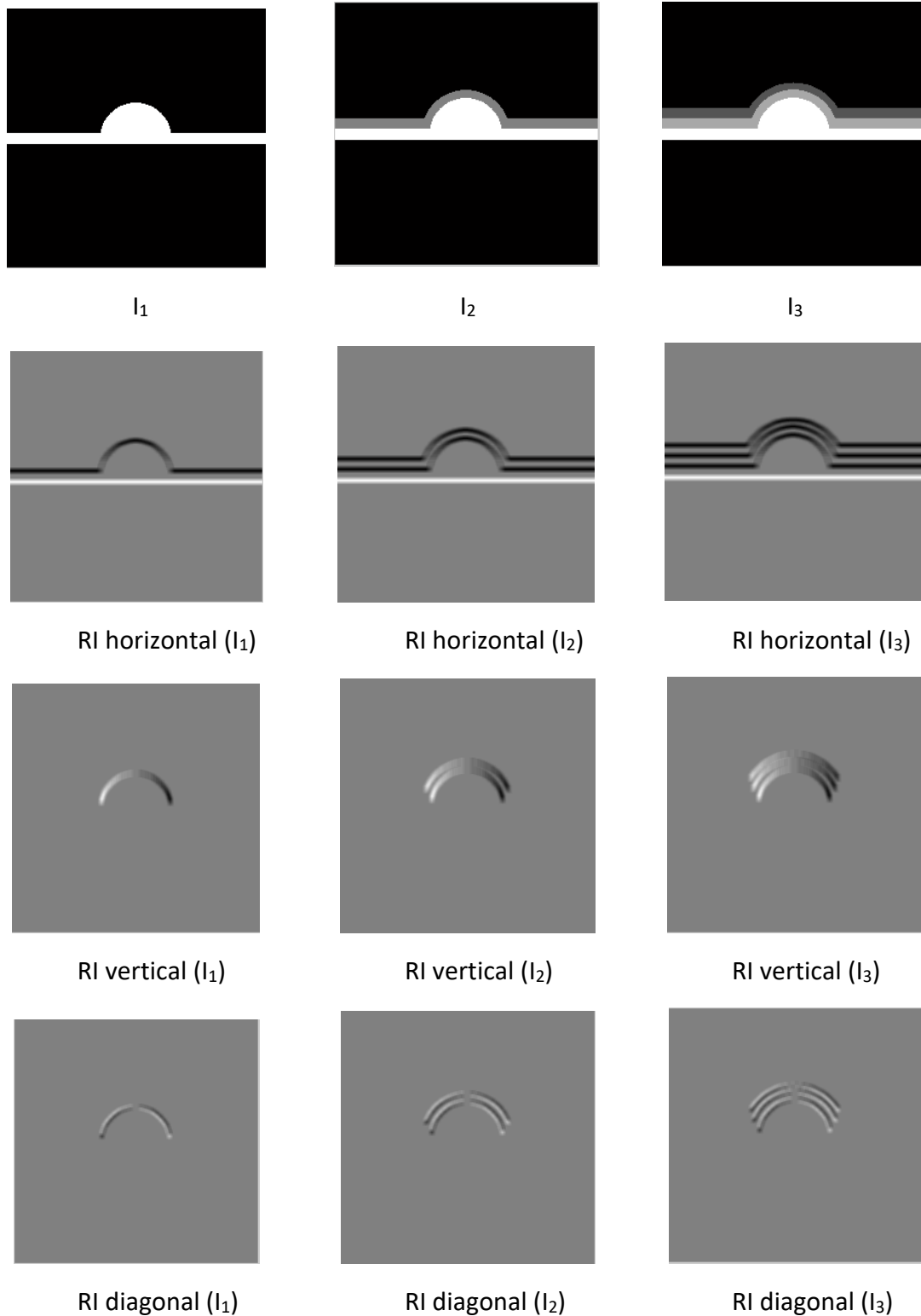
Horizontal			
	I_1	I_2	I_3
Autocorrelation	121,4368	121,792	122,1786
Cluster Prominence	290,2087	503,0758	750,1915
Cluster Shade	-0,3183	-0,3564	-0,73000
Contrast	0,096761	0,122039	0,143226
Correlation	0,904216	0,929915	0,944266

Dissimilarity	-4,40 x10 ⁻²⁰	1,21 x10 ⁻¹⁸	2,44 x10 ⁻¹⁹
Energy	0,932375	0,892205	0,854496
Haralick Correlation	-105452	-61177,1	-41447,2
Homogeneity	0,986213	0,980689	0,975295
Inverse_Dif_Normalized	0,996908	0,995953	0,995106
Vertical			
	l_1	l_2	l_3
Autocorrelation	121,4711	120,5528	119,3774
Cluster Prominence	340,9055	627,2172	929,9565
Cluster Shade	-1,2200	-13,4000	-28,6000
Contrast	0,1056	0,1434	0,1746
Correlation	0,9050	0,9284	0,9412
Dissimilarity	-7,52 x10 ⁻¹⁹	-1,17 x10 ⁻¹⁸	-6,10 x10 ⁻²⁰
Energy	0,9293	0,8880	0,8488
Haralick Correlation	-95845,100	-52599,900	-35007,200
Homogeneity	0,9855	0,9792	0,9730
Inverse_Dif_Normalized	0,9967	0,9953	0,9941
Diagonal			
	l_1	l_2	l_3
Autocorrelation	121,1327	121,1775	121,1991
Cluster Prominence	36,81179	43,24158	46,65245
Cluster Shade	-0,15905	-0,13882	-0,19753
Contrast	0,065202	0,104313	0,14219
Correlation	0,829425	0,795002	0,768256
Dissimilarity	8,84 x10 ⁻¹⁹	-4,57 x10 ⁻¹⁹	1,26 x10 ⁻¹⁸
Energy	0,930717	0,892755	0,858102
Haralick Correlation	-278661	-209330	-173587
Homogeneity	0,987186	0,980243	0,973042
Inverse_Dif_Normalized	0,997615	0,996218	0,994824

Όπως είναι αναμενόμενο, παρατηρείται ότι, στις περιπτώσεις των δύο ημικυκλίων τα αποτελέσματα χαρακτηριστικών υφής των διαγώνιων κατευθύνσεων είναι μεταξύ τους ίδια, ενώ τα αποτελέσματα χαρακτηριστικών υφής της οριζόντιας κατεύθυνσης του ενός ημικυκλίου είναι ίδια με αυτά της κατακόρυφης κατεύθυνσης του άλλου.

Οριζόντια ευθεία με ημικύκλιο

Στην εικόνα 3.14 παρουσιάζονται οι τρεις εικόνες l_1 , l_2 , l_3 , που περιλαμβάνουν μια οριζόντια ευθεία και το άνω μισό ενός κύκλου, με απότομη και σταδιακή μεταβολή φωτεινότητας.



Εικόνα 3. 14: Οι τρεις εικόνες οριζόντιας γραμμής με ημικύκλιο, με απότομη και σταδιακή μεταβολή φωτεινότητας στα όρια του σχήματος I_1 , I_2 , I_3 , σε συνδυασμό με τις μετασχηματισμένες τους εικόνες ranklet RI για τις τρεις κατευθύνσεις (οριζόντια, κατακόρυφη και διαγώνια), για κλίμακα $r=8$ και επίπεδα κβάντισης $b=21$. Οι τιμές των εικόνων RI $[-1, +1]$ έχουν μετατραπεί στην κλίμακα $[0, +1]$ για λόγους οπτικοποίησης.

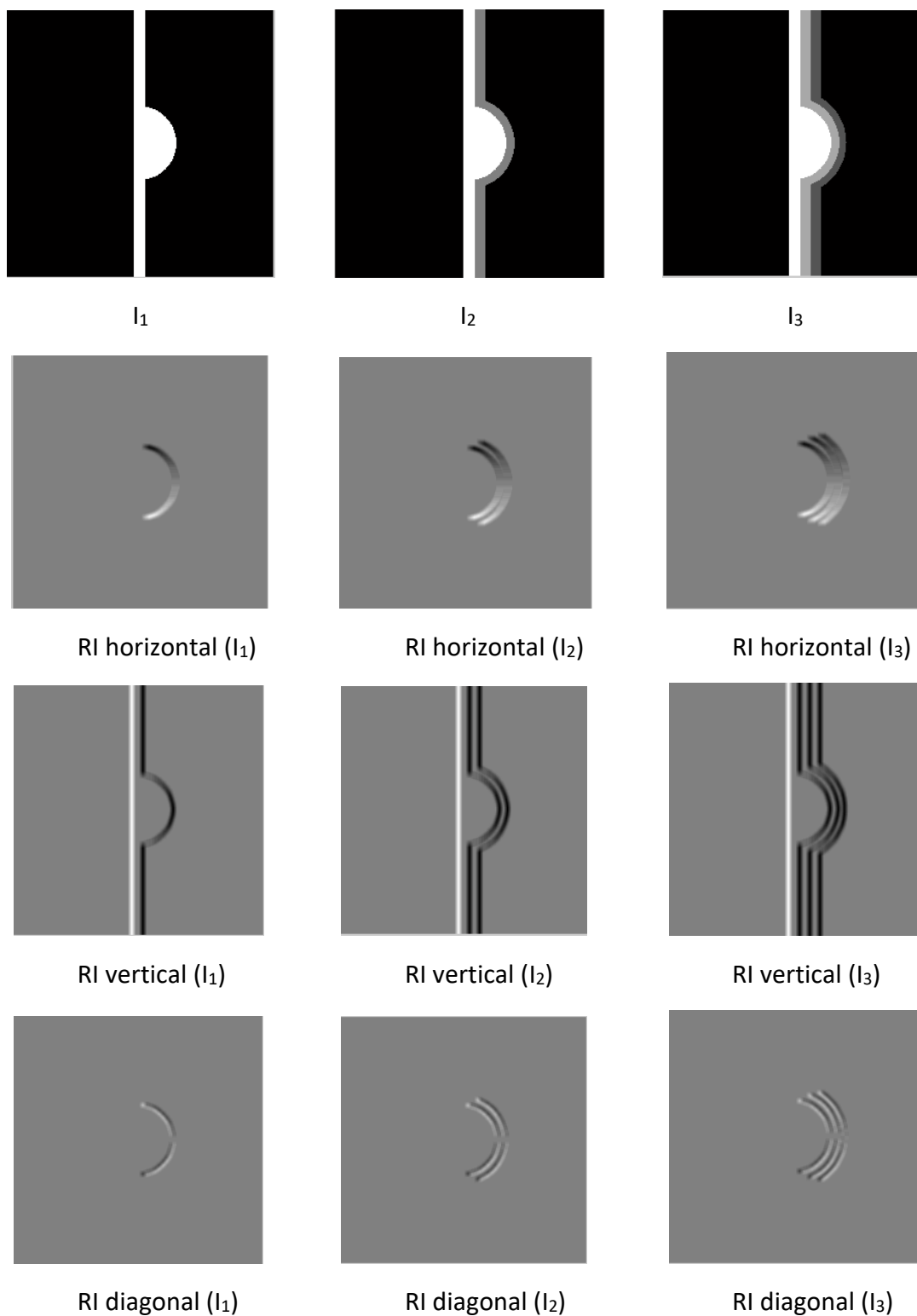
Πίνακας 3. 10: Χαρακτηριστικά υφής για τις τρεις εικόνες οριζόντιας γραμμής με ημικύκλιο με απότομη και σταδιακή μεταβολή φωτεινότητας στα όρια του σχήματος I_1 , I_2 και I_3 (εικόνα

3.14), για τις τρεις κατευθύνσεις (οριζόντια, κατακόρυφη και διαγώνια), κλίμακα $r=8$ και επίπεδα κβάντισης $b=21$.

Horizontal			
	l_1	l_2	l_3
Autocorrelation	122,6391	119,9688	117,3528
Cluster Prominence	1851,291	2705,426	3439,188
Cluster Shade	-1,59626	-48,9062	-89,4443
Contrast	0,295678	0,426646	0,549179
Correlation	0,929855	0,932282	0,93387
Dissimilarity	$3,90 \times 10^{-18}$	$4,88 \times 10^{-19}$	$1,63 \times 10^{-18}$
Energy	0,868227	0,805259	0,750105
Haralick Correlation	-25218	-16362	-12035,6
Homogeneity	0,964921	0,948398	0,933099
Inverse_Dif_Normalized	0,989452	0,984755	0,980359
Vertical			
	l_1	l_2	l_3
Autocorrelation	121,1429	121,2625	121,3596
Cluster Prominence	76,65624	127,5326	157,981
Cluster Shade	-0,15634	-0,31053	-0,37796
Contrast	0,019653	0,030312	0,034687
Correlation	0,939644	0,949595	0,95777
Dissimilarity	$3,90 \times 10^{-20}$	$-1,68 \times 10^{-19}$	$1,69 \times 10^{-21}$
Energy	0,970548	0,943965	0,923362
Haralick Correlation	-327164	-177130	-129671
Homogeneity	0,995011	0,991885	0,989942
Inverse_Dif_Normalized	0,99922	0,998784	0,998587
Diagonal			
	l_1	l_2	l_3
Autocorrelation	121,0313	121,0572	121,078
Cluster Prominence	4,974624	9,644424	12,95671
Cluster Shade	-0,0711	-0,15159	-0,1884
Contrast	0,020895	0,045548	0,070364
Correlation	0,804822	0,785411	0,759832
Dissimilarity	$1,56 \times 10^{-19}$	$8,03 \times 10^{-19}$	$-6,17 \times 10^{-19}$
Energy	0,970711	0,944409	0,924343
Haralick Correlation	-995077	-501821	-363540
Homogeneity	0,994902	0,990036	0,985942
Inverse_Dif_Normalized	0,999189	0,998267	0,997387

Κατακόρυφη ευθεία με ημικύκλιο

Στην εικόνα 3.15 παρουσιάζονται οι τρεις εικόνες l_1 , l_2 , l_3 , που περιλαμβάνουν μια κατακόρυφη ευθεία και το δεξί μισό ενός κύκλου στο κέντρο τους, με απότομη και σταδιακή μεταβολή φωτεινότητας.



Εικόνα 3. 15: Οι τρεις εικόνες κατακόρυφης γραμμής με ημικύκλιο, με απότομη και σταδιακή μεταβολή φωτεινότητας στα όρια του σχήματος I_1 , I_2 , I_3 , σε συνδυασμό με τις μετασχηματισμένες τους εικόνες ranklet RI για τις τρεις κατευθύνσεις (οριζόντια, κατακόρυφη και διαγώνια), για κλίμακα $r=8$ και επίπεδα κβάντισης $b=21$. Οι τιμές των εικόνων RI $[-1, +1]$ έχουν μετατραπεί στην κλίμακα $[0, +1]$ για λόγους οπτικοποίησης.

Πίνακας 3. 11: Χαρακτηριστικά υφής για τις τρεις εικόνες κατακόρυφης γραμμής με ημικύκλιο με απότομη και σταδιακή μεταβολή φωτεινότητας στα όρια του σχήματος I_1 , I_2 και I_3 (εικόνα

3.15), για τις τρεις κατευθύνσεις (οριζόντια, κατακόρυφη και διαγώνια), κλίμακα $r=8$ και επίπεδα κβάντισης $b=21$.

Horizontal			
	l_1	l_2	l_3
Autocorrelation	121,1429	121,2625	121,3596
Cluster Prominence	76,65624	127,5326	157,981
Cluster Shade	-0,15634	-0,31053	-0,37796
Contrast	0,019653	0,030312	0,034687
Correlation	0,939644	0,949595	0,95777
Dissimilarity	$2,05 \times 10^{-19}$	$-3,00 \times 10^{-19}$	$2,49 \times 10^{-19}$
Energy	0,970548	0,943965	0,923362
Haralick Correlation	-327164	-177130	-129671
Homogeneity	0,995011	0,991885	0,989942
Inverse_Dif_Normalized	0,99922	0,998784	0,998587
Vertical			
	l_1	l_2	l_3
Autocorrelation	122,6391	119,9688	117,3528
Cluster Prominence	1851,291	2705,426	3439,188
Cluster Shade	-1,59626	-48,9062	-89,4443
Contrast	0,295678	0,426646	0,549179
Correlation	0,929855	0,932282	0,93387
Dissimilarity	$8,67 \times 10^{-19}$	$5,42 \times 10^{-20}$	$-3,58 \times 10^{-18}$
Energy	0,868227	0,805259	0,750105
Haralick Correlation	-25218	-16362	-12035,6
Homogeneity	0,964921	0,948398	0,933099
Inverse_Dif_Normalized	0,989452	0,984755	0,980359
Diagonal			
	l_1	l_2	l_3
Autocorrelation	121,0313	121,0572	121,078
Cluster Prominence	4,974624	9,644424	12,95671
Cluster Shade	-0,0711	-0,15159	-0,1884
Contrast	0,020895	0,045548	0,070364
Correlation	0,804822	0,785411	0,759832
Dissimilarity	$3,15 \times 10^{-19}$	$7,83 \times 10^{-19}$	$-7,35 \times 10^{-19}$
Energy	0,970711	0,944409	0,924343
Haralick Correlation	-995077	-501821	-363540
Homogeneity	0,994902	0,990036	0,985942
Inverse_Dif_Normalized	0,999189	0,998267	0,997387

Όπως είναι αναμενόμενο, παρατηρείται ότι, στις περιπτώσεις των δύο εικόνων με την ευθεία και το ημικύκλιο, τα αποτελέσματα χαρακτηριστικών υφής των διαγώνιων κατευθύνσεων είναι μεταξύ τους ίδια, ενώ τα αποτελέσματα χαρακτηριστικών υφής της οριζόντιας κατεύθυνσης του ενός ημικυκλίου είναι ίδια με αυτά της κατακόρυφης κατεύθυνσης του άλλου.

Στατιστικός έλεγχος

Στους πίνακες 3.12-3.14 παρουσιάζεται ο στατιστικός έλεγχος με τη μέθοδο Wilcoxon rank-sum test για την εύρεση σημαντικών διαφορών στις τιμές των χαρακτηριστικών υφής μεταξύ των εικόνων με απότομη και σταδιακή μεταβολή φωτεινότητας (I₁, I₂ και I₃) για το δείγμα των οκτώ συνθετικών εικόνων διαφορετικού σχήματος. Η τιμή p-value που θεωρήθηκε στατιστικά σημαντική ήταν η 0.05.

Πίνακας 3. 12: Μέσες τιμές $\pm$ τυπικές αποκλίσεις χαρακτηριστικών υφής για τις οκτώ συνθετικές εικόνες διαφορετικού σχήματος ανά είδος ορίου (I₁, I₂ και I₃). Η έντονη γραφή (**bold**) δείχνει στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των δύο κατηγοριών. Το μέγεθος του δείγματος κάθε κατηγορίας (I₁, I₂ και I₃) είναι ίσο με το πλήθος διαφορετικών ειδών συνθετικών εικόνων (n=8). Οι μετρήσεις αφορούν τον οριζόντιο προσανατολισμό ανάλυσης.

horizontal	I1	I2	I3	I1 vs I2	I2 vs I3
Autocorrelation	121,713 $\pm$ 0,651	121,742 $\pm$ 1,486	121,764 $\pm$ 2,813	0,81	0,81
Cluster					
Prominence	693,874 $\pm$ 802,461	1256,4 $\pm$ 1502,626	1826,112 $\pm$ 2211,813	0,02	0,02
Cluster Shade	-2,082 $\pm$ 3,935	-10,814 $\pm$ 17,336	-19,151 $\pm$ 31,226	0,02	0,02
Contrast	0,136 $\pm$ 0,121	0,189 $\pm$ 0,165	0,235 $\pm$ 0,209	0,02	0,02
Correlation	0,922 $\pm$ 0,017	0,939 $\pm$ 0,011	0,948 $\pm$ 0,01	0,02	0,02
Dissimilarity	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	0,16	0,69
Energy	0,924 $\pm$ 0,048	0,876 $\pm$ 0,072	0,832 $\pm$ 0,096	0,02	0,02
Haralick					
Correlation	-106801,711 $\pm$ 104587,966	-57310,871 $\pm$ 56238,385	-39657,736 $\pm$ 41571,234	0,02	0,02
Homogeneity	0,982 $\pm$ 0,013	0,974 $\pm$ 0,019	0,966 $\pm$ 0,024	0,02	0,02
Inverse Dif					
Normalized	0,995 $\pm$ 0,004	0,993 $\pm$ 0,006	0,992 $\pm$ 0,007	0,02	0,02

Πίνακας 3. 13: Μέσες τιμές $\pm$ τυπικές αποκλίσεις χαρακτηριστικών υφής για τις οκτώ συνθετικές εικόνες διαφορετικού σχήματος ανά είδος ορίου (I₁, I₂ και I₃). Η έντονη γραφή (**bold**) δείχνει στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των δύο κατηγοριών. Το μέγεθος του δείγματος κάθε κατηγορίας (I₁, I₂ και I₃) είναι ίσο με το πλήθος διαφορετικών ειδών συνθετικών εικόνων (n=8). Οι μετρήσεις αφορούν τον κατακόρυφο προσανατολισμό ανάλυσης.

vertical	I1	I2	I3	I1 vs I2	I2 vs I3
Autocorrelation	121,713 $\pm$ 0,651	121,742 $\pm$ 1,486	121,764 $\pm$ 2,813	0,81	0,81
Cluster					
Prominence	693,874 $\pm$ 802,461	1256,4 $\pm$ 1502,626	1826,112 $\pm$ 2211,813	0,02	0,02
Cluster Shade	-2,082 $\pm$ 3,935	-10,814 $\pm$ 17,336	-19,151 $\pm$ 31,226	0,02	0,02
Contrast	0,136 $\pm$ 0,121	0,189 $\pm$ 0,165	0,235 $\pm$ 0,209	0,02	0,02
Correlation	0,922 $\pm$ 0,017	0,939 $\pm$ 0,011	0,948 $\pm$ 0,01	0,02	0,02
Dissimilarity	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	0,56	0,69
Energy	0,924 $\pm$ 0,048	0,876 $\pm$ 0,072	0,832 $\pm$ 0,096	0,02	0,02
Haralick					
Correlation	-106801,711 $\pm$ 104587,966	-57310,871 $\pm$ 56238,385	-39657,736 $\pm$ 41571,234	0,02	0,02
Homogeneity	0,982 $\pm$ 0,013	0,974 $\pm$ 0,019	0,966 $\pm$ 0,024	0,02	0,02
Inverse Dif					
Normalized	0,995 $\pm$ 0,004	0,993 $\pm$ 0,006	0,992 $\pm$ 0,007	0,02	0,02

Πίνακας 3. 14: Μέσες τιμές $\pm$ τυπικές αποκλίσεις χαρακτηριστικών υφής για τις οκτώ συνθετικές εικόνες διαφορετικού σχήματος ανά είδος ορίου (I1, I2 και I3). Η έντονη γραφή (**bold**) δείχνει στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των δύο κατηγοριών. Το μέγεθος του δείγματος κάθε κατηγορίας (I1, I2 και I3) είναι ίσο με το πλήθος διαφορετικών ειδών συνθετικών εικόνων ($n=8$). Οι μετρήσεις αφορούν τον διαγώνιο προσανατολισμό ανάλυσης.

diagonal	I1	I2	I3	I1 vs I2	I2 vs I3
Autocorrelation	121,079 $\pm$ 0,087	121,116 $\pm$ 0,114	121,136 $\pm$ 0,126	0,03	0,03
Cluster Prominence	20,225 $\pm$ 25,223	25,616 $\pm$ 28,762	29,017 $\pm$ 30,413	0,03	0,03
Cluster Shade	-0,108 $\pm$ 0,095	-0,131 $\pm$ 0,09	-0,185 $\pm$ 0,134	0,44	0,03
Contrast	0,042 $\pm$ 0,041	0,074 $\pm$ 0,066	0,107 $\pm$ 0,091	0,03	0,03
Correlation	0,816 $\pm$ 0,015	0,788 $\pm$ 0,007	0,761 $\pm$ 0,008	0,03	0,03
Dissimilarity	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	0,69	1,00
Energy	0,952 $\pm$ 0,042	0,919 $\pm$ 0,066	0,891 $\pm$ 0,089	0,03	0,03
Haralick Correlation	-540926,141 $\pm$ 375217,13	-298425,965 $\pm$ 164634,058	-223379,857 $\pm$ 113158,489	0,03	0,03
Homogeneity	0,991 $\pm$ 0,008	0,985 $\pm$ 0,012	0,98 $\pm$ 0,017	0,03	0,03
Inverse Dif Normalized	0,998 $\pm$ 0,001	0,997 $\pm$ 0,002	0,996 $\pm$ 0,003	0,03	0,03

Γενικά, παρατηρείται ότι όλα τα χαρακτηριστικά υφής, εκτός των autocorrelation και dissimilarity, είναι αξιόπιστα για την αναγνώριση του είδους του ορίου στα όρια του σχήματος των συνθετικών εικόνων (απότομη ή σταδιακή μετάβαση), καθώς διαφέρουν στατιστικά σημαντικά. Δηλαδή, όσο περισσότερες εναλλαγές και διακυμάνσεις περιλαμβάνονται στην εικόνα που αναλύεται, τόσο περισσότερο μεταβάλλονται όλα τα χαρακτηριστικά υφής. Η ομοιότητα των τιμών οριζόντιας και κατακόρυφης ανάλυσης οφείλεται στη συμμετρία των συνθετικών εικόνων ως προς αυτές τις κατευθύνσεις.

3.2.3 Διερεύνηση χαρακτηριστικών υφής διαφορετικών σχημάτων

Σε αυτή την υποενότητα παρουσιάζονται συγκριτικά τα χαρακτηριστικά υφής για τα διάφορα σχήματα που περιέχουν οι εικόνες. Για κάθε σχήμα παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά υφής της εικόνας I₁, δηλαδή αυτής με την απότομη μετάβαση στο όριο του σχήματος.

Πίνακας 3. 15: Χαρακτηριστικά υφής για την εικόνα I1 (απότομη μετάβαση στο όριο – εικόνα I1 των εικόνων 3.9-3.16) των διαφορετικών ειδών συνθετικών εικόνων. Μέγεθος παραθύρου $r=8$. Επίπεδα κβάντισης $b=21$. Οριζόντιος προσανατολισμός ανάλυσης.

horizontal	Οριζόντια γραμμή	Κατακόρυφη γραμμή	Κύκλος	Δίσκος	Οριζόντιο ημικύκλιο	Κατακόρυφο ημικύκλιο	Οριζόντια γραμμή με ημικύκλιο	Κατακόρυφη γραμμή με ημικύκλιο
Autocorrelation	122,7118	121	121,9138	121,3916	121,4711	121,4367744	122,63914	121,142897
Cluster Prominence	2049,89	0	670,9315	271,1083	340,9055	290,2087001	1851,2908	76,6562408
Cluster Shade	-11,723	0	-1,10076	-0,54443	-1,2163	-0,318335055	-1,59626	-0,156345
Contrast	0,314516	0	0,203135	0,052735	0,105602	0,096760775	0,2956785	0,01965334
Correlation	0,92934	NaN	0,904844	0,940508	0,904979	0,904215671	0,9298554	0,93964392
Dissimilarity	0	0	1,68E-18	8,13E-20	-5,42E-20	-4,40E-20	3,90E-18	2,05E-19
Energy	0,879325	1	0,871787	0,938919	0,929277	0,932374846	0,8682266	0,97054804
Haralick Correlation	-23875,3	NaN	-49888	-120169	-95845,1	-105452,4218	-25218,04	-327163,78
Homogeneity	0,965726	1	0,973329	0,988926	0,985508	0,98621259	0,9649213	0,99501086
Inverse Dif Normalized	0,988871	1	0,993664	0,99798	0,996659	0,996908095	0,9894518	0,99922001

Πίνακας 3. 16: Χαρακτηριστικά υφής για την εικόνα I1 (απότομη μετάβαση στο όριο – εικόνα I1 των εικόνων 3.9-3.16) των διαφορετικών ειδών συνθετικών εικόνων. Μέγεθος παραθύρου $r=8$. Επίπεδα κβάντισης $b=21$. Κατακόρυφος προσανατολισμός ανάλυσης.

vertical	Οριζόντια γραμμή	Κατακόρυφη γραμμή	Κύκλος	Δίσκος	Οριζόντιο ημικύκλιο	Κατακόρυφο ημικύκλιο	Οριζόντια γραμμή με ημικύκλιο	Κατακόρυφη γραμμή με ημικύκλιο
Autocorrelation	121	122,711831	121,9138	121,3916	121,4368	121,4711188	121,1429	122,639144
Cluster Prominence	0	2049,88979	670,9315	271,1083	290,2087	340,9054797	76,656241	1851,29083
Cluster Shade	0	-11,7229665	-1,10076	-0,54443	-0,31834	-1,216299497	-0,156345	-1,5962602
Contrast	0	0,31451613	0,203135	0,052735	0,096761	0,105601973	0,0196533	0,29567849
Correlation	NaN	0,92933957	0,904844	0,940508	0,904216	0,904978613	0,9396439	0,92985544
Dissimilarity	0	0	6,78E-19	1,08E-19	8,61E-19	-7,52E-19	3,90E-20	8,67E-19
Energy	1	0,87932536	0,871787	0,938919	0,932375	0,929276853	0,970548	0,86822655
Haralick Correlation	NaN	-23875,2975	-49888	-120169	-105452	-95845,13812	-327163,8	-25218,04
Homogeneity	1	0,96572581	0,973329	0,988926	0,986213	0,985507928	0,9950109	0,96492132
Inverse Dif Normalized	1	0,98887097	0,993664	0,99798	0,996908	0,996659374	0,99922	0,98945178

Πίνακας 3. 17: Χαρακτηριστικά υφής για την εικόνα I1 (απότομη μετάβαση στο όριο – εικόνα I1 των εικόνων 3.9-3.16) των διαφορετικών ειδών συνθετικών εικόνων. Μέγεθος παραθύρου $r=8$. Επίπεδα κβάντισης $b=21$. Διαγώνιος προσανατολισμός ανάλυσης.

diagonal	Οριζόντια γραμμή	Κατακόρυφη γραμμή	Κύκλος	Δίσκος	Οριζόντιο ημικύκλιο	Κατακόρυφο ημικύκλιο	Οριζόντια γραμμή με ημικύκλιο	Κατακόρυφη γραμμή με ημικύκλιο
Autocorrelation	121	121	121,2497	121,0572	121,1327	121,132714	121,03127	121,031271
Cluster Prominence	0	0	69,9872	8,239624	36,81179	36,8117925	4,9746245	4,97462446
Cluster Shade	0	0	-0,28484	-0,11903	-0,15905	-0,159050094	-0,071103	-0,0711028
Contrast	0	0	0,121946	0,03937	0,065202	0,065202211	0,0208946	0,02089458
Correlation	NaN	NaN	0,829665	0,796967	0,829425	0,829424536	0,8048215	0,80482152
Dissimilarity	0	0	1,15E-18	4,88E-19	-1,19E-19	8,84E-19	1,56E-19	3,15E-19
Energy	1	1	0,873698	0,941661	0,930717	0,930717271	0,970711	0,97071099
Haralick Correlation	NaN	NaN	-148758	-549323	-278661	-278660,5057	-995077,4	-995077,41
Homogeneity	1	1	0,976559	0,990474	0,987186	0,987185914	0,9949019	0,99490188
Inverse Dif Normalized	1	1	0,995575	0,998476	0,997615	0,997614727	0,9991891	0,99918909

Από τα παραπάνω είναι εμφανές ότι οι τιμές προς κάθε κατεύθυνση για κάθε είδος συνθετικής εικόνας διαφέρουν. Συνεπώς, ο σωστός συνδυασμός των χαρακτηριστικών υφής μπορεί να περιγράψει αποκλειστικά κάποιο από τα είδη των συνθετικών εικόνων. Συγκεκριμένα, το χαρακτηριστικό αυτοσυσχέτιση (autocorrelation) φαίνεται να μην αλλάζει τιμή, καθώς αλλάζει η εικόνα. Αυτό σημαίνει ότι δεν είναι τόσο αξιόπιστο χαρακτηριστικό όσο τα υπόλοιπα, τα οποία παρουσιάζουν μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ εικόνων διαφορετικών σχημάτων, για κλίμακα $r=8$ (όπως το cluster prominence). Κάτι ανάλογο συμβαίνει και με τα χαρακτηριστικά correlation και inverse difference normalized. Όμως, στην ενότητα 3.3.2 γίνεται εμφανές ότι με την ανάλυση σε πραγματικές εικόνες, για διαφορετικά μεγέθη παραθύρων, οι τιμές των χαρακτηριστικών αυτών μεταβάλλονται αρκετά. Επομένως, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν συνδυαστικά χαρακτηριστικά διαφορετικών κλιμάκων για την ταξινόμηση αθηρωματικών πλακών καρωτίδας σε υψηλού και χαμηλού κινδύνου.

Παρατηρείται, όπως ήταν αναμενόμενο, ότι για τα είδη εικόνων που έχουν κατακόρυφη και οριζόντια εκδοχή, τα χαρακτηριστικά υφής οριζόντιας κατεύθυνσης της μίας, είναι ίδια με τα χαρακτηριστικά υφής κατακόρυφης κατεύθυνσης της άλλης. Στη συνέχεια, αθροίζονται οι τιμές των χαρακτηριστικών υφής όλων των κατευθύνσεων ($Feature = Fh + Fv + Fd$), και παρουσιάζονται ανά σχήμα. Για τις «όμοιες» εικόνες (οριζόντια ή κατακόρυφη εκδοχή ενός σχήματος) παρατηρείται ότι τα χαρακτηριστικά αυτά είναι ίδια. Συμπεραίνεται, δηλαδή, ότι ο μετασχηματισμός αυτός, εκτός από την ανεξαρτησία του ως προς τι εντάσεις της εικόνας που

μετασχηματίζει, έχει ανεξαρτησία και ως προς εικόνες περιστραμμένες κατά 90°, αν ληφθεί υπόψη η μέση τιμή (ή το άθροισμα) των συντελεστών ranklet προς κάθε κατεύθυνση.

Πίνακας 3. 18: Άθροισμα των χαρακτηριστικών υφής των τριών κατευθύνσεων ανάλυσης (οριζόντιας, κατακόρυφης και διαγώνιας) για την εικόνα I1 (απότομη μετάβαση στο όριο – εικόνα I1 των εικόνων 3.9-3.16) των συνθετικών εικόνων διαφορετικού σχήματος. Μέγεθος παραθύρου $r=8$. Επίπεδα κβάντισης $b=21$.

hor+ver+diag	Οριζόντια γραμμή	Κατακόρυφη γραμμή	Κύκλος	Δίσκος	Οριζόντιο ημικύκλιο	Κατακόρυφο ημικύκλιο	Οριζόντια γραμμή με ημικύκλιο	Κατακόρυφη γραμμή με ημικύκλιο
Autocorrelation	364,7118	364,711831	365,0772	363,8404	364,0406	364,0406073	364,81331	364,813312
Cluster Prominence	2049,89	2049,88979	1411,85	550,4563	667,926	667,9259723	1932,9217	1932,9217
Cluster Shade	-11,723	-11,7229665	-2,48636	-1,20788	-1,69368	-1,693684646	-1,823708	-1,8237079
Contrast	0,314516	0,31451613	0,528215	0,14484	0,267565	0,267564959	0,3362264	0,33622641
Correlation	NaN	NaN	2,639354	2,677984	2,638619	2,63861882	2,6743209	2,67432088
Dissimilarity	0	0	3,50E-18	6,78E-19	6,88E-19	8,81E-20	4,10E-18	1,39E-18
Energy	2,879325	2,87932536	2,617273	2,819499	2,792369	2,79236897	2,8094856	2,80948558
Haralick Correlation	NaN	NaN	-248534	-789661	-479958	-479958,0656	-1347459	-1347459,2
Homogeneity	2,965726	2,96572581	2,923217	2,968326	2,958906	2,958906431	2,9548341	2,95483406
Inverse Dif Normalized	2,988871	2,98887097	2,982904	2,994437	2,991182	2,991182197	2,9878609	2,98786088

Όσον αφορά διαφορετικές εικόνες, τα χαρακτηριστικά που παρουσιάζουν έντονες διαφορές, όπως κρίνεται ποιοτικά από τον πίνακα 3.18, και συνεπώς, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως δείκτες για το χαρακτηρισμό υφής εικόνων είναι τα εξής: cluster prominence, cluster shade, contrast, homogeneity και ίσως και energy. Τα υπόλοιπα παρουσιάζουν μικρές διαφορές για παράθυρο ανάλυσης 8x8. Αυτό δε σημαίνει ότι για υψηλότερη ή χαμηλότερη ανάλυση δεν ενδέχεται να σημειώνουν σημαντικές διαφορές, οι οποίες μπορούν να συμβάλουν στην ορθή ταξινόμηση μιας εικόνας καρωτίδας.

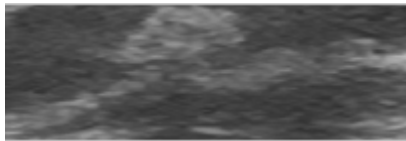
3.3 Εφαρμογή μετασχηματισμού ranklet σε εικόνες υπερήχου καρωτίδας

Σε αυτήν την ενότητα, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα εφαρμογής του μετασχηματισμού στις πραγματικές εικόνες υπερήχου καρωτίδας. Εξετάζονται τα αποτελέσματα με και χωρίς προεπεξεργασία της εικόνας υπερήχου για τη μελέτη της επίδρασης των εντάσεων της εικόνας στα χαρακτηριστικά υφής. Εξάγονται τα χαρακτηριστικά υφής για διαφορετικές τιμές παραθύρου ανάλυσης (κλίμακας) και επιπέδων κβάντισης για την εύρεση των καταλληλότερων τιμών τους. Συγκρίνονται τα χαρακτηριστικά υφής μεταξύ των εικόνων καρωτίδας υψηλής και χαμηλής στένωσης για τη διερεύνηση της ικανότητας του μετασχηματισμού να διακρίνει τις εικόνες ως προς το βαθμό στένωσης. Εξετάζονται επίσης, τα χαρακτηριστικά υφής που εξάγονται από τις δύο πλάκες που εντοπίζονται στην ίδια καρωτίδα με στόχο τη

μελέτη ύπαρξης ομοιοτήτων σε αυτά. Σημειώνεται ότι στις εικόνες 3.16-3.18, που απεικονίζονται οι εικόνες ranklet RI, οι τιμές των RI $[-1, +1]$ έχουν μετατραπεί στην κλίμακα $[0, +1]$ για λόγους οπτικοποίησης. Δηλαδή με γκρι (0.5) δηλώνεται το αντίστοιχο 0 των συντελεστών (όπου δεν υπάρχει κάποια μεταβολή), με λευκό (1) το αντίστοιχο 1 των συντελεστών (όπου υπάρχει κάποια μεταβολή από σκοτεινή σε φωτεινή περιοχή) και με μαύρο (0) το αντίστοιχο -1 των συντελεστών (όπου υπάρχει κάποια μεταβολή από φωτεινή σε σκοτεινή περιοχή).

3.3.1 Με και χωρίς προεπεξεργασία της αρχικής εικόνας

Στην εικόνα 3.16 παρουσιάζονται οι μετασχηματισμένες εικόνες RI για μια εικόνα υπερήχου καρωτίδας Β-σάρωσης, με και χωρίς προεπεξεργασία. Η προεπεξεργασία της αρχικής εικόνας αποσκοπεί στη βελτίωση της ποιότητάς της και περιλαμβάνει τη μεταβολή των εντάσεων φωτεινότητάς της με στόχο την ευκρινέστερη απεικόνισή της. Τα φίλτρα που εφαρμόστηκαν είναι: εξισορρόπηση ιστογράμματος και διόρθωση Gamma, με τιμή της διόρθωσης $\gamma_1=0.5$ και $\gamma_2=1.5$, αντίστοιχα. Οι τιμές γ_1 και γ_2 είναι ενδεικτικές, καθώς παρατηρήθηκαν όμοια αποτελέσματα ανεξαρτήτως τιμής γ . Επιλέχθηκε μία τιμή γ μικρότερη της μονάδας και μία μεγαλύτερη, ώστε να προκύψει μια πιο φωτεινή και μια πιο σκοτεινή εκδοχή της αρχικής εικόνας. Στη συνέχεια, ακολουθεί στατιστικός έλεγχος Wilcoxon για τη σύγκριση των χαρακτηριστικών υφής.



Αρχική εικόνα I



Εικόνα I με εξισορρόπηση ιστογράμματος (hist)



RI horizontal (I)



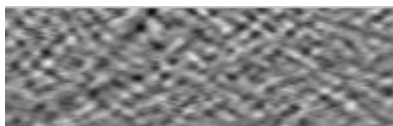
RI horizontal (hist)



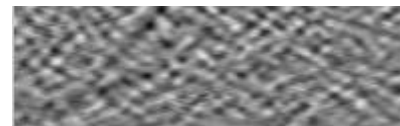
RI vertical (I)



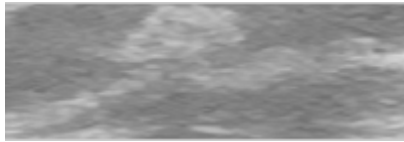
RI vertical (hist)



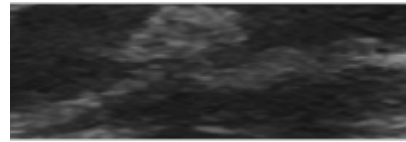
RI diagonal (I)



RI diagonal (hist)



Εικόνα I με διόρθωση Gamma ($g_1=0.5$)



Εικόνα I με διόρθωση Gamma ($g_2=1.5$)



RI horizontal (g_1)



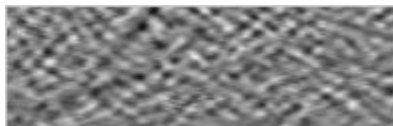
RI horizontal (g_2)



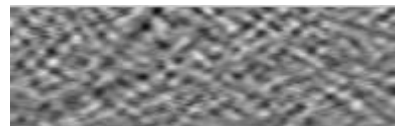
RI vertical (g_1)



RI vertical (g_2)



RI diagonal (g_1)



RI diagonal (g_2)

Εικόνα 3. 16: Απεικονίσεις των τριών μετασχηματισμένων εικόνων ranklet RI, μία για κάθε κατεύθυνση ανάλυσης, οριζόντια (h), κατακόρυφη (v) και διαγώνια (d), που προκύπτουν από την ανάλυση στην αρχική εικόνα I , την εικόνα I με φίλτρο εξισορρόπησης ιστογράμματος ($hist$), την εικόνα I με φίλτρο Gamma ($g_1=0.5$) και την εικόνα I με φίλτρο Gamma ($g_2=1.5$). Μέγεθος παραθύρου $r=8$, και επίπεδα κβάντισης $b=21$. Οι τιμές των εικόνων RI $[-1, +1]$ έχουν μετατραπεί στην κλίμακα $[0, +1]$ για λόγους οπτικοποίησης.

Είναι προφανές, ότι ο μετασχηματισμός ranklet έχει ανεξαρτησία ως προς την ένταση των φωτεινότητων της εικόνας την οποία φιλτράρει. Οι εικόνες που περιλαμβάνουν τους συντελεστές ranklet για κάθε κατεύθυνση (οριζόντια, κατακόρυφη και διαγώνια) έχουν την ίδια μορφή και ένταση. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς, ο μετασχηματισμός αυτός σχετίζεται με την τάξη των τιμών της εικόνας, και όχι με τις ακριβείς τιμές των εντάσεων. Τα φίλτρα για την επεξεργασία της εικόνας που εφαρμόστηκαν (histogram equalization και gamma correction) είναι μη- γραμμικά φίλτρα, τα οποία μετασχηματίζουν την κλίμακα gray-scale μονότονα, διατηρώντας έτσι τις τάξεις των φωτεινότητων της εικόνας. Εφόσον, οι εικόνες ranklet RI της αρχικής και των φιλτραρισμένων εικόνων είναι σχεδόν ίδιες για κάθε προσανατολισμό, και τα χαρακτηριστικά υφής που προκύπτουν από αυτές θα έχουν μικρές διαφορές. Στους πίνακες 3.19-3.21 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές και οι τυπικές αποκλίσεις των δέκα χαρακτηριστικών υφής που εξάγονται για το σύνολο των 94 εικόνων απευθείας είτε μετά την προεπεξεργασία των εικόνων και οι στατιστικές διαφορές τους.

Πίνακας 3. 19: Μέσες τιμές $\pm$ τυπικές αποκλίσεις χαρακτηριστικών υψής για τις αρχικές εικόνες (original), τις εικόνες με φίλτρο εξισορρόπησης ιστογράμματος (histogram equalization - hist), τις εικόνες με φίλτρο Gamma ($\gamma_1=0.5 - G1$) και τις εικόνες με φίλτρο Gamma ($\gamma_2=1.5 - G2$). Όλες οι p τιμές είναι αρκετά μεγαλύτερες της τιμής 0.05 ($p>0.05$), που σημαίνει ότι οι τιμές μεταξύ των εικόνων με φίλτρο και χωρίς, δε διαφέρουν στατιστικά σημαντικά. Μέγεθος παραθύρου $r=8$. Επίπεδα κβάντισης $b=21$. Πλήθος εικόνων $n=89$. Οριζόντιος προσανατολισμός ανάλυσης.

horizontal	original	histogram equalization	Gamma ($\gamma_1=0.5$)	Gamma ($\gamma_2=1.5$)	original vs hist	original vs G1	original vs G2
Autocorrelation	138,548 $\pm$ 36,205	138,364 $\pm$ 36,177	138,535 $\pm$ 36,203	138,434 $\pm$ 36,12	0,90	0,97	0,96
Cluster Prominence	28212,432 $\pm$ 9220,855	27889,305 $\pm$ 9152,887	28186,171 $\pm$ 9213,347	27980,357 $\pm$ 9158,574	0,71	0,95	0,77
Cluster Shade	101,764 $\pm$ 393,578	99,69 $\pm$ 389,867	101,491 $\pm$ 393,306	100,099 $\pm$ 390,097	0,95	0,98	0,95
Contrast	6,572 $\pm$ 1,154	6,523 $\pm$ 1,139	6,567 $\pm$ 1,153	6,528 $\pm$ 1,143	0,70	0,95	0,75
Correlation	0,889 $\pm$ 0,025	0,889 $\pm$ 0,025	0,889 $\pm$ 0,025	0,889 $\pm$ 0,025	0,93	0,99	0,93
Dissimilarity	0,016 $\pm$ 0,102	0,016 $\pm$ 0,102	0,016 $\pm$ 0,102	0,016 $\pm$ 0,102	0,98	0,99	0,97
Energy	0,013 $\pm$ 0,019	0,013 $\pm$ 0,018	0,013 $\pm$ 0,019	0,013 $\pm$ 0,018	0,96	0,99	0,99
Haralick Correlation	-1665,351 $\pm$ 658,786	-1674,927 $\pm$ 658,768	-1666,204 $\pm$ 658,769	-1674,871 $\pm$ 661,756	0,83	0,96	0,85
Homogeneity	0,5 $\pm$ 0,038	0,5 $\pm$ 0,038	0,5 $\pm$ 0,038	0,501 $\pm$ 0,038	0,98	0,99	0,81
Inverse Dif Normalized	0,83 $\pm$ 0,023	0,83 $\pm$ 0,023	0,83 $\pm$ 0,023	0,83 $\pm$ 0,023	0,82	0,95	0,73

Πίνακας 3. 20: Μέσες τιμές $\pm$ τυπικές αποκλίσεις χαρακτηριστικών υψής για τις αρχικές εικόνες (original), τις εικόνες με φίλτρο εξισορρόπησης ιστογράμματος (histogram equalization - hist), τις εικόνες με φίλτρο Gamma ($\gamma_1=0.5 - G1$) και τις εικόνες με φίλτρο Gamma ($\gamma_2=1.5 - G2$). Όλες οι p τιμές είναι αρκετά μεγαλύτερες της τιμής 0.05 ($p>0.05$), που σημαίνει ότι οι τιμές μεταξύ των εικόνων με φίλτρο και χωρίς, δε διαφέρουν στατιστικά σημαντικά. Μέγεθος παραθύρου $r=8$. Επίπεδα κβάντισης $b=21$. Πλήθος εικόνων $n=89$. Κατακόρυφος προσανατολισμός ανάλυσης.

vertical	original	histogram equalization	Gamma ($\gamma_1=0.5$)	Gamma ($\gamma_2=1.5$)	original vs hist	original vs G1	original vs G2
Autocorrelation	130,281 $\pm$ 9,426	130,189 $\pm$ 9,373	130,262 $\pm$ 9,415	130,217 $\pm$ 9,361	0,89	0,96	0,94
Cluster Prominence	4359,503 $\pm$ 2169,906	4289,484 $\pm$ 2132,886	4353,17 $\pm$ 2162,944	4302,12 $\pm$ 2170,29	0,70	0,96	0,75
Cluster Shade	-0,42 $\pm$ 32,472	-0,558 $\pm$ 31,71	-0,35 $\pm$ 32,448	-0,549 $\pm$ 32,619	0,93	0,97	0,96
Contrast	1,813 $\pm$ 0,267	1,8 $\pm$ 0,265	1,811 $\pm$ 0,266	1,799 $\pm$ 0,269	0,50	0,91	0,49
Correlation	0,904 $\pm$ 0,022	0,904 $\pm$ 0,022	0,904 $\pm$ 0,022	0,904 $\pm$ 0,022	0,89	0,98	0,96
Dissimilarity	0,004 $\pm$ 0,013	0,004 $\pm$ 0,013	0,004 $\pm$ 0,013	0,004 $\pm$ 0,013	0,97	0,99	0,96
Energy	0,022 $\pm$ 0,007	0,022 $\pm$ 0,007	0,022 $\pm$ 0,007	0,022 $\pm$ 0,007	0,56	0,95	0,64
Haralick Correlation	-5785,194 $\pm$ 1979,466	-5838,179 $\pm$ 1995,853	-5787,706 $\pm$ 1975,225	-5840,127 $\pm$ 2003,486	0,65	0,96	0,69
Homogeneity	0,617 $\pm$ 0,022	0,618 $\pm$ 0,022	0,617 $\pm$ 0,022	0,618 $\pm$ 0,023	0,54	0,94	0,64
Inverse Dif Normalized	0,932 $\pm$ 0,008	0,932 $\pm$ 0,008	0,932 $\pm$ 0,008	0,932 $\pm$ 0,008	0,52	0,94	0,53

Πίνακας 3. 21: Μέσες τιμές $\pm$ τυπικές αποκλίσεις χαρακτηριστικών υφής για τις αρχικές εικόνες (original), τις εικόνες με φίλτρο εξισορρόπησης ιστογράμματος (histogram equalization - hist), τις εικόνες με φίλτρο Gamma ($\gamma_1=0.5 - G1$) και τις εικόνες με φίλτρο Gamma ($\gamma_2=1.5 - G2$). Όλες οι p τιμές είναι αρκετά μεγαλύτερες της τιμής 0.05 ($p>0.05$), που σημαίνει ότι οι τιμές μεταξύ των εικόνων με φίλτρο και χωρίς, δε διαφέρουν στατιστικά σημαντικά. Μέγεθος παραθύρου $r=8$. Επίπεδα κβάντισης $b=21$. Πλήθος εικόνων $n=89$. Διαγώνιος προσανατολισμός ανάλυσης.

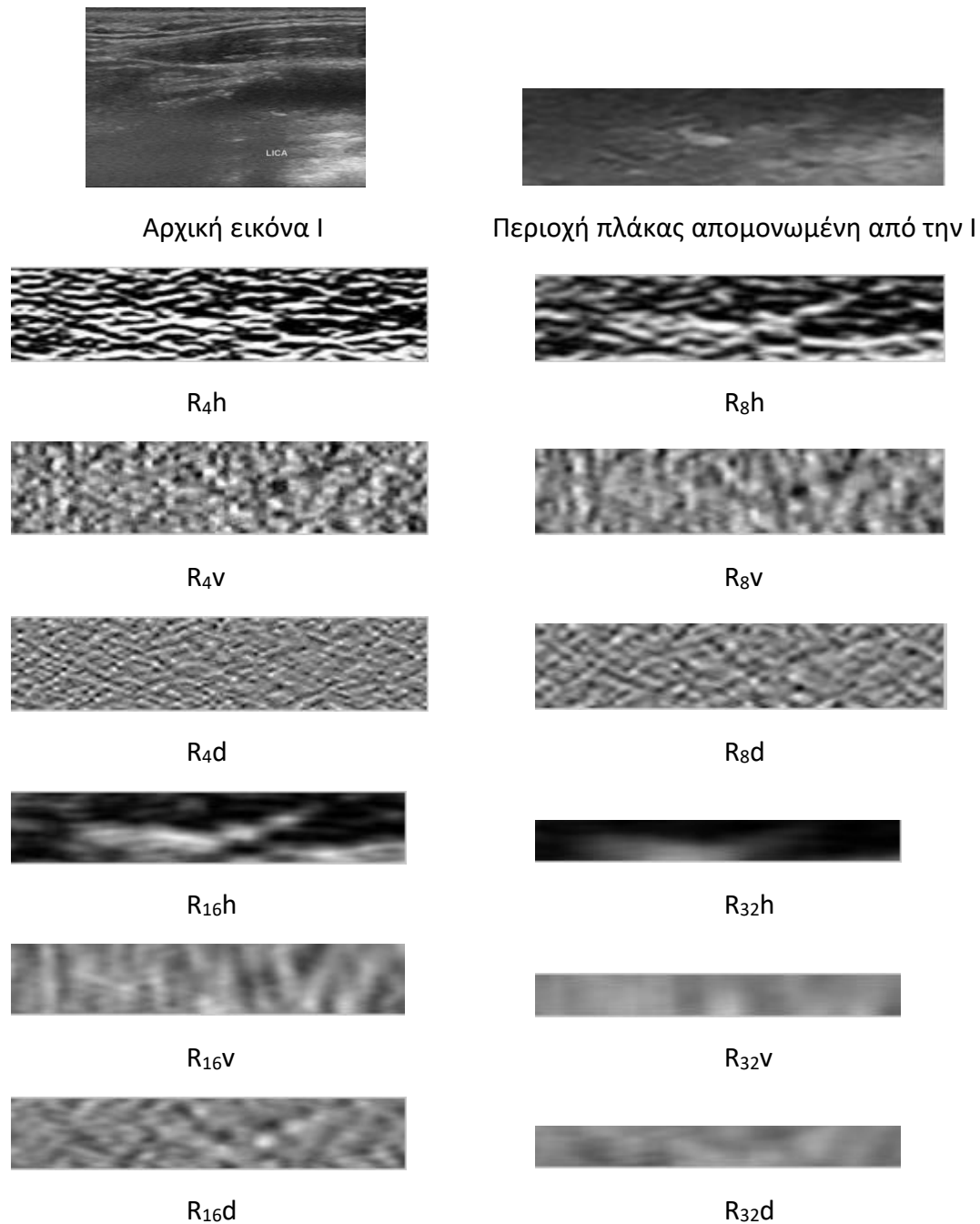
diagonal	original	histogram equalization	Gamma ($\gamma_1=0.5$)	Gamma ($\gamma_2=1.5$)	original vs hist	original vs G1	original vs G2
Autocorrelation	125,752 $\pm$ 0,951	125,704 $\pm$ 0,954	125,746 $\pm$ 0,955	125,71 $\pm$ 0,95	0,72	0,96	0,73
Cluster Prominence	1423,623 $\pm$ 415,487	1400,638 $\pm$ 405,662	1420,453 $\pm$ 414,743	1395,934 $\pm$ 406,326	0,67	0,92	0,62
Cluster Shade	-1,194 $\pm$ 5,761	-1,073 $\pm$ 5,975	-1,224 $\pm$ 5,745	-1,238 $\pm$ 5,889	0,85	0,97	0,94
Contrast	2,905 $\pm$ 0,422	2,883 $\pm$ 0,419	2,902 $\pm$ 0,422	2,879 $\pm$ 0,42	0,53	0,95	0,54
Correlation	0,757 $\pm$ 0,027	0,756 $\pm$ 0,027	0,757 $\pm$ 0,027	0,757 $\pm$ 0,027	0,84	0,99	0,96
Dissimilarity	0 $\pm$ 0,004	0 $\pm$ 0,004	0 $\pm$ 0,004	0 $\pm$ 0,004	0,99	0,97	0,83
Energy	0,024 $\pm$ 0,008	0,024 $\pm$ 0,008	0,024 $\pm$ 0,008	0,024 $\pm$ 0,008	0,53	0,96	0,67
Haralick Correlation	-9147,918 $\pm$ 1899,034	-9231,193 $\pm$ 1892,503	-9158,419 $\pm$ 1902,37	-9236,371 $\pm$ 1915,298	0,61	0,93	0,65
Homogeneity	0,56 $\pm$ 0,027	0,561 $\pm$ 0,027	0,56 $\pm$ 0,027	0,561 $\pm$ 0,027	0,48	0,93	0,61
Inverse Dif Normalized	0,901 $\pm$ 0,012	0,901 $\pm$ 0,012	0,901 $\pm$ 0,012	0,901 $\pm$ 0,012	0,51	0,95	0,56

Παρατηρείται ανεξαρτησία του μετασχηματισμού ως προς την προεπεξεργασία της αρχικής εικόνας με στόχο τη βελτίωση της ποιότητάς της, καθώς τα χαρακτηριστικά υφής που προκύπτουν ύστερα από την εφαρμογή των φίλτρων στην αρχική εικόνα δε διαφέρουν από αυτά της αρχικής. Τα αποτελέσματα των χαρακτηριστικών υφής της αρχικής εικόνας έχουν πολύ μικρές διαφορές σε σχέση με αυτά των εικόνων διόρθωσης Gamma με $\gamma_1=0.5$. Οι διαφορές είναι πιο μεγάλες όταν πρόκειται για την εικόνα που προκύπτει με εξισορρόπηση ιστογράμματος, ωστόσο παραμένουν μικρές, εφόσον πρόκειται ουσιαστικά για την ίδια εικόνα.

3.3.2 Μελέτη επίδρασης του μεγέθους παραθύρου ανάλυσης r

Σε αυτήν την ενότητα, εξετάζεται η επίδραση του μεγέθους του παραθύρου ανάλυσης (r) στα υπολογιζόμενα χαρακτηριστικά υφής. Μεγαλύτερες τιμές r οδηγούν σε μικρότερες εικόνες ranklet RI, καθώς το πλήθος των επικαλυπτόμενων παραθύρων μικραίνει. Ο μετασχηματισμός ranklet εφαρμόστηκε για τις κλίμακες $r=4, 8, 16$ και 32 . Στην εικόνα 3.17 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα εφαρμογής του μετασχηματισμού ranklet σε μια εικόνα αθηρωματικής πλάκας μεγέθους 53×231 , για το σύνολο κλιμάκων r . Οι εικόνες RI που προκύπτουν έχουν διαφορετικά μεγέθη $50 \times 228, 46 \times 224, 38 \times 216$ και 22×200 αντίστοιχα, ωστόσο η μορφή των εικόνων είναι συγκρίσιμη. Το παράδειγμα αφορά συμπτωματική κλινική περίπτωση με στένωση 99%. Όπως αναφέρθηκε στο εισαγωγικό κεφάλαιο, η περιοχή όπου έχει σχηματιστεί αθηρωματική πλάκα εμφανίζεται πιο φωτεινή σε σχέση με τις υπόλοιπες περιοχές σε μια εικόνα υπερήχου. Στον οριζόντιο προσανατολισμό και για κλίμακα $r=16$, η

περιοχή αυτή είναι περισσότερο προφανής σε σχέση με τις μικρότερες κλίμακες, καθώς η περιοχή είναι πιο φωτεινή. Πιο φωτεινή σημαίνει ότι οι συντελεστές στην περιοχή αυτή έχουν τιμές κοντινές στο +1 και τα σύνολα T των παραθύρων της αρχικής εικόνας είναι πιο φωτεινά από τα σύνολα C (στον οριζόντιο προσανατολισμό είναι: $\left[\frac{T}{C}\right]$). Η περιοχή της αθηρωματικής πλάκας είναι ευκρινέστερη κυρίως από την εικόνα με οριζόντιο προσανατολισμό, καθώς στους υπερήχους καρωτίδας τα τοιχώματα είναι προσανατολισμένα οριζόντια και η πλάκα συνήθως οριζόντια ή διαγώνια. Συνεπώς, η οριζόντια κατεύθυνση διαχωρισμού του παραθύρου αναδεικνύει πιο έντονα μεταβολές με οριζόντιο προσανατολισμό.



Εικόνα 3. 17: Απεικονίσεις των τριών μετασχηματισμένων εικόνων ranklet R_{σ} , μία για κάθε κατεύθυνση ανάλυσης (δείκτης σ), οριζόντια(h), κατακόρυφη (v) και διαγώνια (d), που

προκύπτουν από την ανάλυση στην αρχική εικόνα I, για το σύνολο κλιμάκων $r=4, 8, 16$ και 32 (δείκτης r) και επίπεδα κβάντισης $b=21$. Οι τιμές των εικόνων $RI [-1, +1]$ έχουν μετατραπεί στην κλίμακα $[0, +1]$ για λόγους οπτικοποίησης.

Επιβεβαιώνεται ότι μικρά μεγέθη παραθύρου ανάλυσης αποθηκεύουν πληροφορία που αφορά μικρές τοπικές περιοχές (γειτονίες) με αποτέλεσμα να φαίνονται λεπτομερώς οι μεταβάσεις από φωτεινές περιοχές σε σκοτεινές και το αντίστροφο. Επειδή τα μεγαλύτερα παράθυρα σχετίζονται με πιο μεγάλες γειτονίες, βοηθούν στην καλύτερη, οπτικά, αναγνώριση των περιοχών όπου εντοπίζεται η αθηρωματική πλάκα. Επίσης, παρατηρείται ότι μεταξύ των διαδοχικών αλλαγών τιμών κλίμακας r , οι εικόνες RI , για κάθε κατεύθυνση ανάλυσης, είναι όμοιες, ίσως λίγο πιο εξομαλυσμένες καθώς αυξάνεται η κλίμακα.

Αν και υψηλή κλίμακα βοηθά στον εντοπισμό των κρίσιμων περιοχών στην καρωτιδική αρτηρία, έχει μικρή διακριτική ικανότητα, ενώ η χαμηλή περιγράφει με μεγαλύτερη λεπτομέρεια την υφή και τα όρια της αθηρωματικής πλάκας και κατ' επέκταση τη στένωση που εμφανίζεται. Στους πίνακες 3.22-3.24 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές και οι τυπικές αποκλίσεις των δέκα χαρακτηριστικών υφής που εξάγονται για ένα σύνολο 89 εικόνων υπερήχου B-σάρωσης για κάθε κλίμακα r .

Πίνακας 3. 22: Μέσες τιμές $\pm$ τυπικές αποκλίσεις χαρακτηριστικών υφής για μέγεθος παραθύρου (κλίμακα) $r=4, 8, 16$ ή 32 . Η έντονη γραφή (bold) δείχνει στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των δύο αναλύσεων με διαφορετική τιμή r . Επίπεδα κβάντισης $b=21$. Οριζόντιος προσανατολισμός ανάλυσης. Πλήθος εικόνων ανά κλίμακα $n=89$.

horizontal	$r=4$	$r=8$	$r=16$	$r=32$	$r=4$ vs $r=8$	$r=4$ vs $r=16$	$r=4$ vs $r=32$
Autocorrelation	148,152 $\pm$ 22,129	143,53 $\pm$ 32,619	137,444 $\pm$ 50,519	130,385 $\pm$ 81,784	<0,001	<0,001	<0,001
Cluster Prominence	44051,576 $\pm$ 9696,309	27886,067 $\pm$ 8738,905	21664,353 $\pm$ 9421,329	12478,08 $\pm$ 10624,997	<0,001	<0,001	<0,001
Cluster Shade	50,562 $\pm$ 379,024	44,394 $\pm$ 344,295	69,439 $\pm$ 409,118	42,719 $\pm$ 356,344	0,33	0,75	0,49
Contrast	34,535 $\pm$ 5,282	6,673 $\pm$ 1,103	1,473 $\pm$ 0,314	0,464 $\pm$ 0,146	<0,001	<0,001	<0,001
Correlation	0,637 $\pm$ 0,064	0,888 $\pm$ 0,024	0,968 $\pm$ 0,009	0,982 $\pm$ 0,021	<0,001	<0,001	<0,001
Dissimilarity	0,008 $\pm$ 0,047	0,012 $\pm$ 0,07	0,007 $\pm$ 0,099	0,017 $\pm$ 0,195	0,65	0,78	0,93
Energy	0,015 $\pm$ 0,01	0,01 $\pm$ 0,005	0,022 $\pm$ 0,008	0,058 $\pm$ 0,044	<0,001	<0,001	<0,001
Haralick Correlation	-1089,135 $\pm$ 227,445	-1731,184 $\pm$ 613,378	-2341,034 $\pm$ 2123,212	-8659,07 $\pm$ 38198,769	<0,001	<0,001	<0,001
Homogeneity	0,377 $\pm$ 0,046	0,496 $\pm$ 0,029	0,671 $\pm$ 0,027	0,803 $\pm$ 0,042	<0,001	<0,001	<0,001
Inverse Dif Normalized	0,633 $\pm$ 0,038	0,827 $\pm$ 0,02	0,943 $\pm$ 0,01	0,979 $\pm$ 0,006	<0,001	<0,001	<0,001

Πίνακας 3. 23: Μέσες τιμές $\pm$ τυπικές αποκλίσεις χαρακτηριστικών υφής για μέγεθος παραθύρου (κλίμακα) $r=4, 8, 16$ ή 32 . Η έντονη γραφή (**bold**) δείχνει στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των δύο αναλύσεων με διαφορετική τιμή r . Επίπεδα κβάντισης $b=21$. Κατακόρυφος προσανατολισμός ανάλυσης. Πλήθος εικόνων ανά κλίμακα $n=89$.

vertical	$r=4$	$r=8$	$r=16$	$r=32$	$r=4$ vs $r=8$	$r=4$ vs $r=16$	$r=4$ vs $r=32$
Autocorrelation	131,571 $\pm$ 6,116	130,05 $\pm$ 8,634	128,747 $\pm$ 14,004	128,185 $\pm$ 22,248	<0,001	<0,001	0,16
Cluster Prominence	6848,202 $\pm$ 2351,604	4314,023 $\pm$ 1990,899	3502,855 $\pm$ 2465,184	3563,795 $\pm$ 3279,727	<0,001	<0,001	<0,001
Cluster Shade	-0,069 $\pm$ 23,182	0,303 $\pm$ 32,956	0,443 $\pm$ 53,014	1,454 $\pm$ 100,561	0,53	0,79	0,87
Contrast	6,215 $\pm$ 1,476	1,817 $\pm$ 0,227	0,532 $\pm$ 0,078	0,223 $\pm$ 0,052	<0,001	<0,001	<0,001
Correlation	0,772 $\pm$ 0,042	0,905 $\pm$ 0,021	0,965 $\pm$ 0,012	0,982 $\pm$ 0,011	<0,001	<0,001	<0,001
Dissimilarity	0,002 $\pm$ 0,007	0,004 $\pm$ 0,01	0,006 $\pm$ 0,016	0,013 $\pm$ 0,028	<0,001	<0,001	<0,001
Energy	0,012 $\pm$ 0,009	0,022 $\pm$ 0,006	0,044 $\pm$ 0,012	0,087 $\pm$ 0,05	<0,001	<0,001	<0,001
Haralick Correlation	-3986,147 $\pm$ 745,637	-5636,79 $\pm$ 1297,441	-7195,219 $\pm$ 2937,597	-9675,023 $\pm$ 8060,011	<0,001	<0,001	<0,001
Homogeneity	0,477 $\pm$ 0,028	0,616 $\pm$ 0,019	0,777 $\pm$ 0,02	0,889 $\pm$ 0,024	<0,001	<0,001	<0,001
Inverse Dif Normalized	0,834 $\pm$ 0,023	0,932 $\pm$ 0,007	0,977 $\pm$ 0,003	0,99 $\pm$ 0,002	<0,001	<0,001	<0,001

Πίνακας 3. 24: Μέσες τιμές $\pm$ τυπικές αποκλίσεις χαρακτηριστικών υφής για μέγεθος παραθύρου (κλίμακα) $r=4, 8, 16$ ή 32 . Η έντονη γραφή (**bold**) δείχνει στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των δύο αναλύσεων με διαφορετική τιμή r . Επίπεδα κβάντισης $b=21$. Διαγώνιος προσανατολισμός ανάλυσης. Πλήθος εικόνων ανά κλίμακα $n=89$.

diagonal	$r=4$	$r=8$	$r=16$	$r=32$	$r=4$ vs $r=8$	$r=4$ vs $r=16$	$r=4$ vs $r=32$
Autocorrelation	124,289 $\pm$ 0,484	125,767 $\pm$ 0,883	125,053 $\pm$ 2,165	126,366 $\pm$ 7,093	<0,001	<0,001	0,01
Cluster Prominence	1844,676 $\pm$ 313,332	1450,071 $\pm$ 396,935	787,078 $\pm$ 356,808	817,381 $\pm$ 895,837	<0,001	<0,001	<0,001
Cluster Shade	-0,393 $\pm$ 3,976	-0,751 $\pm$ 5,673	-1,57 $\pm$ 8,022	-3,505 $\pm$ 25,908	0,28	0,27	0,42
Contrast	9,092 $\pm$ 1,851	2,948 $\pm$ 0,366	0,766 $\pm$ 0,102	0,264 $\pm$ 0,047	<0,001	<0,001	<0,001
Correlation	0,448 $\pm$ 0,058	0,756 $\pm$ 0,027	0,9 $\pm$ 0,021	0,95 $\pm$ 0,037	<0,001	<0,001	<0,001
Dissimilarity	0 $\pm$ 0,003	0 $\pm$ 0,003	-0,001 $\pm$ 0,009	-0,002 $\pm$ 0,028	0,57	0,13	0,05
Energy	0,016 $\pm$ 0,011	0,024 $\pm$ 0,007	0,054 $\pm$ 0,01	0,116 $\pm$ 0,06	<0,001	<0,001	<0,001
Haralick Correlation	-6603,217 $\pm$ 963,617	-8923,247 $\pm$ 1333,152	-14177,643 $\pm$ 3492,815	-23652,63 $\pm$ 23845,156	<0,001	<0,001	<0,001
Homogeneity	0,441 $\pm$ 0,037	0,558 $\pm$ 0,025	0,729 $\pm$ 0,021	0,87 $\pm$ 0,022	<0,001	<0,001	<0,001
Inverse Dif Normalized	0,791 $\pm$ 0,029	0,899 $\pm$ 0,011	0,967 $\pm$ 0,004	0,988 $\pm$ 0,002	<0,001	<0,001	<0,001

Σε κάθε κατεύθυνση ανάλυσης, παρατηρείται ότι τα χαρακτηριστικά υφής διαφέρουν στατιστικά σημαντικά καθώς μεταβάλλεται το μέγεθος του παραθύρου r , εκτός των cluster shade και dissimilarity. Γενικά, η αντίθεση (contrast) και η συσχέτιση (correlation) παρουσιάζουν αντίθετη μεταβολή. Δηλαδή, αν υπάρχει αύξηση της τιμής του ενός με μεταβολή της κλίμακας r , υπάρχει μείωση του άλλου για την ίδια μεταβολή r . Επειδή, όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.17, οι εικόνες που προκύπτουν για διαφορετικές κλίμακες είναι διαφορετικές, με αυτές των μεγαλύτερων κλιμάκων να εμφανίζονται πιο εξομαλυμένες, τα χαρακτηριστικά παίρνουν διαφορετικές τιμές αντίστοιχα. Για παράδειγμα, όσο μεγαλώνουν οι διαστάσεις του παραθύρου, η

εικόνα έχει περισσότερο ομαλές μεταβολές τιμών, με αποτέλεσμα η αντίθεση (contrast) να παίρνει πιο χαμηλές τιμές, ενώ η ομοιογένεια (homogeneity) και η συσχέτιση πιο υψηλές.

Διαφορετικά μεγέθη παραθύρου ανάλυσης περιλαμβάνουν πληροφορία για τη μορφολογία διαφορετικού εύρους (γειτονιάς) της πλάκας μιας καρωτίδας. Συνεπώς, η εξαγωγή χαρακτηριστικών υφής για το κατάλληλο σύνολο μεγεθών παραθύρων ανάλυσης είναι απαραίτητη για τη βελτίωση της διακριτικής ικανότητας του μετασχηματισμού στο διαχωρισμό καρωτίδων σε υψηλού και χαμηλού κινδύνου.

3.3.3 Μελέτη επίδρασης του πλήθους επιπέδων κβάντισης b

Σε αυτήν την ενότητα, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα εφαρμογής του μετασχηματισμού σε πραγματικές εικόνες υπερήχου καρωτίδας B-σάρωσης, για διαφορετικό πλήθος επιπέδων κβάντισης b. Περισσότερα επίπεδα κβάντισης οδηγούν σε περισσότερες διακριτές τιμές των συντελεστών ranklet, με αποτέλεσμα οι πιθανότητες συνεμφάνισης ζευγών φωτεινότητων να μικραίνουν. Έγινε εφαρμογή του φίλτρου ranklet για τα επίπεδα κβάντισης $b=\{15, 21, 26\}$. Στους πίνακες 3.25-3.27 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές και οι τυπικές αποκλίσεις των δέκα χαρακτηριστικών υφής που εξάγονται για ένα σύνολο 94 πραγματικών εικόνων υπερήχου B-σάρωσης για τα διαφορετικά επίπεδα κβάντισης.

Πίνακας 3. 25: Μέσες τιμές $\pm$ τυπικές αποκλίσεις χαρακτηριστικών υφής για πλήθος επιπέδων κβάντισης $b=15, 21$ ή 26 . Η έντονη γραφή (bold) δείχνει στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των δύο αναλύσεων με διαφορετική τιμή b. Μέγεθος παραθύρου $r=8$. Οριζόντιος προσανατολισμός ανάλυσης. Πλήθος εικόνων για κάθε αριθμό επιπέδων κβάντισης $n=94$.

horizontal	b=15	b=21	b=26	b=15 vs b=21	b=15 vs b=21
Autocorrelation	72,395 $\pm$ 18,505	138,548 $\pm$ 36,205	209,955 $\pm$ 55,511	<0,001	<0,001
Cluster Prominence	6856,559 $\pm$ 2245,369	28212,432 $\pm$ 9220,855	68450,595 $\pm$ 22309,881	<0,001	<0,001
Cluster Shade	34,698 $\pm$ 135,631	101,764 $\pm$ 393,578	199,595 $\pm$ 767,416	0,20	0,05
Contrast	3,308 $\pm$ 0,569	6,572 $\pm$ 1,154	10,164 $\pm$ 1,797	<0,001	<0,001
Correlation	0,887 $\pm$ 0,026	0,889 $\pm$ 0,025	0,89 $\pm$ 0,025	0,47	0,35
Dissimilarity	0,011 $\pm$ 0,072	0,016 $\pm$ 0,102	0,021 $\pm$ 0,127	0,94	0,96
Energy	0,022 $\pm$ 0,025	0,013 $\pm$ 0,019	0,009 $\pm$ 0,015	<0,001	<0,001
Haralick Correlation	-911,973 $\pm$ 351,328	-1665,351 $\pm$ 658,786	-2466,297 $\pm$ 985,996	<0,001	<0,001
Homogeneity	0,574 $\pm$ 0,036	0,5 $\pm$ 0,038	0,456 $\pm$ 0,04	<0,001	<0,001
Inverse Dif Normalized	0,863 $\pm$ 0,019	0,83 $\pm$ 0,023	0,806 $\pm$ 0,025	<0,001	<0,001

Πίνακας 3. 26: Μέσες τιμές $\pm$ τυπικές αποκλίσεις χαρακτηριστικών υφής για πλήθος επιπέδων κβάντισης $b=15, 21$ ή 26 . Η έντονη γραφή (bold) δείχνει στατιστικά σημαντική διαφορά

μεταξύ των δύο αναλύσεων με διαφορετική τιμή b . Μέγεθος παραθύρου $r=8$. Κατακόρυφος προσανατολισμός ανάλυσης. Πλήθος εικόνων για κάθε αριθμό επιπέδων κβάντισης $n=94$.

vertical	b=15	b=21	b=26	b=15 vs b=21	b=15 vs b=21
Autocorrelation	68,556±4,785	130,281±9,426	196,712±14,457	<0,001	<0,001
Cluster Prominence	1057,441±524,67	4359,503±2169,906	10610,078±5282,952	<0,001	<0,001
Cluster Shade	-0,237±11,336	-0,42±32,472	-0,323±64,043	0,81	0,74
Contrast	0,973±0,13	1,813±0,267	2,743±0,416	<0,001	<0,001
Correlation	0,896±0,024	0,904±0,022	0,907±0,022	0,01	<0,001
Dissimilarity	0,003±0,009	0,004±0,013	0,005±0,016	0,36	0,15
Energy	0,042±0,012	0,022±0,007	0,015±0,005	<0,001	<0,001
Haralick Correlation	-3145,577±1053,47	-5785,194±1979,466	-8571,055±2912,681	<0,001	<0,001
Homogeneity	0,697±0,021	0,617±0,022	0,566±0,023	<0,001	<0,001
Inverse Dif Normalized	0,946±0,006	0,932±0,008	0,92±0,01	<0,001	<0,001

Πίνακας 3. 27: Μέσες τιμές $\pm$ τυπικές αποκλίσεις χαρακτηριστικών υφής για πλήθος επιπέδων κβάντισης $b=15, 21$ ή 26 . Η έντονη γραφή (**bold**) δείχνει στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των δύο αναλύσεων με διαφορετική τιμή b . Μέγεθος παραθύρου $r=8$. Διαγώνιος προσανατολισμός ανάλυσης. Πλήθος εικόνων για κάθε αριθμό επιπέδων κβάντισης $n=94$.

diagonal	b=15	b=21	b=26	b=15 vs b=21	b=15 vs b=21
Autocorrelation	66,346±0,487	125,752±0,951	189,621±1,552	<0,001	<0,001
Cluster Prominence	347,739±101,367	1423,623±415,487	3458,975±1013,009	<0,001	<0,001
Cluster Shade	-0,392±2,039	-1,194±5,761	-1,89±11,385	0,28	0,20
Contrast	1,509±0,206	2,905±0,422	4,45±0,656	<0,001	<0,001
Correlation	0,746±0,028	0,757±0,027	0,76±0,027	<0,001	<0,001
Dissimilarity	0±0,003	0±0,004	0±0,006	0,53	0,77
Energy	0,046±0,012	0,024±0,008	0,016±0,006	<0,001	<0,001
Haralick Correlation	-4946,976±988,428	-9147,918±1899,034	-13586,266±2838,909	<0,001	<0,001
Homogeneity	0,641±0,025	0,56±0,027	0,51±0,028	<0,001	<0,001
Inverse Dif Normalized	0,922±0,009	0,901±0,012	0,884±0,014	<0,001	<0,001

Οι διαφορές των χαρακτηριστικών υφής (εκτός των cluster shade και dissimilarity) είναι στατιστικά σημαντικές καθώς μεταβάλλεται ο αριθμός των επιπέδων κβάντισης (b). Παρατηρείται ότι, ανάλογα το χαρακτηριστικό υφής δεύτερης τάξης που εξάγεται σημειώνεται είτε μείωση, είτε αύξηση με την αύξηση του αριθμού b . Αυτό, οφείλεται στην εξίσωση από την οποία προκύπτει το καθένα (ενότητα 2.6). Δεδομένου ότι οι τιμές των $GLCM(i,j)$ είναι κανονικοποιημένες, υπάρχει μεγάλη εξάρτηση από τους όρους που πολλαπλασιάζουν τις τιμές $GLCM$, σύμφωνα με τις εξισώσεις των χαρακτηριστικών υφής (10)-(19). Για παράδειγμα, για την αυτοσυσχέτιση (autocorrelation) σημειώνονται μεγάλες αυξήσεις με αύξηση των επιπέδων κβάντισης, καθώς οι όροι $i-j$ αυξάνονται ($1 \leq i, j \leq b$) και οι τιμές που παίρνουν είναι μεγαλύτερες.

Για το χαρακτηριστικό ενέργεια (energy), δεδομένου ότι η τιμή του εξαρτάται από το άθροισμα των τετραγώνων των κανονικοποιημένων τιμών $GLCM$, σημειώνεται μείωση της τιμής του καθώς αυξάνεται το b . Αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς οι συνεχείς τιμές του διαστήματος $[-1, +1]$ κατανέμονται σε περισσότερες το πλήθος διακριτές τιμές, με αποτέλεσμα οι πιθανότητες συνεμφάνισης ζευγών τιμών να μειώνονται.

Συνεπώς, για τη σύγκριση και το χαρακτηρισμό αθηρωματικών πλακών ως συμπτωματικές ή ασυμπτωματικές, με βάση χαρακτηριστικά υφής, όπως είναι η αυτοσυσχέτιση, πρέπει το πλήθος των επιπέδων κβάντισης (b), να διατηρείται σταθερό, ώστε να υπάρχει ένα σημείο αναφοράς για τη σύγκριση των τιμών τους.

3.3.4 Σύγκριση χαρακτηριστικών για περιπτώσεις αθηρωματικής καρωτίδας με υψηλή και χαμηλή στένωση

Για τον εντοπισμό στατιστικά σημαντικών διαφορών μεταξύ των περιπτώσεων χαμηλής ($<70\%$) και υψηλής ($\geq 70\%$) στένωσης στην περιοχή της αθηρωματικής πλάκας, εφαρμόστηκε ο μετασχηματισμός ranklet σε δύο σύνολα πραγματικών εικόνων, ένα για κάθε περίπτωση. Οι πίνακες 3.28-3.30 παρουσιάζουν τις τιμές των χαρακτηριστικών υφής που εξάγονται. Είναι προφανές ότι οι στατιστικά σημαντικές διαφορές που παρουσιάζονται στα χαρακτηριστικά υφής μεταξύ των δύο συνόλων, είναι περισσότερες στην ανάλυση με οριζόντιο προσανατολισμό (9) σε σχέση με τις άλλες δύο κατευθύνσεις (2 για την κατακόρυφη και 4 για τη διαγώνια). Αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς η καρωτίδα και η αθηρωματική πλάκα σε διαμήκεις τομές υπερήχων έχουν οριζόντιο προσανατολισμό, με αποτέλεσμα οι διαφορές στην υφή είναι πιο έντονες σε αυτήν την κατεύθυνση ανάλυσης.

Πίνακας 3. 28: Μέσες τιμές $\pm$ τυπικές αποκλίσεις χαρακτηριστικών υφής για τις περιπτώσεις χαμηλής (<70%) και υψηλής ($\geq 70\%$) στένωσης με πλήθος εικόνων $n_{\text{χαμηλής}}=26$ και $n_{\text{υψηλής}}=62$ εικόνες αντίστοιχα. Η έντονη γραφή (**bold**) δείχνει στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των κατηγοριών. Μέγεθος παραθύρου $r=8$ και επίπεδα κβάντισης $b=21$. Οριζόντιος προσανατολισμός ανάλυσης.

horizontal	στένωση < 70%	στένωση $\geq 70\%$	p value
Autocorrelation	133,91 $\pm$ 39,577	140,81 $\pm$ 35,703	0,31
Cluster Prominence	33718,774 $\pm$ 10960,447	26226,237 $\pm$ 7334,309	<0,001
Cluster Shade	233,027 $\pm$ 528,334	48,213 $\pm$ 316,5	0,04
Contrast	6,139 $\pm$ 0,965	6,665 $\pm$ 1,165	0,02
Correlation	0,905 $\pm$ 0,023	0,885 $\pm$ 0,022	<0,001
Dissimilarity	0,064 $\pm$ 0,146	-0,003 $\pm$ 0,075	0,01
Energy	0,016 $\pm$ 0,017	0,012 $\pm$ 0,02	<0,001
Haralick Correlation	-1379,635 $\pm$ 502,017	-1771,396 $\pm$ 689,194	0,01
Homogeneity	0,521 $\pm$ 0,04	0,494 $\pm$ 0,036	<0,001
Inverse Dif Normalized	0,841 $\pm$ 0,019	0,827 $\pm$ 0,023	<0,001

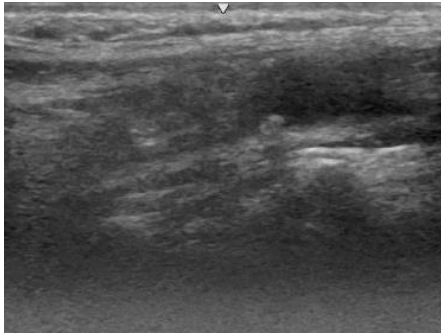
Πίνακας 3. 29: Μέσες τιμές $\pm$ τυπικές αποκλίσεις χαρακτηριστικών υφής για τις περιπτώσεις χαμηλής (<70%) και υψηλής ($\geq 70\%$) στένωσης με πλήθος εικόνων $n_{\text{χαμηλής}}=26$ και $n_{\text{υψηλής}}=62$ εικόνες αντίστοιχα. Η έντονη γραφή (**bold**) δείχνει στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των κατηγοριών. Μέγεθος παραθύρου $r=8$ και επίπεδα κβάντισης $b=21$. Κατακόρυφος προσανατολισμός ανάλυσης.

vertical	στένωση < 70%	στένωση $\geq 70\%$	p value
Autocorrelation	131,111 $\pm$ 11,767	130,594 $\pm$ 8,116	0,77
Cluster Prominence	5315,461 $\pm$ 2746,799	4054,694 $\pm$ 1851,506	0,02
Cluster Shade	-4,791 $\pm$ 43,256	0,665 $\pm$ 27,221	0,79
Contrast	1,885 $\pm$ 0,413	1,783 $\pm$ 0,18	0,30
Correlation	0,91 $\pm$ 0,022	0,903 $\pm$ 0,022	0,13
Dissimilarity	0,005 $\pm$ 0,017	0,004 $\pm$ 0,011	0,47
Energy	0,023 $\pm$ 0,01	0,022 $\pm$ 0,005	0,47
Haralick Correlation	-5428,14 $\pm$ 2697,793	-5927,671 $\pm$ 1673,729	0,02
Homogeneity	0,618 $\pm$ 0,035	0,617 $\pm$ 0,015	0,82
Inverse Dif Normalized	0,93 $\pm$ 0,013	0,932 $\pm$ 0,006	0,46

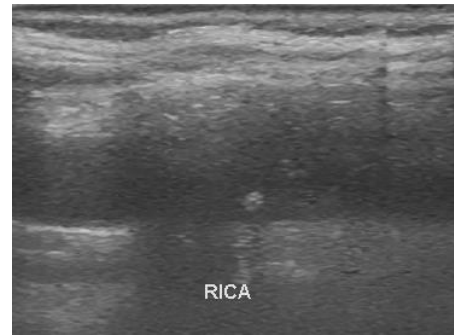
Πίνακας 3. 30: Μέσες τιμές $\pm$ τυπικές αποκλίσεις χαρακτηριστικών υφής για τις περιπτώσεις χαμηλής (<70%) και υψηλής ($\geq 70\%$) στένωσης με πλήθος εικόνων $n_{\text{χαμηλής}}=26$ και $n_{\text{υψηλής}}=62$ εικόνες αντίστοιχα. Η έντονη γραφή (**bold**) δείχνει στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των κατηγοριών. Μέγεθος παραθύρου $r=8$ και επίπεδα κβάντισης $b=21$. Διαγώνιος προσανατολισμός ανάλυσης.

diagonal	στένωση < 70%	στένωση $\geq 70\%$	p value
Autocorrelation	125,693 $\pm$ 0,961	125,751 $\pm$ 0,973	0,50
Cluster Prominence	1340,658 $\pm$ 397,461	1437,187 $\pm$ 424,968	0,42
Cluster Shade	-2,512 $\pm$ 7,33	-1,118 $\pm$ 4,847	0,61
Contrast	2,704 $\pm$ 0,551	2,963 $\pm$ 0,307	0,02
Correlation	0,763 $\pm$ 0,026	0,754 $\pm$ 0,028	0,27
Dissimilarity	-0,001 $\pm$ 0,006	0 $\pm$ 0,004	0,21
Energy	0,028 $\pm$ 0,012	0,023 $\pm$ 0,005	0,05
Haralick Correlation	-9710,523 $\pm$ 2233,698	-9003,827 $\pm$ 1754,443	0,17
Homogeneity	0,574 $\pm$ 0,039	0,555 $\pm$ 0,018	0,03
Inverse Dif Normalized	0,907 $\pm$ 0,016	0,899 $\pm$ 0,009	0,02

Συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι στην οριζόντια κατεύθυνση οι αθηρωματικές καρωτίδες με χαμηλή στένωση έχουν πιο υψηλή τιμή συσχέτισης (correlation), σε σχέση με αυτές με υψηλή στένωση. Ανάλογα είναι τα αποτελέσματα και για τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά εκτός της αυτοσυσχέτισης (autocorrelation), η οποία δεν παρουσιάζει στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των δύο ειδών αθηρωματικών καρωτίδων. Όσον αφορά το χαρακτηριστικό υφής αντίθεση (contrast), οι εικόνες καρωτίδων με υψηλή στένωση έχουν μεγαλύτερη τιμή αντίθεσης σε σχέση με αυτές με χαμηλή. Επειδή, συνήθως, για το χαρακτηρισμό της υφής μιας εικόνας λαμβάνεται υπόψη ο συνδυασμός περισσότερων από ένα χαρακτηριστικά, και ενδεχομένως για άλλο μέγεθος παραθύρου να παρουσιάζονται περισσότερες σημαντικές διαφορές και στις άλλες κατευθύνσεις, η ορθή επιλογή των χαρακτηριστικών είναι καθοριστική για την ανάλυση υφής των εικόνων υπερήχου καρωτίδας. Δηλαδή, ακόμα και στις άλλες κατευθύνσεις, η συνδυασμένη πληροφορία μπορεί να οδηγήσει σε αποτελεσματική διάκριση των καρωτίδων ως προς το βαθμό κινδύνου ρήξης.



Αρχική εικόνα (α)



Αρχική εικόνα (β)



Περιοχή πλάκας (α)



Περιοχή πλάκας (β)



R_{8h} (α)



R_{8h} (β)



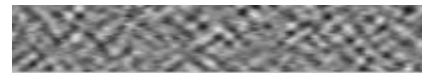
R_{8v} (α)



R_{8v} (β)



R_{8d} (α)



R_{8d} (β)

Εικόνα 3. 18: Παράδειγμα απεικόνισης της απομονωμένης περιοχής πλάκας και των μετασχηματισμένων εικόνων ranklet R_r , όπου $r=8$ το μέγεθος παραθύρου ανάλυσης και ο η κατεύθυνση ανάλυσης, για περιστατικό (α) χαμηλής στένωσης (20%) και (β) υψηλής στένωσης (95%). Επίπεδα κβάντισης $b=21$. Η καρωτίδα με την υψηλή στένωση παρουσιάζει περισσότερες διακυμάνσεις από την καρωτίδα με τη χαμηλή στένωση, στην οριζόντια κατεύθυνση. Οι τιμές των εικόνων $RI [-1, +1]$ έχουν μετατραπεί στην κλίμακα $[0, +1]$ για λόγους οπτικοποίησης.

3.3.5 Σύγκριση χαρακτηριστικών των δύο πλακών που εμφανίζονται στην ίδια εικόνα υπερήχου καρωτίδας

Οι πίνακες 3.31-3.33 παρουσιάζουν τις τιμές των χαρακτηριστικών υφής που εξάγονται για τις αθηρωματικές πλάκες που εντοπίζονται στην ίδια καρωτίδα, δηλαδή στον ίδιο ασθενή, με στόχο τη διερεύνηση ύπαρξης παρόμοιων μορφολογικά χαρακτηριστικών μεταξύ των δύο πλακών.

Πίνακας 3. 31: Μέσες τιμές $\pm$ τυπικές αποκλίσεις χαρακτηριστικών υφής για την πρώτη και τη δεύτερη πλάκα κάθε καρωτίδας. Η έντονη γραφή (**bold**) δείχνει στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των κατηγοριών. Μέγεθος παραθύρου $r=8$ και επίπεδα κβάντισης $b=21$. Μέγεθος δείγματος των πλακών 1 και 2, $n=54$. Οριζόντιος προσανατολισμός ανάλυσης.

horizontal	πλάκα 1	πλάκα 2	p value
Autocorrelation	136,153 $\pm$ 40,6	181,197 $\pm$ 46,611	<0,001
Cluster Prominence	28349,622 $\pm$ 7819,382	30688,723 $\pm$ 11604,803	0,43
Cluster Shade	128,805 $\pm$ 430,298	-303,331 $\pm$ 481,363	<0,001
Contrast	6,655 $\pm$ 1,265	6,894 $\pm$ 1,124	0,38
Correlation	0,889 $\pm$ 0,023	0,887 $\pm$ 0,022	0,60
Dissimilarity	-0,002 $\pm$ 0,112	0,01 $\pm$ 0,07	0,41
Energy	0,015 $\pm$ 0,024	0,013 $\pm$ 0,007	0,14
Haralick Correlation	-1603,379 $\pm$ 654,017	-2325,133 $\pm$ 1222,009	<0,001
Homogeneity	0,501 $\pm$ 0,043	0,5 $\pm$ 0,03	0,51
Inverse Dif Normalized	0,829 $\pm$ 0,025	0,826 $\pm$ 0,02	0,70

Πίνακας 3. 32: Μέσες τιμές $\pm$ τυπικές αποκλίσεις χαρακτηριστικών υφής για την πρώτη και τη δεύτερη πλάκα κάθε καρωτίδας. Η έντονη γραφή (**bold**) δείχνει στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των κατηγοριών. Μέγεθος παραθύρου $r=8$ και επίπεδα κβάντισης $b=21$. Μέγεθος δείγματος των πλακών 1 και 2, $n=54$. Κατακόρυφος προσανατολισμός ανάλυσης.

vertical	πλάκα 1	πλάκα 2	p value
Autocorrelation	92,743 $\pm$ 60,36	90,121 $\pm$ 58,617	0,20
Cluster Prominence	3143,77 $\pm$ 2606,194	2667,825 $\pm$ 2067,856	0,11
Cluster Shade	4,121 $\pm$ 28,366	-5,897 $\pm$ 22,388	0,00
Contrast	1,263 $\pm$ 0,854	1,26 $\pm$ 0,845	0,84
Correlation	0,642 $\pm$ 0,415	0,639 $\pm$ 0,413	0,14
Dissimilarity	0,003 $\pm$ 0,012	0 $\pm$ 0,011	0,03
Energy	0,016 $\pm$ 0,013	0,016 $\pm$ 0,012	0,34
Haralick Correlation	-4187,83 $\pm$ 3498,242	-4121,462 $\pm$ 2804,133	0,19
Homogeneity	0,439 $\pm$ 0,284	0,439 $\pm$ 0,284	0,76
Inverse Dif Normalized	0,661 $\pm$ 0,426	0,661 $\pm$ 0,426	0,78

Πίνακας 3. 33: Μέσες τιμές $\pm$ τυπικές αποκλίσεις χαρακτηριστικών υφής για την πρώτη και τη δεύτερη πλάκα κάθε καρωτίδας. Η έντονη γραφή (**bold**) δείχνει στατιστικά σημαντική

διαφορά μεταξύ των κατηγοριών. Μέγεθος παραθύρου $r=8$ και επίπεδα κβάντισης $b=21$. Μέγεθος δείγματος των πλακών 1 και 2, $n=54$. Διαγώνιος προσανατολισμός ανάλυσης.

diagonal	πλάκα 1	πλάκα 2	p value
Autocorrelation	89,127±57,499	88,868±57,331	0,21
Cluster Prominence	1018,612±758,617	1045,541±744,694	0,85
Cluster Shade	-1,165±5,2	0,365±6,809	0,38
Contrast	2,01±1,364	2,023±1,351	0,84
Correlation	0,54±0,349	0,541±0,349	0,85
Dissimilarity	0±0,004	0,001±0,006	0,22
Energy	0,018±0,014	0,017±0,012	0,76
Haralick Correlation	-6625,879±4792,824	-6345,566±4246,216	0,97
Homogeneity	0,4±0,259	0,4±0,259	0,72
Inverse Dif Normalized	0,639±0,413	0,639±0,412	0,79

Παρατηρείται ότι στην οριζόντια και την κατακόρυφη κατεύθυνση ανάλυσης, τα χαρακτηριστικά υφής που διαφέρουν στατιστικά σημαντικά είναι μόνο 3 και 2 αντίστοιχα, ενώ στη διαγώνια όλα τα χαρακτηριστικά υφής φαίνεται να μη διαφέρουν μεταξύ των δύο πλακών. Αυτό σημαίνει ότι οι πλάκες που σχηματίζονται σε μια καρτίδα παρουσιάζουν ομοιότητες ως προς την υφή και τη μορφολογία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ανάλυση υφής της αθηρωματικής πλάκας της καρωτίδας από εικόνες υπερήχου είναι μια διαδικασία που απαιτεί ακρίβεια και όσο το δυνατό μικρότερη υπολογιστική πολυπλοκότητα. Στην παρούσα εργασία, αναπτύχθηκε ο αλγόριθμος που εφαρμόζει το μη-παραμετρικό, πολυ-κλιμακωτό, πολλαπλών κατευθύνσεων μετασχηματισμό ranklet για την εξαγωγή χαρακτηριστικών υφής δεύτερης τάξης που περιγράφουν τη μορφολογία της πλάκας. Στο κεφάλαιο αυτό, συνοψίζονται και σχολιάζονται τα ευρήματα του προηγούμενου κεφαλαίου και προτείνονται θέματα για μελλοντική έρευνα.

4.1 Ευρήματα και σχολιασμός

Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της εφαρμογής του μετασχηματισμού τόσο σε συνθετικές εικόνες, όσο και σε πραγματικές εικόνες υπερήχων καρωτίδας πραγματοποιήθηκε μη-παραμετρικός στατιστικός έλεγχος Mann-Whitney και Wilcoxon test.

Στην ενότητα που εξετάζεται η επίδραση του τύπου του ορίου του σχήματος (απότομη ή σταδιακή μεταβολή φωτεινότητας) αποδείχθηκε ότι εικόνες που έχουν όμοια μορφή ως προς το σχήμα, αλλά εμφανίζουν κλιμάκωση στη φωτεινότητα που περιγράφει το σχήμα παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές στις τιμές των χαρακτηριστικών υφής, όπως είναι αναμενόμενο αφού η υφή της εικόνας είναι διαφορετική. Επίσης, τα χαρακτηριστικά υφής διαφέρουν σημαντικά μεταξύ των εικόνων που περιέχουν διαφορετικά σχήματα (π.χ. κύκλος έναντι ευθείας γραμμής), σύμφωνα με την ενότητα όπου διερευνάται η ικανότητα του μετασχηματισμού να αναγνωρίζει σχήματα. Στην ίδια ενότητα διαπιστώθηκε επίσης, ότι ο μετασχηματισμός παρουσιάζει ανεξαρτησία ως προς την περιστροφή 90° των εικόνων, όπως αποδείχθηκε και από την ανάλυση σε συνθετικές εικόνες οριζόντιων και κατακόρυφων σχημάτων, αθροίζοντας τα χαρακτηριστικά υφής των τριών κατευθύνσεων ανάλυσης, οριζόντιας, κατακόρυφης και διαγώνιας (90° -rotation invariance). Ανεξαρτησία παρουσιάζει και ως προς τις τιμές καθαυτές των φωτεινότητων της εικόνας (Gray scale invariance), σύμφωνα με τη σύγκριση των χαρακτηριστικών υφής που εξάγονται για την εικόνα απευθείας σε σχέση με αυτά που προκύπτουν ύστερα από προεπεξεργασία της με στόχο τη βελτίωση της ποιότητάς της, εφαρμόζοντας φίλτρα Gamma και εξισορρόπησης ιστογράμματος, αφού τα χαρακτηριστικά υφής δεν μεταβάλλονται στατιστικά σημαντικά. Αυτό είναι αναμενόμενο, αφού ο μετασχηματισμός σχετίζεται με την τάξη των τιμών των στοιχείων της εικόνας και όχι με τις τιμές τους.

Από μελέτη επίδρασης του μεγέθους του παραθύρου ανάλυσης (κλίμακας) συμπεραίνεται ότι καθώς μεταβάλλεται το μέγεθος παραθύρου ανάλυσης, δηλαδή καθώς μεταβάλλεται η έκταση της περιοχής (γειτονιάς) για την οποία υπολογίζονται οι συντελεστές ranklet της εικόνας, τα χαρακτηριστικά υφής διαφέρουν σημαντικά. Οι εικόνες ranklet υψηλότερης κλίμακας, δηλαδή οι εικόνες που προκύπτουν για σχετικά μεγάλο μέγεθος παραθύρου, παρουσιάζονται πιο εξομαλυμένες σε σχέση με τις εικόνες ranklet χαμηλής κλίμακας. Οι εικόνες ranklet μικρού μεγέθους παραθύρου ανάλυσης περιγράφουν με περισσότερη λεπτομέρεια τις αλλαγές φωτεινότητας που παρουσιάζονται στην εικόνα, αφού η περιοχή αναφοράς είναι μικρότερη. Συνεπώς, χαρακτηριστικά διαφορετικών κλιμάκων μπορούν να συνδυαστούν για υψηλότερη αξιοπιστία στην περιγραφή της υφής μιας εικόνας.

Μετά την εφαρμογή του μετασχηματισμού στην εικόνα, οι συντελεστές ranklet κβαντίζονται, έτσι ώστε να υπολογιστούν οι πιθανότητες συνεμφάνισης δύο τιμών των συντελεστών (GLCM). Η αύξηση των επιπέδων κβάντισης οδηγεί σε περισσότερες διακριτές τιμές για τις οποίες υπολογίζεται η μήτρα GLCM, με αποτέλεσμα τη μείωση των πιθανοτήτων συνεμφάνισης, και κατ' επέκταση σε

διαφορετικές τιμές χαρακτηριστικών υφής, σύμφωνα με την ενότητα όπου μελετάται η επίδραση του πλήθους των επιπέδων κβάντισης. Σημαντικό είναι ο αριθμός των επιπέδων κβάντισης να παραμένει σταθερός κατά την ανάλυση εικόνων ώστε να είναι εφικτή η σύγκριση των χαρακτηριστικών υφής που εξάγονται μεταξύ δύο εικόνων.

Η εφαρμογή του μετασχηματισμού ranklet σε εικόνες υπερήχου καρωτίδας, για τις οποίες απομονώθηκε η περιοχή της πλάκας, οδήγησε σε αρκετά σημαντικές διαφορές στα χαρακτηριστικά υφής, για σταθερό μέγεθος παραθύρου, ανάλογα με το αν αυτές ανήκαν στην κατηγορία υψηλής ή χαμηλής στένωσης. Συνεπώς, ο μετασχηματισμός ranklet είναι ικανός να χαρακτηρίσει περιστατικά καρωτιδικής αθηρωμάτωσης ως υψηλής ή χαμηλής στένωσης, με βάση την υφή. Επίσης, στην ενότητα όπου συγκρίνεται η υφή των πλακών που εντοπίζονται στην ίδια καρωτίδα, αφού σε αρκετούς ασθενείς εμφανίζονταν περισσότερες από μια αθηρωματική πλάκα, η ανάλυση έδειξε ότι οι πλάκες αυτές έχουν την ίδια υφή, καθώς με βάση το στατιστικό έλεγχο τα χαρακτηριστικά υφής δεν παρουσίαζαν σημαντικές διαφορές.

4.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Οι επιδόσεις του μετασχηματισμού ranklet, καθώς και άλλων μετασχηματισμών κυματιδίου ή πολυ-κλιμακωτών μετασχηματισμών που χρησιμοποιούν χαρακτηριστικά υφής είναι ενθαρρυντικές, ωστόσο υπάρχουν σημαντικά περιθώρια βελτίωσης. Σημαντικό ενδιαφέρον για περαιτέρω διερεύνηση παρουσιάζει η απομόνωση των χαρακτηριστικών υφής, των τιμών παραθύρου ανάλυσης και των κατευθύνσεων ανάλυσης, που συμβάλλουν στο χαρακτηρισμό περιστατικών καρωτιδικής αθηρωμάτωσης ως υψηλής ή χαμηλής στένωσης. Με αυτόν τον τρόπο θα λαμβάνονται υπόψη, κάποια χαρακτηριστικά μόνο, της μορφής $Feature_{r,o}$, όπου r το μέγεθος παραθύρου ανάλυσης και o , η κατεύθυνση, για το σχηματισμό ενός διανύσματος χαρακτηριστικών που περιγράφει την εικόνα. Ύστερα, συνδυάζοντας ένα σύνολο διανυσμάτων που περιγράφουν ένα σύνολο εικόνων καρωτίδας, είναι δυνατόν να προκύψει ένα εγκυρότερο σύστημα ταξινόμησης, με κάποια μέθοδο εκπαίδευσης (π.χ. νευρωνικά δίκτυα). Το σύστημα θα παίρνει ως είσοδο το διάνυσμα χαρακτηριστικών υφής της υπό εξέταση εικόνας πλάκας και θα την κατατάσσει στην κλάση που ορίζουν τα περισσότερα διανύσματα του συστήματος ταξινόμησης.

Επίσης, προτείνεται περαιτέρω μελέτη των χαρακτηριστικών υφής που αφορούν τις κατευθύνσεις 0° , 45° , 90° και 135° της μήτρας συνεμφάνισης (GLCM). Στην παρούσα εργασία λαμβάνεται υπόψη η μέση τιμή τους, όμως κάποιες κατευθύνσεις ενδέχεται να παίζουν σημαντικότερο ρόλο στην περιγραφή της υφής της πλάκας, από κάποιες άλλες, εάν παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές στα χαρακτηριστικά μεταξύ δύο κατηγοριών εικόνων. Η μελέτη θα μπορούσε να γίνει και για μεγαλύτερες αποστάσεις συνεμφάνισης τιμών ($d>1$), με στόχο την αναγνώριση μοτίβων εναλλαγών φωτεινότητας στην εικόνα που αναλύεται.

Επιπλέον, σημαντική είναι η διεξαγωγή περαιτέρω έρευνας ως προς τη σημασία των χαρακτηριστικών υφής που περιγράφουν μια πλάκα, για παράδειγμα,

αν οι συμπτωματικές πλάκες ή πλάκες υψηλής στένωσης παρουσιάζουν υψηλή ή χαμηλή αντίθεση (contrast) ή τι σημαίνει υψηλή αντίθεση στην κατεύθυνση 45° για μια εικόνα αθηρωματικής πλάκας.

Η υλοποίηση του μετασχηματισμού ranklet προτείνεται να εφαρμοστεί για την ανάλυση υφής και σε άλλα τμήματα της καρωτιδικής αρτηρίας, όπως είναι το τοίχωμά της και ο αυλός, ή ακόμα και στην ευρύτερη περιοχή της (π.χ. σημείο διχασμού).

4.3 Συμπεράσματα

Το βασικό της συμπέρασμα είναι ότι τα χαρακτηριστικά υφής της αθηρωματικής πλάκας μπορούν να αποτελέσουν δείκτες επικινδυνότητας ρήξης της πλάκας και, επομένως, προτείνεται η ενσωμάτωσή τους σε μελλοντικές συναφείς μελέτες που διερευνούν δείκτες επικινδυνότητας για τη νόσο ή υλοποιούν σχήματα ταξινόμησης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] E. C. S. T. C. Group, «MRC European Carotid Surgery Trial: interim results for symptomatic patients with severe (70-99%) or with mild (0-29%) carotid stenosis.,» *Lancet*, τόμ. 337, pp. 1235-1243, 1991.
- [2] H. Gray, *Anatomy of the Human Body*, Philadelphia: LEA & FEBIGER, 1918.
- [3] Ι. Στοΐτσης, Υπολογιστική επεξεργασία και ανάλυση ακολουθιών εικόνων υπερήχων της καρωτίδας: Συσχέτιση με τη μηχανική συμπεριφορά του αρτηριακού τοιχώματος, Αθήνα, Ελλάς: Διδακτορική διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2007.
- [4] [Ηλεκτρονικό]. Available: http://www2.victoriacollege.edu/dept/bio/Belltutorials/Histology%20Tutorial/Blood%20Vessels/Histology_of_Blood_Vessels.html.
- [5] M. Thubrikar και F. Robicsek, «Pressure-Induced Arterial Wall Stress and Atherosclerosis,» *Ann. Thorac. Surg.*, τόμ. 59, pp. 1594-1603, 1995.
- [6] E. Kyriacou, M. Pattichis, C. Pattichis, A. Mavrommatis, C. Christodoulou, S. Kakkos και A. Nicolaides, «Classification of atherosclerotic carotid plaques using morphological analysis on ultrasound images,» *Appl. Intell.*, τόμ. 30, pp. 3-23, 2009.
- [7] H. Huang, R. Virmani, H. Younis, A. P. Burke, R. D. Kamm και R. T. Lee, «The Impact of Calcification on the Biomechanical Stability of Atherosclerotic Plaques,» *Circulation*, τόμ. 103, pp. 1051-1056, 2001.
- [8] A. Gastounioti, V. Koliass, S. Golemati, N. Tsiaparas, J. S. A., N. Kadoglou, C. Gkekas, J. Kakisis, C. Liapis, P. Karakitsos, I. Sarafis, P. Angelidis και K. Nikita, «CAROTID – A web-based platform for optimal personalized management of atherosclerotic patients,» *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, τόμ. 114, pp. 183-193, 2014.
- [9] D. R. Labarthe, *Epidemiology and Prevention of Cardiovascular Diseases: A Global Challenge*, Sudbury: USA: Jones & Bartlett Learning,, 2011.
- [10] M. Nichols, N. Townsend, R. Luengo-Fernandez, J. Leal, P. Scarborough και M. Rayner, «European Cardiovascular Disease Statistics,» σε *European Heart Network and European Society of Cardiology*, Sophia-Antipolis, 2012.
- [11] V. Roger, A. Go, D. Lloyd-Jones, E. Benjamin, J. Berry, W. Borden, D. Bravata, S. Dai και E. Ford, «Heart disease and stroke statistics,» *American Heart Association*, τόμ. 125, pp. 2-220, 2012.

- [12] [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.e-cardio.gr/default.aspx?pageid=896>.
- [13] S. Golemati, A. Sassano, M. Lever, A. Bharath, S. Dhanji και A. Nicolaides, «Carotid artery wall motion estimated from B-mode ultrasound using region tracking and blockmatching,» *Ultrasound in Medicine and Biology*, τόμ. 29, αρ. 3, pp. 387-399, 2003.
- [14] Δ. Κουτσούρης και Κ. Νικήτα, Ιατρικά απεικονιστικά συστήματα, Ε.Μ.Π, 2001.
- [15] [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.specialistvascularclinic.com.au/carotid-interventions.html>.
- [16] C. Loizou, «A review of ultrasound common carotid artery image and video segmentation techniques,» *Medical and Biological Engineering and Computing*, τόμ. 52, αρ. 10, pp. 1073-1093, 2014.
- [17] N. El-Barghouty, G. Geroulakos, A. Nicolaides, A. Androulakis και V. Bahal, «Computer-Assisted Carotid Plaque Characterisation,» *Eur. J. Vasc. Endovasc. Surg*, τόμ. 9, pp. 389-393, 1995.
- [18] E. Kyriacou, C. Pattichis, M. Pattichis, C. Loizou, C. Christodoulou, S. Kakkos και A. Nicolaides, «A Review of Noninvasive Ultrasound Image Processing Methods in the Analysis of Carotid Plaque Morphology for the Assessment of Stroke Risk,» *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, τόμ. 14, αρ. 4, pp. 1027-1038, 2010.
- [19] S. Golemati, S. Lehareas, N. N. Tsiaparas, A. Gastounioti, A. Chatziioannou, K. S. Nikita και D. N. Perrea, «Toward recognizing the vulnerable asymptomatic atheromatous plaque from B-mode ultrasound: the importance of the morphology of the plaque shoulder,» σε *Ultrasonics Symposium (IUS)*, 2014.
- [20] U. Pohl, P. Holdfeldt, G. Bergstrom, B. Fagerberg, J. Hulthe και T. Gustavsson, «Percentage White: A new Feature for Ultrasound Classification of Plaque Echogenicity in Carotid Artery Atherosclerosis,» *Ultrasound in Medicine and Biology*, τόμ. 36, αρ. 2, pp. 218-226, 2010.
- [21] G. Xian, «An identification method of malignant and benign liver tumors from ultrasonography based on GLCM texture features and fuzzy SVM,» *Expert Systems with Applications*, τόμ. 37, pp. 6737-6741, 2010.
- [22] D. Xu, A. Kurani, J. Furst και D. Raicu, «Run-Length Encoding for Volumetric Texture,» σε *Proc. 4th IASTED International Conference on Visualization, Imaging, and*, Marbella, Spain, 2004.
- [23] S. G. Mougiakakou, S. Golemati, I. Gousias, A. N. Nikolaides και K. S. Nikita, «Computer-Aided Diagnosis of Carotid Atherosclerosis Based on Ultrasound

Image Statistics, Laws' Texture and Neural Networks,» *Ultrasound in Medicine and Biology*, τόμ. 33, αρ. 1, pp. 26-36, 2007.

- [24] J. Stoitsis, S. Golemati και K. Nikita, «A Modular Software System to Assist Interpretation of Medical Images- Application to Vascular Ultrasound Images,» *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, τόμ. 55, αρ. 6, pp. 1944-1952, 2006.
- [25] J. S. Stoitsis, N. N. Tsiaparas, S. Golemati και K. S. Nikita, «Comparison of wavelet transform, fractal dimension and second order statistics for texture analysis of carotid atherosclerotic plaques,» σε *3rd European Medical and Biological Engineering Conference EMBEC 05*, Prague, Czech Republic, 2005.
- [26] G. Srinivasan και G. Shobha, «Statistical Texture Analysis,» *Proc World Academy of Science, Engineering and Technology*, τόμ. 36, pp. 1264-1269, 2008.
- [27] S. Mallat, «A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation,» *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, τόμ. 11, αρ. 7, pp. 674-693, 1989.
- [28] N. Tsiaparas, S. Golemati, I. Andreadis, J. Stoitsis, I. Valavanis και K. Nikita, «Assessment of carotid Atherosclerosis from B-mode ultrasound images using directional multi-scale texture features,» *Measurement Science and Technology*, τόμ. 23, αρ. 11, 2012.
- [29] S. Golemati, J. Stoitsis και K. S. Nikita, «Potential carotid atherosclerosis biomarkers based on ultrasound image analysis,» σε *Handbook of Biomedical Imaging*, Berlin, Germany, Springer, 2015, pp. 501-511.
- [30] T. S. Lee, «Image Representation Using 2D Gabor Wavelets,» *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, τόμ. 18, αρ. 10, 1996.
- [31] J. G. Daugman, «Complete Discrete 2-D Gabor Transforms by Neural Networks for Image Analysis and Compression 1988;36.,» *IEEE Tran. on Acoustics, Speech and Signal Processing*, τόμ. 36, αρ. 7, 1988.
- [32] N. N. Tsiaparas, S. Golemati, I. Andreadis, J. S. Stoitsis, I. Valavanis και K. S. Nikita, «Comparison of Multiresolution Features for Texture Classification of Carotid Atherosclerosis From B-Mode Ultrasound,» *IEEE TRAN on Information Technology in Biomedicine*, τόμ. 15, αρ. 1, 2011.
- [33] N. N. Tsiaparas, S. Golemati, J. S. Stoitsis και K. S. Nikita, «Discrete Wavelet Transform vs. Wavelet Packets for Texture Analysis of Ultrasound Images of Carotid Atherosclerosis,» σε *9th International Conference on Information Technology and Applications in Biomedicine-ITAB.*, Larnaca, Cyprus, 2009.

- [34] J. S. Stoitsis, S. Golemati, N. N. Tsiaparas και K. S. Nikita, «Texture Characterization of Carotid Atherosclerotic Plaque from B-mode Ultrasound Using Gabor Filters,» σε *31st Annual International IEEE EMBS Conference*, Minneapolis, Minnesota, USA, 2009.
- [35] L. Chen, G. Lu και D. Zhang, «Effects of different Gabor filter parameters on image retrieval by texture,» σε *10th International Multimedia Modelling Conference (MMM2004)*, Los Alamitos USA, 2004.
- [36] N. G. Kingsbury, «The Dual-Tree Complex Wavelet Transform: A new technique for shift invariance and directional filters,» *IEEE Digital Signal Processing Workshop*, τόμ. 86, pp. 120-131, 1998.
- [37] N. N. Tsiaparas, S. Golemati, I. I. Andreadis, J. S. Stoitsis και K. S. Nikita, «Multiscale geometric texture analysis of ultrasound images of carotid atherosclerosis,» σε *International Conference on Information Technology and Applications in Biomedicine-ITAB 2010*, Corfu, Greece, 2010.
- [38] D. Vishwakarma, P. Rawat και R. Kapoor, «Human Activity Recognition Using Gabor Wavelet Transform and Ridgelet Transform,» *Procedia Computer Science*, τόμ. 57, pp. 630-636, 2015.
- [39] E. Candès, L. Demanet και L. Y. D. Donoho, «Fast Discrete Curvelet Transforms,» *SIAM Journal on Multiscale Modeling and Simulation*, τόμ. 5, αρ. 3, pp. 861-899, 2006.
- [40] L. Dettori και L. Semler, «A comparison of wavelet, ridgelet, and curvelet-based texture classification algorithms in computed tomography,» *Comput Biol Med*, τόμ. 37, αρ. 4, pp. 486-498, 2007.
- [41] M. M. Eltoukhy, I. Faye και B. B. Samir, «Breast cancer diagnosis in digital mammogram using multiscale curvelet transform,» *Comput Med Imaging Graph*, τόμ. 34, αρ. 4, pp. 269-276, 2010.
- [42] M. Yang, W. Moon, Y. Wang, M. Bae, C. Huang, J. Chen και R. Chang, «Robust Texture Analysis Using Multi-Resolution Gray-Scale Invariant Features for Breast Sonographic Tumor Diagnosis,» *IEEE TRANS on Medical Imaging*, τόμ. 32, αρ. 12, pp. 2262-73, 2013.
- [43] C. Lo, W. Moon, C. Huang, J. Chen, M. Yang και R. Chang, «Intensity-Invariant Texture Analysis for Classification of BI-RADS Category 3 Breast Masses,» *World Federation for Ultrasound in Medicine & Biology*, τόμ. 41, αρ. 7, pp. 2039-2048, 2015.
- [44] W. Moon, Y. Huang, C. Lo, C. Huang, M. Bae, W. Kim, J. Chen και R. Chang, «Computer-aided diagnosis for distinguishing between triple-negative breast

cancer and fibroadenomas based on ultrasound texture features,» *Medical Physics*, τόμ. 42, αρ. 6, pp. 3024-35, 2015.

- [45] M. Masotti, «A ranklet-based image representation for mass classification in digital mammograms,» *Medical Physics*, τόμ. 33, αρ. 10, pp. 3951-61, 2006.
- [46] S. Golemati, J. Stoitsis και K. S. Nikita, «Motion analysis of the carotid artery wall and plaque using B-mode ultrasound,» *Vascular Disease Prevention*, τόμ. 4, αρ. 4, pp. 296-302, 2007.
- [47] F. Smeraldi, «Fast algorithms for the computation of Ranklets,» σε *ICIP'09 Proceedings of the 16th IEEE international conference on Image processing*, NJ, USA, 2009.
- [48] [Ηλεκτρονικό]. Available: http://www.ivo.gr/files/items/1/141/8_ma0_non-param_opt.pdf.
- [49] [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://users.auth.gr/gmenexes/Presentations/NonParametric.pdf>.
- [50] [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://statistics.laerd.com/spss-tutorials/mann-whitney-u-test-using-spss-statistics.php>.
- [51] A. Haar, «Zur Theorie der orthogonalen Funktionensysteme,» *Mathematische Annalen*, τόμ. 69, αρ. 3, pp. 331-371, 1910.
- [52] M. Massoti και R. Campanini, «Texture classification using invariant ranklet features,» *Pattern Recognition Letters*, τόμ. 29, αρ. 14, pp. 1980-1986, 2008.
- [53] [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.eecs.qmul.ac.uk/~fabri/www.ranklets.net/nonZim/definition/definition.html>.
- [54] [Ηλεκτρονικό]. Available: http://delab.csd.auth.gr/courses/c_ds/sorting.pdf.
- [55] E. L. Lehmann, «Nonparametrics: Statistical Methods Based on Ranks,» *Applied Mathematics and Mechanics*, τόμ. 57, αρ. 9, p. 562, 1977.
- [56] [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.fp.ucalgary.ca/mhallbey/tutorial.htm>.
- [57] L. K. Soh και C. Tsatsoulis, «Texture Analysis of SAR Sea Ice Imagery Using Gray Level Co-Occurrence Matrices,» *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens*, τόμ. 37, αρ. 2, pp. 780-795, 1999.
- [58] R. M. Haralick, K. Shanmuga και I. Dinstein, «Textural features for image classification,» *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, τόμ. 3, αρ. 6, pp. 610-621, 1973.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

```
function [horizontal, vertical, diagonal] = Ranklet_filter(img, xhalfw, yhalfw)
%Ranklet_filter Summary: Computes the multiresolution ranklet coefficients for the
image
%for 3 orientations : horizontal, vertical and diagonal
% Inputs:
% 1. img - The image to be processed
% 2. xhalfw - The half height of the resolution; e.g. 5
% 3. yhalfw - The half width of the resolution; e.g. 5
% Outputs:
% 1. horizontal - The matrix coeff for the horizontal orientation
% 2. vertical - The matrix coeff for the vertical orientation
% 3. diagonal - The matrix coeff for the diagonal orientation

[xsize, ysize] = size(img);
% Initialize the responses
horizontal = zeros(xsize-2*xhalfw+1, ysize-2*yhalfw+1);
vertical = zeros(xsize-2*xhalfw+1, ysize-2*yhalfw+1);
diagonal = zeros(xsize-2*xhalfw+1, ysize-2*yhalfw+1);

% Filter the image with 3 filter orientations
for i = xhalfw:xsize-xhalfw
    for j = yhalfw:ysize-yhalfw
        img2rank = img(i+1-xhalfw : i+xhalfw, j+1-yhalfw : j+yhalfw);
        [horizontal(i+1-xhalfw, j+1-yhalfw), vertical(i+1-xhalfw, j+1-yhalfw), diagonal(i+1-
xhalfw, j+1-yhalfw)] = ranklet_coeff(img2rank, xhalfw, yhalfw);
    end
end
end

function [rkl_h, rkl_v, rkl_d] = ranklet_coeff(img, xhalfw, yhalfw)
%ranklet_coeff Summary: Computes the ranklet value for the given window for 3
orientations
%horizontal, vertical and diagonal
% Inputs:
% 1. img - The image / matrix for which we compute rank pixels
% 2. xhalfw - The half width of the window
% 3. yhalfw - The half height of the window
% Outputs:
% 1. rkl_h - The ranklet value for the horizontal orientation
% 2. rkl_v - The ranklet value for the vertical orientation
% 3. rkl_d - The ranklet value for the diagonally tuned filter

if (nargin < 3)
    display('Not enough arguments')
end

% compute histogram between min and max intensity values only
```

```

imin = min(min(img));
imax = max(max(img));
minmaxrange = double(imin:imax);
if (numel(minmaxrange) == 1) %all values are same so r_coeff=0
    rkl_h = 0;
    rkl_v = 0;
    rkl_d = 0;
else

    histo = hist(img(:), minmaxrange);

    % discard zeros in histogram and compact it
    support = histo > 0;
    histo = histo(support); %the different values in image
    nonzerobins = sum(support);

    % Midranks calculation matrix - this has got elements
    % [ 1/2  0   0   0 ...]
    % [ 1/2  1/2  0   0 ...]
    % [ 0   1/2  1/2  0 ...]
    % and so on
    midm = 1/2 * (diag(ones(nonzerobins,1)) + diag(ones(nonzerobins - 1,1),-1));
    cumhisto = cumsum(histo)'; % Vertical vector
    midranks = midm(1:nonzerobins,1:nonzerobins) * cumhisto + 0.5;

    % Keep only nonzero bins for next histograms
    range = minmaxrange(support);

    % Compute T (Treatment) sets:

    % horizontal
    T = img(1:xhalfw, 1:2*yhalfw);
    ht = hist(T(:), range);

    %vertical
    T = img(1:2*xhalfw, yhalfw+1:2*yhalfw);
    vt = hist(T(:), range);

    % Diagonal
    T = img(1:xhalfw, 1:yhalfw);
    T2 = img(xhalfw+1:2*xhalfw, yhalfw+1:2*yhalfw);
    dt = hist(T(:), range) + hist(T2(:), range);

    % Scalar product of histogram of test set
    % with midranks computes Wilcoxon statistics
    rkl_h = ht * midranks; %sum of T set -->midranks have the rank values for each
value of the window

```

```

    rkl_v = vt * midranks; %ht, vt, dt have the #appearances in the T set of the values
of window

```

```

    rkl_d = dt * midranks;

```

```

    % Normalize

```

```

    mean = xhalfw*yhalfw*(4*xhalfw*yhalfw+1);
    scaling = 2* (xhalfw*yhalfw) * (xhalfw * yhalfw);
    rkl_h = (rkl_h - mean) / scaling;
    rkl_v = (rkl_v - mean) / scaling;
    rkl_d = (rkl_d - mean) / scaling;

```

```

end

```

```

end

```

```

function [glcm4_qh, glcm4_qv, glcm4_qd] = main(img, r)

```

```

img = img(:,:,1);

```

```

img = rgb2gray(img);

```

```

%before extracting plaque from whole image appropriate data is loaded

```

```

dimp = max( plaque1, [], 2) - min(plaque1, [], 2);

```

```

minp = min(plaque1, [], 2);

```

```

plaqueimg = img(minp(2):minp(2)+dimp(2), minp(1):minp(1)+dimp(1));

```

```

% figure; imshow(plaqueimg);

```

```

[horizontal,vertical,diagonal] = Ranklet_filter(plaqueimg,r/2, r/2);

```

```

[~, qhorizontal] = quant_to_levels(horizontal);

```

```

[~, qvertical] = quant_to_levels(vertical);

```

```

[~, qdiagonal] = quant_to_levels(diagonal);

```

```

% glcms for RQIs

```

```

d = 1;

```

```

glcm_qh = GLCMstats(qhorizontal, d);

```

```

glcm_qv = GLCMstats(qvertical, d);

```

```

glcm_qd = GLCMstats(qdiagonal, d);

```

```

fields = fieldnames(glcm_qh);

```

```

f = fields(~(strcmp(fields(:), 'Maximum_Probability')));

```

```

for i = 1:numel(f)

```

```

    glcm4_qh(i) = sum(glcm_qh.(f{i}))/length(glcm_qh.(f{i}));

```

```

    glcm4_qv(i) = sum(glcm_qv.(f{i}))/length(glcm_qh.(f{i}));

```

```

    glcm4_qd(i) = sum(glcm_qd.(f{i}))/length(glcm_qh.(f{i}));

```

```

end

```

```

glcm4_qh = glcm4_qh';

```

```

glcm4_qv = glcm4_qv';

```

```

glcm4_qd = glcm4_qd';

```

```

end

```