

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

"Ανάπτυξη μεθόδων συγχώνευσης τηλεπισκοπικών δεδομένων και εφαρμογή στην παρατήρηση βλάστησης σε περιοχές με προηγούμενη μεταλλευτική δραστηριότητα"

Διδακτορική Διατριβή

Εμμανουέλα Ιερωνυμίδη

Συμβουλευτική Επιτροπή:

Διονύσης Χριστόπουλος, Καθηγητής Στυλιανός Μερτίκας, Καθηγητής Κωνσταντίνος Κομνίτσας, Καθηγητής

> Χανιά Μάιος, 2009

Στους γονείς μου, με αγάπη και σεβασμό

"Research is what I' m doing when I don't know what I' m doing" Wernher von Braun

Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της συμβουλευτικής μου επιτροπής, Καθηγητή κ. Στυλιανό Μερτίκα, Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Διονύση Χριστόπουλο και Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Κωσταντίνο Κομνίτσα για την καθοδήγηση και βοήθεια που μου προσέφεραν στην ανάπτυξη της επιστημονικής μου σκέψης καθώς και τις συμβουλές τους κατά τη συγγραφή της Διδακτορικής Διατριβής. Οφείλω θερμές ευχαριστίες στους φίλους και συνεργάτες μου κα. Παπαδάκη Ράνια και κ. Hamdan Hamdan για την ηθική στήριξη και πολύτιμη τεχνική βοήθεια τους. Επίσης, ευχαριστώ τον μέλλοντα σύζυγο μου που μου παρείχε την ανυπολόγιστη υποστήριξη του κατά τη διάρκεια δύσκολων στιγμών και ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια των τελευταίων μηνών της προσπάθειας μου. Πάνω απ' όλα είμαι ευγνώμων στους γονείς μου για την ευκαιρία που μου έδωσαν για μόρφωση αλλά και για την ολόψυχη αγάπη και υποστήριξη τους σε όλα τα βήματα της ζωής μου.

Η διατριβή αυτή στηρίχθηκε από υποτροφία του Υπουργείο Εθνικής Παιδείας και Θρησκευμάτων στα πλαίσια του προγράμματος «ΗΡΑΚΛΕΙΤΟΣ: Υποτροφίες έρευνας με προτεραιότητα στη βασική έρευνα».

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την εταιρεία S&B για την βοήθεια που παρείχαν στη διεξαγωγή της επιτόπιας έρευνας και σε θέματα σχετικά με την αποκατάσταση περιοχών με προηγούμενη μεταλλευτική δραστηριότητα στη νήσο Μήλο.

Περίληψη

Η παρούσα διδακτορική διατριβή αφορά εις την ανάπτυξη νέων μεθόδων συγχώνευσης δορυφορικών εικόνων. Σκοπός της συγχώνευσης εικόνων είναι ο συνδυασμός εικόνων που περιλαμβάνουν διαφορετικές πληροφορίες σε μια μοναδική εικόνα. Η συγχώνευση τηλεπισκοπικών εικόνων αποδεικνύεται χρήσιμη σε αρκετές εφαρμογές της Τηλεπισκόπησης (π.χ. παρακολούθηση βλάστησης, εντοπισμός και παρακολούθηση επιφανειακής ρύπανσης, γεωλογία και ανίχνευση ορυκτών πόρων, στρατιωτικές εφαρμογές κ.α.).

Τα δορυφορικά πολυφασματικά συστήματα έχουν τη δυνατότητα ταυτόχρονης καταγραφής παγχρωματικών και πολυφασματικών εικόνων. Οι παγχρωματικές εικόνες επιτρέπουν τον καλό διαχωρισμό διάφορων αντικειμένων στο χώρο (π.χ. φυτά, οχήματα, κατοικίες) αλλά όχι απαραίτητα την αναγνώριση της ταυτότητας αυτών. Εξεναντίας, οι πολυφασματικές εικόνες επιτρέπουν τον ποιοτικό διαχωρισμό των επιφανειών ή αντικειμένων (π.χ. γυμνά ή σε αρχικό στάδιο καλλιέργειας εδάφη, δασικές περιοχές, στάδια ανάπτυξης και κατάσταση υγείας κάθε φυτού), αλλά χαρακτηρίζονται από χαμηλή χωρική διακριτική ικανότητα. Σε εμπορικό επίπεδο, δεν υπάρχουν εικόνες που να χαρακτηρίζονται του τόχρονα από υψηλή χωρική και φασματική διακριτική ικανότητα. Η συγχώνευση εικόνων αποτελεί την καλύτερη λύση σε αυτό το πρόβλημα, καθότι επιτυγχάνεται συνδυασμός της υψηλής χωρικής και φασματικής πληροφορίας, που περιλαμβάνεται στις παγχρωματικές και πολυφασματικές εικόνες αντίστοιχα, σε μία μοναδική εικόνα.

Στη βιβλιογραφία απαντούν διάφορες τεχνικές συγχώνευσης εικόνων. Ορισμένες από τις ευρείας χρήσης τεχνικές χρησιμοποιήθηκαν, ως μέτρο σύγκρισης, για την αξιολόγηση των εικόνων που προέκυψαν από συγχώνευση με τις νέες μεθόδους που αναπτύχθηκαν στην παρούσα διατριβή. Οι υπάρχουσες στη βιβλιογραφία τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν στη διατριβή είναι ο μετασχηματισμός IHS, η Ανάλυση Κυριών Συνιστωσών (PCA), οι μετασχηματισμοί κυματιδίων Mallat και «Á trous», καθώς και συνδυασμοί των μετασχηματισμόν Mallat και «Á trous» με τους μετασχηματισμούς IHS και PCA.

Τα δεδομένα στα οποία εφαρμόστηκαν οι μέθοδοι συγχώνευσης συνίστανται από μια Quickbird παγχρωματική και μια Quickbird πολυφασματική δορυφορική εικόνα της νήσου Μήλου. Συγκεκριμένα, τις περιοχές μελέτης αποτέλεσαν δυο αποκατεστημένα, με δεντροφύτευση, λατομεία ένα στην περιοχή Αχιβαδολίμνη και ένα στην περιοχή Πάχαινα. Σκοπός της εφαρμογής αυτής ήταν η χρήση των συγχωνευμένων εικόνων για την παρατήρηση των δεντροφυτευμένων περιοχών, ως προς την ανάπτυξη και την υγεία των φυτών. Η χωρική ανάλυση των παγχρωματικών εικόνων Quickbird επιτρέπει τη χωρική διάκριση των θάμνων και μικρών δέντρων που συνιστούν τις κύριες μορφές βλάστησης στη Μήλο. Η πολυφασματική εικόνα Quickbird παρέχει τη δυνατότητα ποιοτικού εντοπισμού και αναγνώρισης της βλάστησης. Συγχώνευση των δυο εικόνων επιτρέπει τον ακριβή εντοπισμό ενός φυτού στον χώρο και παρέχει πληροφορίες για το στάδιο ωριμότητας ή την υγεία αυτού.

Στα πλαίσια της διατριβής αναπτύχθηκαν και αξιολογήθηκαν 14 νέες μέθοδοι συγχώνευσης εικόνας. Η πρώτη μέθοδος (Fourier Domain Filtering Fusion – FDFF) που αναπτύχθηκε βασίζεται στην εφαρμογή φίλτρων διέλευσης υψηλών και χαμηλών συχνοτήτων στο φάσμα Fourier των εικόνων. Στη συνέχεια δημιουργήθηκαν και άλλες μέθοδοι που αποτελούν συνδυασμό της FDFF με τους μετασχηματισμούς PCA και «Á trous». Επιπρόσθετα, αναπτύχθηκαν δυο παραλλαγές της παραδοσιακής μεθόδου συγχώνευσης εικόνων με το μετασχηματισμό PCA. Κάθε μια από τις νέες μεθόδους που αναπτύχθηκαν αξιολογήθηκε και συγκρίθηκε, με τα αποτελέσματα των ήδη γνωστών μεθόδων, ως προς τη δυνατότητα διατήρησης της αρχικής χωρικής και φασματικής πληροφορίας των προς συγχώνευση εικόνων.

Η αξιολόγηση και σύγκριση των συγχωνευμένων εικόνων, όπως αυτές προέκυψαν από κάθε μια από τις διαδεδομένες μεθόδους που υλοποιήθηκαν καθώς και τις νέες μεθόδους που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια της διατριβής, βασίστηκε σε υποκειμενικά (οπτικός έλεγχος) και στατιστικά κριτήρια (ρίζα μέσου τετραγωνικού σφάλματος, συντελεστής χωρικής και φασματικής συσχέτισης, μεταβολή τυπικής απόκλισης ιστογράμματος, μετατόπιση μέσης τιμής ιστογράμματος και συντελεστής συσχέτισης δείκτη βλάστησης NDVI,). Από την αξιολόγηση προέκυψε ότι οι μέθοδοι FDFF, FDFFπαγχρ-Å trous-PCA_Περ.Γ, FDFFπαγχρ-Å trous, και FDFF-Å trous-PCA_Περ.Γ υπερτερούν των υπολοίπων μεθόδων που εφαρμόστηκαν, ως προς τη διαφοροποίηση των φυτών χωρικά ή ποιοτικά. Στις συγχωνευμένες εικόνες που δημιουργήθηκαν από τις συγκεκριμένες μεθόδους ο χωρικός διαχωρισμός της βλάστησης είναι εμφανής. Επιπρόσθετα η διατήρηση, σε ικανοποιητικό βαθμό, της φασματικής πληροφορίας παρέχει τη δυνατότητα αναγνώρισης τη υγείας και του σταδίου ανάπτυξης των φυτών και δέντρων.

Περιεχόμενα

Π	EPIEX	OMENA	Ι
Π	EPIEX	ΟΜΕΝΑ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΩΝ	IV
K	ΑΤΑΛ	ΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	V
K	АТАЛ	ΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΟΣ	X
1	ΕΙΣ	ΑΓΩΓΗ	1
	1.1	Σκοπος διατριβής	1
	1.2	ΚΙΝΗΤΡΟ ΚΑΙ ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ	2
	1.3	ΣΧΕΔΙΟ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ	3
2	ΘΕ	ΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	5
	2.1	Τηνεμισκομηση	5
	2.2	ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΚΑΙ ΒΛΑΣΤΗΣΗ	6
	2.3	Σύγχωνευση εικονών	10
	2.4	ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ	12
3	ME	ΘΟΔΟΙ ΣΥΓΧΩΝΕΥΣΗΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	13
	3.1	Χρωματικός Μετασχηματισμός «Ένταση – Αποχρώση – Κορέσμος»	13
	3.2	Μετασχηματισμός Αναλύσης Κυρίων Συνιστώσων	18
	3.2.	$I PCA_\Pi \epsilon \rho. A$	18
	3.2.	$2 PCA_{\Pi \epsilon \rho} B$	20
	3.2.	$3 PCA_\Pi \epsilon \rho. \Gamma$	20
	3.3	ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ ΚΥΜΑΤΙΔΙΩΝ	22
	3.3.	Ι Αλγόριθμος Mallat	23
	3.3.	2 Αλγόριθμος "Á Trous"	28
	3.3.	3 Συνδυασμοί μετασχηματισμών	31
	3	.3.1.1 Συνδυασμός μετασχηματισμών IHS και Mallat	31
	3	.3.1.2 Συνδυασμός μετασχηματισμών PCA και Mallat	33
	3	.3.1.3 Συνδυασμός μετασχηματισμών IHS και "Á trous"	35
	3	.3.1.4 Συνδυασμός μετασχηματισμών PCA και "Á trous"	36
	3	.3.1.4.(i) Á Trous-PCA_Περ.Α	36
	3	.3.1.4.(ii) Á Trous-PCA_Περ.Β	36
	3	.3.1.4.(iii) Á Trous-PCA_Περ.Γ	36
	3.4	Περιληψη κεφαλαίου	38
4	ΦΙ	ΑΤΡΑΡΙΣΜΑ ΕΙΚΟΝΩΝ	39

i

	4.1	ΦΙΛΤΡΑ ΔΙΕΛΕΥΣΗΣ ΧΑΜΗΛΩΝ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ	39
	4.1.1	Ιδανικό φίλτρο διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων	39
	4.1.2	Butterworth φίλτρο διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων	42
	4.1.3	Φίλτρο Gauss διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων	44
	4.2	ΦΙΛΤΡΑ ΔΙΕΛΕΥΣΗΣ ΥΨΗΛΩΝ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ	46
	4.2.1	Ιδανικό φίλτρο διέλευσης υψηλών συχνοτήτων	46
	4.2.2	Butterworth φίλτρο διέλευσης υψηλών συχνοτήτων	48
	4.2.3	Φίλτρο Gauss διέλευσης υψηλών συχνοτήτων	50
	4.3	ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ	51
5	ΦΙΛ	ΤΡΑΡΙΣΜΑ ΕΙΚΟΝΩΝ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ ΚΥΜΑΤΑΡΙΘΜΩΝ	52
	5.1	Μετασχηματισμός Fourier εικονάς	52
	5.1.1	Μετασχηματισμός Fourier μονοδιάστατης συνάρτησης	52
	5.1.2	Διακριτός μετασχηματισμός Fourier	53
	5.1.3	Μετασχηματισμός Fourier δισδιάστατης συνάρτησης	54
	5.1.4	Ιδιότητες μετασχηματισμού Fourier	58
	5.1.5	Ταχύς μετασχηματισμός Fourier	60
	5.1.6	Θεώρημα της Συνέλιζης	61
	5.2	ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΦΙΛΤΡΑΡΙΣΜΑΤΟΣ ΣΤΟ ΧΩΡΟ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ	61
	5.3	ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ	65
6	ΣΥΓ	Ύ ΩΝΕΥΣΗ ΕΙΚΟΝΩΝ ΜΕ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΠΟΥ ΒΑΣΙΖΟΝΤΑΙ ΣΕ ΦΙΛΤΡΑΡΙΣΝ	ЛА
Т	ΩN ME	ΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ FOURIER	66
	6.1	ΣΥΓΧΩΝΕΥΣΗ ΕΙΚΟΝΩΝ ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΦΙΛΤΡΑΡΙΣΜΑ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ (FREQUENC	Y
	Domai	N FILTERING FUSION - FDFF)	66
	6.2	Σύγχωνευση με σύνδυ αστών μεθοδών FDFF και PCA	69
	6.2.1	Εφαρμογή μετασχηματισμού Fourier σε κύριες συνιστώσες και παγχρωματική εικόνα	69
	6.2.2	Εφαρμογή μετασχηματισμού Fourier στην παγχρωματική εικόνα	71
	6.3	Σύγχωνευση με σύνδυ στης FDFF και του μετασχηματισμού " $ m \acute{A}$ trous"	73
	6.4	Σ υγγχωνεύση με σύνδυ στης FDFF με τους μετασχηματισμούς "Á trous" κ	AI
	PCA	74	
	6.4.1	Εφαρμογή μετασχηματισμού Fourier στη παγχρωματική εικόνα και στις εικόνες που	
	προέ	κυψαν από το μετασχηματισμό "Á trous" των κυριών συνιστωσών της πολυφασματικής	
	εικόν	νας 74	
	6.4.2	Εφαρμογή μετασχηματισμού Fourier στην παγχρωματική εικόνα	77
	6.5	ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ	79
7	ΔΕΔ	ΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΜΕΛΕΤΗΣ	80
	7.1	ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ	80

ii

7.2 ΠΕΡΙΟΧΈΣ ΜΕΛΕΤΗΣ	81
8 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΣΥΓΣ	ΧΩΝΕΥΣΗΣ 85
8.1 ΧΩΡΙΚΗ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑ ΣΥΓΧΩΝΕΥΜΕΝΩΝ ΕΙΚΟΝΩΝ	85
8.1.(i) Περιοχή Αχιβαδολίμνη	87
8.1.(ii) Περιοχή Πάχαινα	90
8.2 ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑ ΣΥΓΧΩΝΕΥΜΕΝΩΝ ΕΙΚΟΝΩΝ	93
8.2.1 Συντελεστής Συσχέτισης	93
8.2.1.(i) Περιοχή Αχιβαδολίμνη	94
8.2.1.(ii) Περιοχή Πάχαινα	97
8.2.2 Ρίζα Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος	100
8.2.2.(i) Περιοχή Αχιβαδολίμνη	101
8.2.2.(ii) Περιοχή Πάχαινα	104
8.2.3 Σχετική Μετατόπιση της μέσης τιμής ιστογράμματος	107
8.2.3.(i) Περιοχή Αχιβαδολίμνη	108
8.2.3.(ii) Περιοχή Πάχαινα	111
8.2.4 Τυπική απόκλιση	114
8.2.4.(i) Περιοχή Αχιβαδολίμνη	115
8.2.4.(ii) Περιοχή Πάχαινα	118
8.2.5 Κανονικοποιημένος δείκτης βλάστησης NDVI	121
8.2.5 (i) Περιοχή Αχιβαδολίμνη	122
8.2.5 (ii) Περιοχή Πάχαινα	124
8.3 ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ	126
9 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΕΡΕ	ΣΥΝΑΣ 127
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	130
Еллникн	130
ΔΙΕΘΝΗΣ	130

Περιεχόμενα Παραρτημάτων

ПАРАРТН	ΜΑ Ι - ΑΡΧΙΚΕΣ ΚΑΙ ΣΥΓΧΩΝΕΥΜΕΝΕΣ ΕΙΚΟΝΕΣ	1
I.1 Пер	ΙΟΧΗ ΑΧΙΒΑΔΟΛΙΜΝΗ	2
I.1.1	Συνδυασμός φασματικών καναλιών: Ερυθρό – Πράσινο – Ιώδες	6
I.1.2	Συνδυασμός φασματικών καναλιών: Εγγύς υπέρυθρο – Πράσινο – Ιώδες	14
I.1.3	Συνδυασμός φασματικών καναλιών: Πράσινο – Ερυθρό – Εγγύς υπέρυθρο	22
I.2 Пер	ΙΟΧΗ ΠΑΧΑΙΝΑ	30
I.2.1	Συνδυασμός φασματικών καναλιών: Ερυθρό – Πράσινο – Ιώδες	34
<i>I.2.2</i>	Συνδυασμός φασματικών καναλιών: Εγγύς υπέρυθρο – Πράσινο – Ιώδες	42
<i>I.2.3</i>	Συνδυασμός φασματικών καναλιών: Πράσινο – Ερυθρό – Εγγύς υπέρυθρο	50
ПАРАРТН	ΜΑ ΙΙ - ΠΙΝΑΚΕΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΩΝ ΕΚΤΙΜΗΤΩΝ	58
II.1 П	ΕΡΙΟΧΗ ΑΧΙΒΑΔΟΛΙΜΝΗ	59
II.1.1	Συνδυασμός φασματικών καναλιών: Ιώδες– Πράσινο – Ερυθρό	60
II.1.2	Συνδυασμός φασματικών καναλιών: Ιώδες– Πράσινο – Εγγύς υπέρυθρο	66
II.1.3	Συνδυασμός φασματικών καναλιών: Πράσινο – Ερυθρό – Εγγύς υπέρυθρο	72
II.2 П	ΓΕΡΙΟΧΗ ΠΑΧΑΙΝΑ	79
II.2.1	Συνδυασμός φασματικών καναλιών: Ιώδες– Πράσινο – Ερυθρό	80
II.2.2	Συνδυασμός φασματικών καναλιών: Ιώδες– Πράσινο – Εγγύς υπέρυθρο	86
II.2.3	Συνδυασμός φασματικών καναλιών: Πράσινο – Ερυθρό – Εγγύς υπέρυθρο	<i>92</i>
ПАРАРТН	ΜΑ ΙΙΙ - ΕΙΚΟΝΕΣ ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ ΝΟVΙ	99
III.1 П	ΈΡΙΟΧΗ ΑΧΙΒΑΔΟΛΙΜΝΗ	100
II.1.1	Συνδυασμός φασματικών καναλιών: Ερυθρό / Εγγύς Υπέρυθρο – Πράσινο – Ιώδες	102
II.1.2	Συνδυασμός φασματικών καναλιών: Πράσινο – Ερυθρό – Εγγύς υπέρυθρο	110
III.2 П	ΓΕΡΙΟΧΗ ΠΑΧΑΙΝΑ	118
III.2.1	Συνδυασμός φασματικών καναλιών: Ερυθρό / Εγγύς Υπέρυθρο – Πράσινο – Ιώδες	120
<i>III.2.2</i>	Συνδυασμός φασματικών καναλιών: Πράσινο – Ερυθρό – Εγγύς υπέρυθρο	128

Κατάλογος εικόνων

Είκονα 1: Δομή φύλλου ένος πλατυφύλλου φωτοφιλού δάσοπονικού είδους και τα	
ΦΑΣΜΑΤΙΚΑ ΤΟΥ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	8
Εικονά 2: Παραδειγμα φασματικής καμπύλης δυοσμού.	9
ΕΙΚΟΝΑ 3: ΤΟ RGB ΧΡΩΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ.	13
ΕΙΚΟΝΑ 4: ΤΟ ΧΡΩΜΑΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ. «ΈΝΤΑΣΗ – ΑΠΟΧΡΩΣΗ – ΚΟΡΕΣΜΟΣ» (IHS).	14
Eikona 5: Σ xhmatiko diaγpamma the ευγχώνευσης είκονων με το μετασχηματισμο IHS	16
Εικονά 6: Σχηματικό διαγραμμά της PCA_Περ.Α	19
ΕΙΚΟΝΑ 7: ΣΧΗΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΗΣ ΡCΑ_ΠΕΡ.Β.	20
Είκονα 8: Σχηματικό διαγραμμά της ΡCΑ_Περ.Γ.	21
Εικονά 9: Σχηματική αναπαράσταση της ανάλυση πολλαπλής διακριτοτήτας.	22
Εικονά 10: Διάσπαση τμηματός παγχρωματικής εικονάς Quickbird.	26
Είκονα 11: Σχηματικό διαγραμμά της συγχωνεύσης είκονων με το μετασχηματισμό	
κυματιδιών Mallat.	27
Είκονα 12: Απεικονίση του " Á Trous" αλγοριθμου διάσπασης είκονας.	28
Είκονα 13: Σχηματικό διαγραμμά της σύγχωνευσης είκονων με το μετασχηματισμό "Ά	١
TROUS".	30
Είκονα 14: Σχηματικό διαγραμμά της συγχωνεύσης είκονων με σύνδυασμό των	
ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ ΙΗS ΚΑΙ MALLAT.	32
Είκονα 15: Σχηματικό διαγραμμά της συγχωνεύσης είκονων με σύνδυασμό των	
ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ PCA ΚΑΙ ΜΑLLAT.	34
Είκονα 16: Σχηματικό διαγραμμά της συγχωνεύσης είκονων με σύνδυασμό των	
μετασχηματισμών IHS και "Ά Trous".	35
Είκονα 17: Σύγχωνευση πολυφασματικής και παγχρωματικής είκονας Quickbird me χρη	IΣH
ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ Α΄ TROUS-PCA_ΠΕΡ.Α.	37
Είκονα 18 Σύγχωνευση πολυφασματικής και παγχρωματικής είκονας Quickbird me χρης	ΣΗ
ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ Α΄ TROUS-PCA_ΠΕΡ.Β.	37
Είκονα 19: Σύγχωνευση πολυφασματικής και παγχρωματικής είκονας Quickbird me χρη	IΣH
ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ Α΄ TROUS-PCA_ΠΕΡ.Γ.	38
Είκονα 20: Απεικονίση ένος ιδανικού φιλτρού διέλευσης χαμηλών σύχνοτητών (ι) δύο	
ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΚΑΙ (ΙΙ) ΤΡΕΙΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ	40
Είκονα 21: Αποτελέσμα εφαρμογής ιδανικού φιλτρού διελεύσης χαμηλών σύχνοτητών τ	ΣΤΟ
ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟ FOURIER ΤΟΥ ΕΡΥΘΡΟΥ ΚΑΝΑΛΙΟΥ ΤΗΣ ΠΟΛΥΦΑΣΜΑΤΙΚΗΣ	
ΕΙΚΟΝΑΣ.	41
ΕΙΚΟΝΑ 22: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΕΝΟΣ BUTTERWORTH ΦΙΛΤΡΟΥ ΔΙΕΛΕΥΣΗΣ ΧΑΜΗΛΩΝ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ (Ι) Α	ΔΥΟ
ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΚΑΙ (ΙΙ) ΤΡΕΙΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ.	42

ΕΙΚΟΝΑ 23: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ BUTTERWORTH ΦΙΛΤΡΟΥ ΔΙΕΛΕΥΣΗΣ ΧΑΜΗΛΩΝ	
συχνοτητών στο μετασχηματισμό Fourier του ερυθρού καναλίου της	
ΠΟΛΥΦΑΣΜΑΤΙΚΗΣ ΕΙΚΟΝΑΣ.	43
ΕΙΚΟΝΑ 24: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΕΝΟΣ ΦΙΛΤΡΟΥ GAUSS ΔΙΕΛΕΥΣΗΣ ΧΑΜΗΛΩΝ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ ΣΕ (Ι) ΔΥΟ	
ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΚΑΙ (ΙΙ) ΤΡΕΙΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ.	44
Eikona 25: Apotelesma eqarmoghe Gauss filtpoy dieleyshe xamhlun syxnothtun sto	
ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟ FOURIER ΤΟΥ ΕΡΥΘΡΟΥ ΚΑΝΑΛΙΟΥ ΤΗΣ ΠΟΛΥΦΑΣΜΑΤΙΚΗΣ	
ΕΙΚΟΝΑΣ.	45
Είκονα 26: Απεικονίση ένος ιδανικού φιλτρού διέλευσης υψηλών συχνοτητών σε (ι) δύο	
ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΚΑΙ (ΙΙ) ΤΡΕΙΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ.	46
ΕΙΚΟΝΑ 27: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΙΔΑΝΙΚΟΥ ΦΙΛΤΡΟΥ ΔΙΕΛΕΥΣΗΣ ΥΨΗΛΩΝ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ ΣΤΟ)
ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟ FOURIER ΤΟΥ ΕΡΥΘΡΟΥ ΚΑΝΑΛΙΟΥ ΤΗΣ ΠΟΛΥΦΑΣΜΑΤΙΚΗΣ	
ΕΙΚΟΝΑΣ.	47
ΕΙΚΟΝΑ 28: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ BUTTERWORTH ΦΙΛΤΡΟΥ ΔΙΕΛΕΥΣΗΣ ΥΨΗΛΩΝ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ ΣΕ (Ι) ΔΥΟ	
ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΚΑΙ (ΙΙ) ΤΡΕΙΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ.	48
ΕΙΚΟΝΑ 29: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ BUTTERWORTH ΦΙΛΤΡΟΥ ΔΙΕΛΕΥΣΗΣ ΥΨΗΛΩΝ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩ	2N
στο μετασχηματισμό Fourier του ερυθρού καναλιού της πολυφασματικής	
ΕΙΚΟΝΑΣ.	49
Eikona 30: Apeikonich enoc fiatpoy Gauss dieleychc yyhawn syxnothtwn ce (i) dyo	
ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΚΑΙ (ΙΙ) ΤΡΕΙΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ.	50
ΕΙΚΟΝΑ 31: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΦΙΛΤΡΟΥ GAUSS ΔΙΕΛΕΥΣΗΣ ΥΨΗΛΩΝ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ ΣΤΟ	
ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟ FOURIER ΤΟΥ ΕΡΥΘΡΟΥ ΚΑΝΑΛΙΟΥ ΤΗΣ ΠΟΛΥΦΑΣΜΑΤΙΚΗΣ	
ΕΙΚΟΝΑΣ.	51
Είκονα 32: (ι) Τμημα παγχρωματικής είκονας Quickbird, (ιι) πλατός φασματός Fourier π	PIN
τη συμπίεση του ευρούς τίμων του φάσματος, (111) πλατός φασματός Fourier	
ΜΕΤΑ ΤΗ ΣΥΜΠΙΕΣΗ ΤΟΥ ΕΥΡΟΥΣ ΤΙΜΩΝ ΤΟΥ ΦΑΣΜΑΤΟΣ , (IV) ΓΩΝΙΑ ΦΑΣΗΣ ΤΟΥ	
Φ ASMATOS FOURIER.	56
ΕΙΚΟΝΑ 33: (Ι) ΠΕΡΙΟΧΗ ΑΧΙΒΑΔΟΛΙΜΝΗ, (ΙΙ) ΜΕΤΡΟ ΦΑΣΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ ΕΙΚΟΝΑΣ 26	(I),
(ΙΙΙ) ΦΑΣΗ ΦΑΣΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ ΕΙΚΟΝΑΣ 26(Ι), (ΙV) ΠΕΡΙΟΧΗ ΠΑΧΑΙΝΑ, (V))
ΜΕΤΡΟ ΦΑΣΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ ΕΙΚΟΝΑΣ 26(ΙV), (VI) ΦΑΣΗ ΦΑΣΜΑΤΟΣ	
ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ ΕΙΚΟΝΑΣ 26(IV).	57
Είκονα 34: (ι) Πλατός φασματός Fourier της παγχρωματικής είκονας (περιοχή	
ΑΧΙΒΑΔΟΛΙΜΝΗ), (ΙΙ) ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΤΟΥ ΦΑΣΜΑΤΟΣ ΣΤΟ ΚΕΝΤΡΟ ΤΗΣ ΕΙΚΟΝΑΣ ΤΟΥ.	62
Είκονα 35: Σχηματική αναπαράσταση της διαδικάσιας φιλτραρισματός στο πέδιο	
ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ.	64
Είκονα 36: Σχηματική αναπαράσταση της μέθοδου σύγχωνευσής είκονων FDFF	68
Eikona 37: Σ xhmatiko diagpamma the meqodoy eygradneyene eikonan FDFF-PCA_Pep.A.	70
ΕΙΚΟΝΑ38: ΣΧΗΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΣΥΓΧΩΝΕΥΣΗΣ FDFF-PCA_ΠΕΡ.Β.	70
	vi

ΕΙΚΟΝΑ 39: ΣΧΗΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΣΥΓΧΩΝΕΥΣΗΣ FDFF-PCA_ΠΕΡ.Γ.	71
Εικονά 40: Σχηματικό διαγραμμά της FDFFπαγχρ-PCA_Περ.Α μέθοδου συγχώνευσης.	72
Εικονά 41: Σχηματικό διαγραμμά της FDFFπαγχρ-PCA_Περ.Β μεθόδου συγχώνευσης.	72
Εικονά 42: Σχηματικό διαγραμμά της FDFFπαγχρ-PCA_Περ.Γ μεθόδου συγχώνευσης.	73
Eikona 43: Σ xhmatiko diafpamma the eyraneyene eikonan me eyndyaemo the FDFF kai	1
ΤΟΥ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ " Á TROUS"	74
ΕΙΚΟΝΑ 44: ΣΧΗΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΗΣ FDFF- Α΄ TROUSPCA_ΠΕΡ.Α.	75
Εικονα 45: Σχηματικό διαγραμμα της FDFF- Α΄ trousPCA_Περ.Β.	76
ΕΙΚΟΝΑ 46: ΣΧΗΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΗΣ FDFF- Α΄ TROUSPCA_ΠΕΡ.Γ.	76
Εικονά 47: Σχηματικό διαγραμμά της μέθοδου FDFFπαγχρ Α΄ trousPCA_Περ.Α.	78
Εικονά 48: Σχηματικό διαγραμμά της μέθοδου FDFFπαγχρ Α΄ trousPCA_Περ.Β.	78
Εικονά 49: Σχηματικό διαγραμμά της μέθοδου FDFFπaγχρ Α΄ trousPCA_Περ.γ.	79
Είκονα 50: Σύντελεστής χωρικής σύσχετισης. Περιοχή Αχιβαδολιμνή. Φασματικά καναλι	A:
Πρασινό – Ερύθρο –Εγγύς υπερυθρό.	89
Είκονα 51: Σύντελεστής χωρικής σύσχετισης. Περιοχή Παχαίνα. Φασματικά καναλιά:Ιωδε	ΞΣ -
Πρασινό – Έρυθρο.	90
Είκονα 52: Σύντελεστής χωρικής σύσχετισης. Περιοχή Παχαίνα. Φασματικά καναλιά:Ιωδε	ΞΣ -
Πρασινό – Εγγύς υπερυθρό.	91
Είκονα 53: Σύντελεστής χωρικής σύσχετισης. Περιοχή Παχαίνα, Φασματικά καναλία:	
Πρασινό – Ερύωρο –Εγγύς υπερύωρο.	92
Είκονα 54: Σύντελεστής φασματικής σύσχετισης. Περιοχή Αχιβαδολιμνή. Φασματικά	
καναλία: Ιωδές- Πρασινό - Έρυθρο.	94
Είκονα 55: Σύντελεστής φασματικής σύσχετισης. Περιοχή Αχιβαδολιμνή. Φασματικά	
καναλία: Ιωδές- Πρασινό - Εγγύς υπερυθρό.	95
Είκονα 56: Σύντελεστής φασματικής σύσχετισης. Περιοχή Αχιβαδολιμνή. Φασματικά	
καναλία: Πρασινό – Έρυθρο –Εγγύς υπερυθρο.	96
Είκονα 57: Σύντελεστής φασματικής σύσχετισης. Περιοχή Παχαίνα. Φασματικά καναλία:	
Ιωδές- Πρασινό - Ερυθρό	97
Είκονα 58: Σύντελέστης φασματικής σύσχετισης. Περιοχή Παχαίνα. Φασματικά καναλιά	
Ιωδές- Πρασινό - Εγγύς υπερυθρό.	98
Είκονα 59: Σύντελέστης φασματικής σύσχετισης. Περιοχή Παχαίνα. Φασματικά καναλία:	
Πρασινό – Ερύωρο –Εγγύς υπερυώρο.	99
Είκονα 60: Ρίζα μέσου τετραγωνικού σφαλματός. Περιοχή Αχιβαδολιμνή. Φασματικά	
καναλία: Ιωδές- Πρασινό - Έρυθρο.	101
Εικονά 61: Ριζα μέσου τετραγωνικού σφαλματός Περιοχή Αχιβαδολιμνή. Φασματικά	
καναλία: Ιωδές- Πρασινό - Εγγύς υπερυθρό.	102
Εικονά 62: Ριζα μέσου τετραγωνικού σφαλματός Περιοχή Αχιβαδολιμνή. Φασματικά	
καναλία: Πρασινό – Έρυθρο –Εγγύς υπερυθρο.	103
	vii

ΕΙΚΟΝΑ 63: ΡΙΖΑ ΜΕΣΟΥ ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΟΥ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ ΠΕΡΙΟΧΗ ΠΑΧΑΙΝΑ. ΦΑΣΜΑΤΙΚΑ ΚΑΝΑΛΙΑ	
Ιωδές- Πρασινό - Έρυθρο	104
Εικονά 64: Ριζα μέσου τετραγωνικού σφαλματός Περιοχή Παχαίνα. Φασματικά καναλιά	
Ιωδές– Πρασινό – Εγγύς υπερυθρό.	105
Είκονα 65: Ρίζα μέσου τετραγωνικού σφαλματός. Περιοχή Παχαίνα. Φασματικά καναλιά	۸:
Πρασινό – Ερυώρο –Εγγύς υπερυώρο.	106
ΕΙΚΟΝΑ 66: ΣΧΕΤΙΚΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΜΕΣΗΣ ΤΙΜΗΣ ΙΣΤΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ. ΠΕΡΙΟΧΗ ΑΧΙΒΑΔΟΛΙΜΝΗ.	
Φασματικά καναλιά: Ιώδεσ- Πρασινό - Ερυθρό.	108
ΕΙΚΟΝΑ 67: ΣΧΕΤΙΚΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΜΕΣΗΣ ΤΙΜΗΣ ΙΣΤΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ. ΠΕΡΙΟΧΗ ΑΧΙΒΑΔΟΛΙΜΝΗ.	
Φασματικά κανάλια: Ιώδές– Πρασινό – Εγγύς υπερυθρό.	109
ΕΙΚΟΝΑ 68: ΣΧΕΤΙΚΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΜΕΣΗΣ ΤΙΜΗΣ ΙΣΤΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ. ΠΕΡΙΟΧΗ ΑΧΙΒΑΔΟΛΙΜΝΗ.	
Φασματικά καναλιά: Πράσινο – Έρυθρο –Εγγύ υπερυθρο.	110
ΕΙΚΟΝΑ 69: ΣΧΕΤΙΚΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΜΕΣΗΣ ΤΙΜΗΣ ΙΣΤΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ. ΠΕΡΙΟΧΗ ΠΑΧΑΙΝΑ. ΦΑΣΜΑΤ	IKA
καναλία: Ιωδές- Πρασινό - Έρυθρο	111
ΕΙΚΟΝΑ 70: ΣΧΕΤΙΚΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΜΕΣΗΣ ΤΙΜΗΣ ΙΣΤΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ. ΠΕΡΙΟΧΗ ΠΑΧΑΙΝΑ. ΦΑΣΜΑΤ	ΊKΑ
καναλία Ιωδές- Πρασινό - Εγγύς υπερυθρό.	112
ΕΙΚΟΝΑ 71: ΣΧΕΤΙΚΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΜΕΣΗΣ ΤΙΜΗΣ ΙΣΤΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ. ΠΕΡΙΟΧΗ ΠΑΧΑΙΝΑ. ΦΑΣΜΑΤ	ΊKΑ
καναλία: Πρασινό – Ερυθρό –Εγγύς υπερυθρό.	113
Είκονα 72: Τυπική αποκλίση. Περιοχή Αχιβαδολιμνή. Φασματικά καναλία: Ιώδες- Πρασι	NO
- Ερυθρο.	115
Είκονα 73: Τυπική αποκλίση. Περιοχή Αχιβαδολιμνή. Φασματικά καναλία: Ιώδες- Πρασι	NO
– Εγγχ υπερυθρο.	116
Εικονά 74: Τυπική αποκλίση. Περιοχή Αχιβάδολιμνη. Φασματικά καναλία: Πρασινό –	
Ερυφρο –Εγγύ υπερυφρο.	117
Εικονά 75: Τυπική αποκλίση. Περιοχή Παχαίνα. Φασματικά καναλία: Ιωδές- Πρασινό -	
Ερυθρο	118
Εικονά 76: Τυπική αποκλίση Περιοχή Παχαίνα. Φασματικά καναλία Ιώδες- Πρασινό -	
Εγγχ υπερυθρο.	119
Είκονα 77: Τυπική αποκλίση. Περιοχή Παχαίνα. Φασματικά καναλία: Πρασινό – Ερυφρό -	-
Εγγύς υπερυθρό.	120
Eikona 78: Synteleethe syexetiene toy NDVI tan apxikan kai syfxaneymenan eikonar	١.
Περιοχή Αχιβαδολιμνή. Φασματικά καναλία: Έρυθρο / Εγγύς υπερυθρο –	
ΠΡΑΣΙΝΟ – ΙΩΔΕΣ.	122
Eikona 79: Syntelesthe sysxetiene toy NDVI tan apxikan kai syfxaneymenan eikonar	١.
Περιοχή Αχιβαδολιμνή. Φασματικά καναλιά: Πράσινο – Ερυώρο –Εγγύσ	
УПЕРУ Ө РО.	123

Είκονα 80: Σύντελεστής σύσχετισής του NDVI των αρχικών και σύγχωνευμένων είκονων. Περιοχή Παχαίνα. Φασματικά καναλία: Ερυθρο / Εγγύς υπερυθρο – Πρασινό – Ιωδές. 124

Είκονα 81: Σύντελεστής σύσχετισής του NDVI των αρχικών και σύγχωνευμένων είκονων. Περιοχή Παχαίνα. Φασματικά καναλία: Πρασίνο – Ερυθρό –Εγγύς υπερυθρό. 125

Κατάλογος εικόνων παραρτήματος

ПАРАРТНМА І	- Είκονα 1: Τμημα της παγχρωματικής είκονας Quickbird (διάσταση	
	EIKONO Σ TOIXEIOY 0,61M X 0,61M) HOY AHEIKONIZEI THN HEPIOXH	
	ΑΧΙΒΑΔΟΛΙΜΝΗ	3
ПАРАРТНМА I ·	- Εικονά 2: Ιωδές κανάλι. (ι) διαστάση εικονοστοιχείου 2,44m x 2,44m, (ι)	
	διάσταση εικονόστοιχείου 0,61m x 0,61m.	
ПАРАРТНМА I ·	- Εικονά 3: Πρασινό κανάλι. (ι) διάσταση εικονοστοιχείου 2,44m x 2,44m, (ι)	
	διάσταση εικονόστοιχείου 0,61m x 0,61m.	4
ПАРАРТНМА I ·	- Είκονα 4: Ερύθρο κανάλι. (ι) διάσταση είκονοστοιχείου 2,44m x 2,44m, (ι)	
	διάσταση εικονόστοιχείου 0,61m x 0,61m.	5
ПАРАРТНМА І	- Είκονα 5: Κανάλι Εγγύς υπερυθρού. (ι) διαστάση είκονοστοιχείου 2,44m χ	
	2,44μ, (ι) διαστάση εικονοστοιχείου 0,61μ x 0,61μ.	5
ПАРАРТНМА І	- Είκονα 6: RGB ψευδοχρωματική είκονα, πριν τη συγχωνεύση, όπου στο	
	ΕΡΥΘΡΟ ΚΑΝΑΛΙ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΕΙ ΤΟ ΚΟΚΚΙΝΟ ΧΡΩΜΑ, ΣΤΟ ΠΡΑΣΙΝΟ ΚΑΝΑΛΙ ΤΟ	
	ΠΡΑΣΙΝΟ ΧΡΩΜΑ ΚΑΙ ΣΤΟ ΜΠΛΕ ΚΑΝΑΛΙ ΤΟ ΜΠΛΕ ΧΡΩΜΑ. (Ι) ΔΙΑΣΤΑΣΗ	
	EIKONOSTOIXEIOY 2,44M X 2,44M, (I) Δ IASTASH EIKONOSTOIXEIOY 0,61M X 0,61M.	7
ПАРАРТНМА I ·	- Εικονά 7: Ψευδοχρωματικές εικονές που προεκύψαν από συγχώνευση με τ	Σ
	ΜΕΘΟΔΟΥΣ (Ι) PCA_ΠΕΡ.Α ΚΑΙ (ΙΙ) PCA_ΠΕΡ.Β.	7
ПАРАРТНМА I ·	- Εικόνα 8: Ψευδοχρωματικές εικόνες που προεκύψαν από συγχώνευση με τ	Σ
	ΜΕΘΟΔΟΥΣ (Ι) PCA_ΠΕΡ.Γ ΚΑΙ (ΙΙ) IHS.	8
ПАРАРТНМА I ·	- Εικόνα 9: Ψευδοχρωματικές εικόνες που προεκύψαν από συγχώνευση με τ	Σ
	ΜΕΘΟΔΟΥΣ (Ι) Á TROUS KAI (ΙΙ) Á TROUS-IHS.	8
ПАРАРТНМА I ·	- Εικονά 10: Ψευδοχρωματικές εικονές που προεκύψαν από συγχώνευση με	
	ΤΙΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ (Ι) Á TROUS-PCA_ΠΕΡ.Α , (ΙΙ)) ÁTROUS-PCA_ΠΕΡ.Β	9
ПАРАРТНМА I ·	- Εικονά 11: Ψευδοχρωματικές εικονές που προεκύψαν από συγχώνευση με	
	ΤΙΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ (Ι) ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΚΥΜΑΤΙΔΙΩΝ MALLAT ΚΑΙ (ΙΙ) ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ	5
	METAΣXHMATIΣMΩN MALLAT KAI PCA (MALLAT-PCA).	9
ПАРАРТНМА I ·	- Εικονά 12: Ψευδοχρωματικές εικονές που προεκύψαν από συγχώνευση με	
	ΤΙΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ (Ι) ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ MALLAT ΚΑΙ ΙΗS (MALLAT-	
	ΙΗS) ΚΑΙ (ΙΙ) ΜΕΘΟΔΟΣ FDFF.	0
ПАРАРТНМА I ·	- Εικονά 13: Ψευδοχρωματικές εικονές που προεκύψαν από συγχώνευση με	
	ΤΙΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ (Ι) FDFF-PCA_ΠΕΡ.Α ΚΑΙ (ΙΙ) FDFF-PCA_ΠΕΡ.Β.	10
ПАРАРТНМА I ·	- Εικονά 14: Ψευδοχρωματικές εικονές που προεκύψαν από συγχώνευση με	
	ΤΙΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ (Ι) FDFF-PCA_ΠΕΡ.Γ ΚΑΙ (ΙΙ) FDFF-Á TROUS-PCA_ΠΕΡ.Α.	11
ПАРАРТНМА I ·	- Είκονα 15: Ψευδοχρωματικές είκονες που προεκύψαν από συγχώνευση με	
	ΤΙΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ (Ι) FDFF-ATROUS-PCA_ΠΕΡ.Β ΚΑΙ	
	(II) FDFF-Á TROUS-PCA_ΠΕΡ.Γ.	1

Парартнма I - Еік	κόνα 16: Ψευδοχρωματικές είκονες που προεκύψαν από συγχώνευση μ	Е
TIΣ	ΣΜΕΘΟΔΟΥΣ (Ι) FDFFΠΑΓΧΡ-Ά TROUS ΚΑΙ	
(II)	FDFFпагхр-Á trous-PCA_Пер.А.	12
Парартнма I - Еік	κονα 17: Ψευδοχρωματικές είκονες που προεκύψαν από συγχώνευση μ	Е
ΤΙΣ	ΣΜΕΘΟΔΟΥΣ (Ι) FDFFΠΑΓΧΡ-Ά TROUS-PCA_ΠΕΡ.Β ΚΑΙ (ΙΙ) FDFFΠΑΓΧΡ-Ά TRO	OUS-
PC	$A_{\Pi EP}.\Gamma.$	12
Парартнма I - Еік	κονα 18: Ψεγδοχρωματικές είκονες που προεκύψαν από συγχώνευση μ	E
ΤΙΣ	ΣΜΕΘΟΔΟΥΣ (Ι) FDFFπαγχρ-PCA_Περ.Α και	
(II)	FDFFпагхр-PCA_Пер.В.	13
Парартнма I - Еік	κονα 19: Ψεγδοχρωματική είκονα που προεκύψε από συγχώνευση με τι	Σ
ME	ΞΘΟΔΟΥΣ (Ι) FDFFΠΑΓΧΡ-PCA_ΠΕΡ.Γ ΚΑΙ (ΙΙ) Α΄ TROUS-PCA_ΠΕΡ.Γ.	13
Парартнма I - Еік	KONA 20: RGB ΨΕΥΔΟΧΡΩΜΑΤΙΚΗ ΕΙΚΟΝΑ, ΟΠΟΥ ΣΤΟ ΕΓΓΥΣ ΥΠΕΡΥΘΡΟ ΚΑΝΑΛ	۸I
AN	ΤΙΣΤΟΙΧΕΙ ΤΟ ΚΟΚΚΙΝΟ ΧΡΩΜΑ, ΣΤΟ ΠΡΑΣΙΝΟ ΚΑΝΑΛΙ ΤΟ ΠΡΑΣΙΝΟ ΧΡΩΜΑ ΚΑΙ	ΣΤΟ
МП	ίλε καναλί το μπλε χρώμα. (ι) διάσταση εικονόστοιχείου 2,44m x 2,44m,	(I)
ΔIA	αστάση εικονόστοιχείου 0,61m x 0,61m.	15
Парартнма I - Еік	κονα 21: Ψευδοχρωματικές είκονες που προεκύψαν από συγχώνευση μ	E
ΤΙΣ	ΣΜΕΘΟΔΟΥΣ (Ι) ΡCΑ_ΠΕΡ.Α ΚΑΙ (ΙΙ) ΡCΑ_ΠΕΡ.Β.	15
Парартнма I - Еік	κονα 22: Ψεγδοχρωματικές είκονες που προεκύψαν από συγχώνευση μ	E
ΤΙΣ	ΣΜΕΘΟΔΟΥΣ (Ι) PCA_ΠΕΡ.Γ ΚΑΙ (ΙΙ) IHS.	16
Парартнма I - Еік	κονα 23: Ψεγδοχρωματικές είκονες που προεκύψαν από συγχώνευση μ	E
ΤΙΣ	ΣΜΕΘΟΔΟΥΣ (Ι) Á TROUS KAI (ΙΙ) Á TROUS-IHS.	16
Парартнма I - Еік	κονα 24: Ψευδοχρωματικές είκονες που προεκύψαν από συγχώνευση μ	Е
TIΣ	ΣΜΕΘΟΔΟΥΣ (Ι) Á TROUS - PCA_ΠΕΡ.Α ΚΑΙ (ΙΙ) Á TROUS-PCA_ΠΕΡ.Β.	17
Парартнма I - Еік	κονα 25: Ψεγδοχρωματικές είκονες που προεκύψαν από συγχώνευση μ	E
ΤΙΣ	ΜΕΘΟΔΟΥΣ (Ι) ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΚΥΜΑΤΙΔΙΩΝ MALLAT ΚΑΙ (ΙΙ) ΣΥΝΔΥΑΣΜ	ΟΣ
ME	TAΣXHMATIΣMΩN MALLAT KAI PCA (MALLAT-PCA).	17
Парартнма I - Еік	κονα 26: Ψεγδοχρωματικές είκονες που προεκύψαν από συγχώνευση μ	E
TIΣ	ΣΜΕΘΟΔΟΥΣ (Ι) ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ MALLAT KAI IHS (MALLA	Т-
IH	S) ΚΑΙ (ΙΙ) ΜΕΘΟΔΟΣ FDFF.	18
ПАРАРТНМА I - ЕІК	κονα 27: Ψευδοχρωματικές είκονες που προεκύψαν από συγχώνευση μ	Е
ΤΙΣ	ΣΜΕΘΟΔΟΥΣ (Ι) FDFF-PCA_ΠΕΡ.Α ΚΑΙ (ΙΙ) FDFF-PCA_ΠΕΡ.Β.	18
ПАРАРТНМА I - ЕІК	κονα 28: Ψεγδοχρωματικές είκονες που προεκύψαν από συγχώνευση μ	Е
TIΣ	ΣΜΕΘΟΔΟΥΣ (I) FDFF-PCA_ΠΕΡ.Γ ΚΑΙ (II) FDFF- Ά TROUS-PCA_ΠΕΡ.Α.	19
Парартнма I - Еік	κονα 29: Ψευδοχρωματικές είκονες που προεκύψαν από συγχώνευση μ	Е
TIΣ	ΣΜΕΘΟΔΟΥΣ (I) FDFF- Á TROUS-PCA ΠΕΡ.Β ΚΑΙ (ΙΙ) FDFF- Á TROUS-	
PC	СА_Пер.Γ.	19
Парартнма I - Еік		E
ΤΙΣ	ς μεθόδους (1) FDFFπαγχρ- Á Trous και	

(II) FDFFПАГХ Á TROUS-PCA ПЕР.А.

- Παραρτημα Ι Εικόνα 31: Ψευδοχρωματικές εικόνες που προεκύψαν από συγχώνευση με τις μέθοδους (ι) FDFFπαγχρ- ά Trous-PCA_Περ.Βκαι (ιι) FDFFπαγχρ- ά Trous-PCA_Περ.Γ. 20
- ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι ΕΙΚΟΝΑ 32: ΨΕΥΔΟΧΡΩΜΑΤΙΚΕΣ ΕΙΚΟΝΕΣ ΠΟΥ ΠΡΟΕΚΥΨΑΝ ΑΠΟ ΣΥΓΧΩΝΕΥΣΗ ΜΕ ΤΙΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ (Ι) FDFFπaγxp-PCA_Πep.A κai (ΙΙ) FDFFπaγxp-PCA_Πep.B. 21
- ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι ΕΙΚΟΝΑ 33: ΨΕΥΔΟΧΡΩΜΑΤΙΚΗ ΕΙΚΟΝΑ ΠΟΥ ΠΡΟΕΚΥΨΕ ΑΠΟ ΣΥΓΧΩΝΕΥΣΗ ΜΕ ΤΙΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ (Ι) FDFFΠΑΓΧΡ-PCA_ΠΕΡ.Γ ΚΑΙ (ΙΙ) 'ATROUS-PCA_ΠΕΡ.Γ. 21
- Παραρτημα Ι Είκονα 34: RGB ψευδοχρωματική είκονα, πριν τη συγχώνευση, όπου στο κανάλι του εγγσ υπερυθρού έχει απόδοθει το κοκκινό χρωμά, στο ερυθρό κανάλι το πρασινό χρωμά και στο πρασινό κανάλι το μπλε χρωμά. (ι) διαστάση είκονοστοιχείου 2,44m x 2,44m, (ι) διαστάση είκονοστοιχείου 0,61m x 0,61m. 23
- Παραρτημα Ι Είκονα 35: Ψευδοχρωματικές είκονες που προεκύψαν από συγχώνευση με τις μέθοδους (i) PCA_Περ.Α και (ii) PCA_Περ.Β. 23
- Παραρτημα Ι Εικόνα 36: Ψευδοχρωματικές εικόνες που προεκύψαν από συγχώνευση με τις μέθοδους (i) PCA_Πέρ.Γ και (ii) IHS. 24
- Παραρτημα Ι Είκονα 37: Ψευδοχρωματικές είκονες που προεκύψαν από συγχώνευση με τις μέθοδους (i) ά Trous και (ii) ά Trous-IHS. 24
- ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι ΕΙΚΟΝΑ 38: ΨΕΥΔΟΧΡΩΜΑΤΙΚΕΣ ΕΙΚΟΝΕΣ ΠΟΥ ΠΡΟΕΚΥΨΑΝ ΑΠΟ ΣΥΓΧΩΝΕΥΣΗ ΜΕ ΤΙΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ (Ι) Ά TROUS - PCA_ΠΕΡ.Α ΚΑΙ (ΙΙ) Ά TROUS-PCA_ΠΕΡ.Β. 25
- Παραρτημα Ι Εικόνα 39: Ψευδοχρωματικές εικόνες που προεκύψαν από συγχώνευση με τις μέθοδους (ι) μετασχηματισμός κυματιδιών Mallat και (ιι) σύνδυασμός μετασχηματισμών Mallat και PCA (Mallat-PCA). 25
- Παραρτημα Ι Εικόνα 40: Ψευδοχρωματικές εικόνες που προεκύψαν από συγχώνευση με τις μέθοδους (ι) σύνδυασμος μετασχηματισμών Mallat και IHS (Mallat-IHS)και (ιι) μέθοδος FDFF. 26
- ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι ΕΙΚΟΝΑ 41: ΨΕΥΔΟΧΡΩΜΑΤΙΚΕΣ ΕΙΚΟΝΕΣ ΠΟΥ ΠΡΟΕΚΥΨΑΝ ΑΠΟ ΣΥΓΧΩΝΕΥΣΗ ΜΕ ΤΙΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ (Ι) FDFF-PCA_ΠΕΡ.Α ΚΑΙ (ΙΙ) FDFF-PCA_ΠΕΡ.Β. 26
- Παραρτημα Ι Είκονα 42: Ψευδοχρωματικές είκονες που προεκύψαν από συγχώνευση με τις μέθοδους (I) FDFF-PCA_Περ.Γ και (II) FDFF- ά trous-PCA_Περ.Α. 27
- Παραρτημα Ι Είκονα 43: Ψευδοχρωματικές είκονες που προεκύψαν από συγχώνευση με τις μέθοδους (i) FDFF- ά trous-PCA_Περ.Β και (ii) FDFF- ά trous-PCA Περ.Γ. 27
- Παραρτημα Ι Είκονα 44: Ψευδοχρωματικές είκονες που προεκύψαν από συγχώνευςη με τις μέθοδους (i) FDFFπαγχρ- ά trous και (ii) FDFFπαγχρ- ά trous-PCA_Περ.Α. 28

20

Παραρτημία I - Είκονα 45: Ψευδοχρωματικές είκονες που προεκύψαν από συγχώνευση μ	Æ
τις μεθοδούς (ι) FDFFπaγχρ- Α΄ trous-PCA_Περ.Α και (ιι) FDFFπaγχρ- Α΄	
TROUS-PCA_ Π EP. Γ .	28
Παραρτημία I - Είκονα 46: Ψευδοχρωματικές είκονες που προεκύψαν από συγχώνευση μ	ΛE
ΤΙΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ (Ι) FDFFΠΑΓΧΡ-PCA_ΠΕΡ.Α ΚΑΙ (ΙΙ) FDFFΠΑΓΧΡ-PCA_ΠΕΡ.Β.	29
Παραρτημία I - Είκονα 47: Ψευδοχρωματική είκονα που προέκυψε από συγχώνευση με τ	ïIΣ
ΜΕΘΟΔΟΥΣ (Ι) FDFFΠΑΓΧΡ-PCA_ΠΕΡ.Γ ΚΑΙ (ΙΙ) Α΄ TROUS-PCA_ΠΕΡ.Γ.	29
Παραρτημία Ι - Είκονα 48: Τμήμα της παγχρωματικής είκονας Quickbird (διάσταση	
εικονοστοιχείου $0,61$ m x $0,61$ m) που απεικονίζει την περιοχή Παχαίνα.	31
Παραρτημά I - Είκονα 49: Ιώδες κανάλι. (Ι) διαστάση είκονοστοιχείου 2,44m x 2,44m, (Ι)	
ΔΙΑΣΤΑΣΗ ΕΙΚΟΝΟΣΤΟΙΧΕΙΟΥ 0,61Μ Χ 0,61Μ.	32
Παραρτημία I - Είκονα 50: Πρασινό κανάλι. (Ι) διαστάση είκονοστοιχείου 2,44m x 2,44m, (μ	()
ΔΙΑΣΤΑΣΗ ΕΙΚΟΝΟΣΤΟΙΧΕΙΟΥ 0,61Μ Χ 0,61Μ.	32
Παραρτημά I - Είκονα 51: Ερυθρό κανάλι. (Ι) διαστάση είκονοστοιχείου 2,44m x 2,44m, (Ι)	1
ΔΙΑΣΤΑΣΗ ΕΙΚΟΝΟΣΤΟΙΧΕΙΟΥ 0,61Μ Χ 0,61Μ.	33
Παραρτημά I - Είκονα 52: Κανάλι Εγγύς υπερυθρού. (i) διαστάση είκονοστοιχείου 2,44m	Х
2,44μ, (ι) διαστάση εικονοστοιχείου 0,61μ x 0,61μ.	33
Παραρτημά I - Είκονα 53: RGB ψευδοχρωματική είκονα, πρίν τη σύγχωνευση, όπου στο	
ΕΡΥΘΡΟ ΚΑΝΑΛΙ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΕΙ ΤΟ ΚΟΚΚΙΝΟ ΧΡΩΜΑ, ΣΤΟ ΠΡΑΣΙΝΟ ΚΑΝΑΛΙ ΤΟ	
ΠΡΑΣΙΝΟ ΧΡΩΜΑ ΚΑΙ ΣΤΟ ΜΠΛΕ ΚΑΝΑΛΙ ΤΟ ΜΠΛΕ ΧΡΩΜΑ. (Ι) ΔΙΑΣΤΑΣΗ	
εικονοστοιχείου 2,44m x 2,44m, (i) διαστάση εικονοστοιχείου 0,61m x 0,61	м.35
Παραρτημά I - Είκονα 54: Ψευδοχρωματικές είκονες που προέκυψαν από συγχώνευση μ	Æ
ΤΙΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ (Ι) PCA_ΠΕΡ.Α ΚΑΙ (ΙΙ) PCA_ΠΕΡ.Β.	35
Παραρτημά I - Είκονα 55: Ψευδοχρωματικές είκονες που προέκυψαν από συγχώνευση μ	Æ
τις μεθόδους (ι) PCA_Περ.γ και (ιι) IHS.	36
Παραρτημά I - Είκονα 56: Ψευδοχρωματικές είκονες που προέκυψαν από συγχώνευση μ	Æ
ΤΙΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ (Ι) Á TROUS KAI (ΙΙ) Á TROUS-IHS.	36
Παραρτημά I - Είκονα 57: είκονες που προεκύψαν από σύγχωνευση με τις μεθόδους (i)	Á
TROUS - PCA_ПЕР.А КАІ (II) Á TROUS-PCA_ПЕР.В.	37
Παραρτημά I - Είκονα 58: Ψευδοχρωματικές είκονες που προέκυψαν από συγχώνευση μ	ΛE
ΤΙΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ (Ι) ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΚΥΜΑΤΙΔΙΩΝ MALLAT ΚΑΙ (ΙΙ) ΣΥΝΔΥΑΣΝ	ΛΟΣ
METAEXHMATIEMON MALLAT KAI PCA (MALLAT-PCA).	37
Παραρτημά I - Είκονα 59: Ψευδοχρωματικές είκονες που προέκυψαν από συγχώνευση μ	Æ
τις μεθοδούς (ι) σύνδυασμος μετασχηματισμών Mallat και IHS (Malla	\ T-
ΙΗS)ΚΑΙ (ΙΙ) ΜΕΘΟΔΟΣ FDFF.	38
Παραρτημία I - Είκονα 60: Ψευδοχρωματικές είκονες που προεκύψαν από συγχώνευση μ	Æ
ΤΙΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ (Ι) FDFF-PCA_ΠΕΡ.Α ΚΑΙ (ΙΙ) FDFF-PCA_ΠΕΡ.Β.	38

Παραρτημία I - Είκονα 61: Ψευδοχρωματικές είκονες που προεκύψαν από συγχώνευς μαθ	3
ΤΙΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ (Ι) FDFF-PCA_ΠΕΡ.Γ ΚΑΙ (ΙΙ) FDFF-'ATROUS-PCA_ΠΕΡ.Α.	39
Παραρτημία I - Είκονα 62: είκονες που προεκύψαν από συγχώνευση με τις μεθόδους (i)	
FDFF- Á trous-PCA_Пер.В каі (іі) FDFF- Á trous-PCA_Пер.Г.	39
Παραρτημία Ι - Εικονά 63: Ψευδοχρωματικές εικονές που προεκύψαν από συγχώνευση με	3
τις μεθοδούς (ι) FDFFπaγχρ- Á trous κai (ιι) FDFFπaγχρ- Á trous-	
$PCA_{\Pi EP.A.}$	40
Παραρτημία Ι - Εικονά 64: Ψευδοχρωματικές εικονές που προεκύψαν από συγχώνευση με	Ξ
τις μεθοδούς (ι) FDFFπaγχρ- Α΄ trous-PCA_Πep.Β κai (ιι) FDFFπaγχρ- Α΄	
TROUS-PCA_ Π EP. Γ .	40
Παραρτημία Ι - Εικονά 65: Ψευδοχρωματικές εικονές που προεκύψαν από συγχώνευση με	Ξ
ΤΙΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ (Ι) FDFFΠΑΓΧΡ-PCA_ΠΕΡ.Α ΚΑΙ (ΙΙ) FDFFΠΑΓΧΡ-PCA_ΠΕΡ.Β.	41
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι - ΕΙΚΟΝΑ 66: ΨΕΥΔΟΧΡΩΜΑΤΙΚΗ ΕΙΚΟΝΑ ΠΟΥ ΠΡΟΕΚΥΨΕ ΑΠΟ ΣΥΓΧΩΝΕΥΣΗ ΜΕ ΤΙΣ	Ξ
ΜΕΘΟΔΟΥΣ (Ι) FDFFΠΑΓΧΡ-PCΑ_ΠΕΡ.Γ ΚΑΙ (Ι) Α΄ TROUS-PCΑ_ΠΕΡ.Γ.	41
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι - ΕΙΚΟΝΑ 67: RGB ΨΕΥΔΟΧΡΩΜΑΤΙΚΗ ΕΙΚΟΝΑ, ΟΠΟΥ ΣΤΟ ΕΓΓΥΣ ΥΠΕΡΥΘΡΟ ΚΑΝΑΛ	I
ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΕΙ ΤΟ ΚΟΚΚΙΝΟ ΧΡΩΜΑ, ΣΤΟ ΠΡΑΣΙΝΟ ΚΑΝΑΛΙ ΤΟ ΠΡΑΣΙΝΟ ΧΡΩΜΑ ΚΑΙ Σ	στο
ΜΠΛΕ ΚΑΝΑΛΙ ΤΟ ΜΠΛΕ ΧΡΩΜΑ. (Ι) ΔΙΑΣΤΑΣΗ ΕΙΚΟΝΟΣΤΟΙΧΕΙΟΥ 2,44Μ Χ 2,44Μ, ((I)
διάσταση εικονοστοιχείου 0,61m x 0,61m.	43
Παραρτημία I - Είκονα 68: Ψευδοχρωματικές είκονες που προεκύψαν από συγχώνευση με	Ξ
ΤΙΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ (Ι) PCA_ΠΕΡ.Α ΚΑΙ (ΙΙ) PCA_ΠΕΡ.Β.	43
Παραρτημα Ι - Εικόνα 69: Ψευδοχρωματικές εικόνες που προεκύψαν από συγχώνευση με	Ξ
ΤΙΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ (Ι) PCA_ΠΕΡ.Γ ΚΑΙ (ΙΙ) IHS.	44
Παραρτημα Ι - Εικονά 70: Ψευδοχρωματικές εικονές που προεκύψαν από συγχώνευση με	Ξ
ΤΙΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ (Ι) Á TROUS KAI (ΙΙ) Á TROUS-IHS.	44
Παραρτημα Ι - Εικονά 71: Ψευδοχρωματικές εικονές που προεκύψαν από συγχώνευση με	Ξ
τις μεθόδους (ι) Á Trous - PCA_Περ.Α και (ιι) Á Trous-PCA_Περ.Β.	45
Παραρτήμα I - Είκονα 72: Ψευδοχρωματικές είκονες που προεκύψαν από συγχώνευση με	Ξ
ΤΙΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ (Ι) ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΚΥΜΑΤΙΔΙΩΝ MALLAT ΚΑΙ (ΙΙ) ΣΥΝΔΥΑΣΜΟ	ΟΣ
METAEXHMATIEMON MALLAT KAI PCA (MALLAT-PCA).	45
Παραρτήμα I - Είκονα 73: Ψευδοχρωματικές είκονες που προεκύψαν από συγχώνευση με	Ξ
τις μεθόδους (ι) σύνδυασμός μετασχηματισμών Mallat και IHS (Mallat	Γ-
ΙΗS) ΚΑΙ (ΙΙ) ΜΕΘΟΔΟΣ FDFF.	46
Παραρτημία Ι - Είκονα 74: Ψευδοχρωματικές είκονες που προεκύψαν από συγχώνευς μαθ	Ξ
ΤΙΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ (Ι) FDFF-PCA_ΠΕΡ.Α ΚΑΙ (ΙΙ) DFFF-PCA_ΠΕΡ.Β.	46
Παραρτημία Ι - Είκονα 75: Ψευδοχρωματικές είκονες που προεκύψαν από συγχώνευς μαθ	Ξ
TENEROLOUS (I) EDEE DCA HERE $V_{A,I}$ (II) EDEE 'ATROUG DCA HERA	17

xiv

- Παραρτημα Ι Εικόνα 76: Ψευδοχρωματικές εικόνες που προεκύψαν από συγχώνευςη με τις μέθοδους (i) FDFF- ά trous-PCA_Περ.Β και (ii) FDFF- ά trous-PCA_Περ.Γ. 47
- Παραρτημα Ι Είκονα 77: Ψευδοχρωματικές είκονες που προεκύψαν από συγχώνευςη με τις μέθοδους (1) FDFFπαγχρ- ά trous και (11) FDFFπαγχρ- ά trous-PCA Περ.Α. 48
- ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι ΕΙΚΟΝΑ 78: ΨΕΥΔΟΧΡΩΜΑΤΙΚΕΣ ΕΙΚΟΝΕΣ ΠΟΥ ΠΡΟΕΚΥΨΑΝ ΑΠΟ ΣΥΓΧΩΝΕΥΣΗ ΜΕ ΤΙΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ (Ι) FDFFπαγχρ- ά trous-PCA_Περ.Β και (ΙΙ) FDFFπαγχρ- ά trous-PCA_Περ.Γ. 48
- Παραρτημα Ι Είκονα 79: Ψευδοχρωματικές είκονες που προεκύψαν από συγχώνευση με τις μέθοδους (i) FDFFπαγχρ-PCA_Περ.Α και (ii) FDFFπαγχρ-PCA_Περ.Β. 49
- Παραρτημα Ι Εικόνα 80: Ψευδοχρωματική είκονα που προέκυψε από συγχώνευση με τις μεθόδους (i) FDFFπαγχρ-PCA_Περ.Γ και (ii) ά trous-PCA_Περ.Γ. 49
- ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι ΕΙΚΟΝΑ 81: RGB ΨΕΥΔΟΧΡΩΜΑΤΙΚΗ ΕΙΚΟΝΑ, ΠΡΙΝ ΤΗ ΣΥΓΧΩΝΕΥΣΗ, ΟΠΟΥ ΣΤΟ ΚΑΝΑΛΙ ΤΟΥ ΕΓΓΥΣ ΥΠΕΡΥΘΡΟΥ ΕΧΕΙ ΑΠΟΔΟΘΕΙ ΤΟ ΚΟΚΚΙΝΟ ΧΡΩΜΑ, ΣΤΟ ΕΡΥΘΡΟ ΚΑΝΑΛΙ ΤΟ ΠΡΑΣΙΝΟ ΧΡΩΜΑ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΡΑΣΙΝΟ ΚΑΝΑΛΙ ΤΟ ΜΠΛΕ ΧΡΩΜΑ. (Ι) ΔΙΑΣΤΑΣΗ ΕΙΚΟΝΟΣΤΟΙΧΕΙΟΥ 2,44M X 2,44M, (Ι) ΔΙΑΣΤΑΣΗ ΕΙΚΟΝΟΣΤΟΙΧΕΙΟΥ 0,61M X 0,61M. 51
- ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι ΕΙΚΟΝΑ 82: ΨΕΥΔΟΧΡΩΜΑΤΙΚΕΣ ΕΙΚΟΝΕΣ ΠΟΥ ΠΡΟΕΚΥΨΑΝ ΑΠΟ ΣΥΓΧΩΝΕΥΣΗ ΜΕ ΤΙΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ (Ι) PCA_ΠΕΡ.Α ΚΑΙ (ΙΙ) PCA_ΠΕΡ.Β. 51
- Παραρτημα Ι Εικόνα 83: Ψευδοχρωματικές εικόνες που προεκύψαν από συγχώνευση με τις μέθοδους (i) PCA_Περ.Γ και (ii) IHS. 52
- Παραρτημα Ι Εικόνα 84: Ψευδοχρωματικές εικόνες που προεκύψαν από συγχώνευση με τις μέθοδους (i) ά Trous και (ii) ά Trous-IHS. 52
- ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι ΕΙΚΟΝΑ 85: ΨΕΥΔΟΧΡΩΜΑΤΙΚΕΣ ΕΙΚΟΝΕΣ ΠΟΥ ΠΡΟΕΚΥΨΑΝ ΑΠΟ ΣΥΓΧΩΝΕΥΣΗ ΜΕ ΤΙΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ (Ι) Ά TROUS - PCA_ΠΕΡ.Α ΚΑΙ (ΙΙ) Ά TROUS-PCA_ΠΕΡ.Β. 53
- ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι ΕΙΚΟΝΑ 86: ΨΕΥΔΟΧΡΩΜΑΤΙΚΕΣ ΕΙΚΟΝΕΣ ΠΟΥ ΠΡΟΕΚΥΨΑΝ ΑΠΟ ΣΥΓΧΩΝΕΥΣΗ ΜΕ ΤΙΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ (Ι) ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΚΥΜΑΤΙΔΙΩΝ MALLAT ΚΑΙ (ΙΙ) ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ MALLAT ΚΑΙ PCA (MALLAT-PCA). 53
- Παραρτημα Ι Εικόνα 87: Ψευδοχρωματικές εικόνες που προεκύψαν από συγχώνευση με τις μέθοδους (ι) σύνδυασμος μετασχηματισμών Mallat και IHS (Mallat-IHS)και (ιι) μέθοδος FDFF. 54
- ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι ΕΙΚΟΝΑ 88: ΨΕΥΔΟΧΡΩΜΑΤΙΚΕΣ ΕΙΚΟΝΕΣ ΠΟΥ ΠΡΟΕΚΥΨΑΝ ΑΠΟ ΣΥΓΧΩΝΕΥΣΗ ΜΕ ΤΙΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ (Ι) FDFF-PCA_ΠΕΡ.Α ΚΑΙ (ΙΙ) FDFF-PCA_ΠΕΡ.Β. 54
- ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι ΕΙΚΟΝΑ 89: ΨΕΥΔΟΧΡΩΜΑΤΙΚΕΣ ΕΙΚΟΝΕΣ ΠΟΥ ΠΡΟΕΚΥΨΑΝ ΑΠΟ ΣΥΓΧΩΝΕΥΣΗ ΜΕ ΤΙΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ (Ι) FDFF-PCA_ΠΕΡ.Γ ΚΑΙ (ΙΙ) FDFF-'ATROUS-PCA_ΠΕΡ.Α. 55

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι - ΕΙΚΟΝΑ 90: ΨΕΥΔΟΧΡΩΜΑΤΙΚΕΣ ΕΙΚΟΝΕΣ ΠΟΥ ΠΡΟΕΚΥΨΑΝ ΑΠΟ ΣΥΓΧΩΝΕΥΣΗ Ν	ME
ΤΙΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ (Ι) FDFF- Á TROUS- PCA_ΠΕΡ.Β ΚΑΙ (ΙΙ) FDFF- Á TROUS-	
$PCA_{\Pi EP}.\Gamma.$	55
Παραρτημα Ι - Εικονά 91: Ψευδοχρωματικές εικονές που προεκύψαν από συγχώνευση ν	ME
τις μεθόδους (ι) FDFFπaγxp- Á trous και (ιι) FDFFπaγxp- Á trous-	
PCA_IIEP.A.	56
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι - ΕΙΚΟΝΑ 92: ΨΕΥΔΟΧΡΩΜΑΤΙΚΕΣ ΕΙΚΟΝΕΣ ΠΟΥ ΠΡΟΕΚΥΨΑΝ ΑΠΟ ΣΥΓΧΩΝΕΥΣΗ Ν	ME
τις μεθόδους (ι) FDFFπaγxp- Α΄ trous-PCA_Πep.Β και (ιι) FDFFπaγxp- Α΄	
TROUS-PCA_ Π EP. Γ .	56
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι - ΕΙΚΟΝΑ 93: ΨΕΥΔΟΧΡΩΜΑΤΙΚΕΣ ΕΙΚΟΝΕΣ ΠΟΥ ΠΡΟΕΚΥΨΑΝ ΑΠΟ ΣΥΓΧΩΝΕΥΣΗ Ν	ME
ΤΙΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ (Ι) FDFFΠΑΓΧΡ-PCA_ΠΕΡ.Α ΚΑΙ (ΙΙ) FDFFΠΑΓΧΡ-PCA_ΠΕΡ.Β.	57
Παραρτημα Ι - Εικονά 94: Ψευδοχρωματική είκονα που προεκύψε από συγχώνευση με τ	ΓΙΣ
ΜΕΘΟΔΟΥΣ (Ι) FDFFΠΑΓΧΡ-PCΑ_ΠΕΡ.Γ ΚΑΙ (ΙΙ) Α΄ TROUS-PCΑ_ΠΕΡ.Γ.	57
Παραρτημα ΙΙΙ - Εικονά 1: (ι) διαστάση εικονοστοιχείου 2,44m x 2,44m, (ι) διαστάση	
EIKONOSTOIXEIOY $0,61$ M x $0,61$ M.	101
ПАРАРТНМА III - EIKONA 2: (I) PCA_ПЕР.А КАІ (II) PCA_ПЕР.В.	103
Парартнма III - Еікопа З: (і) РСА_Пер.Г каі (іі) IHS.	103
Парартнма III - Eikona 4: (і)'A Trous каі (іі)'A Trous-IHS.	104
Парартнма III - Eikona 5: (і) Á Trous-PCA_Пер.А , (іі)) Á Trous-PCA_Пер.В .	104
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ - ΕΙΚΟΝΑ 6: (Ι) ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΚΥΜΑΤΙΔΙΩΝ MALLAT ΚΑΙ (ΙΙ) ΣΥΝΔΥΑΣΜΟ	Σ
METAEXHMATIEMON MALLAT KAI PCA (MALLAT-PCA)	105
Παραρτημα ΙΙΙ - Είκονα 7: (i) Σύνδυασμος μετασχηματισμών Mallat και IHS (Mallat	-IHS)
ΚΑΙ (ΙΙ) ΜΕΘΟΔΟΣ FDFF.	105
ПАРАРТНМА III - EIKONA 8: (1) FDFF-PCA_ПЕР.А КАІ (11) FDFF-PCA_ПЕР.В.	106
ПАРАРТНМА III - EIKONA 9: (I) FDFF-PCA_ПЕР.Г КАІ (II) FDFF- Á TROUS-PCA_ПЕР.А.	106
Парартнма III - Eikona 10: (і) FDFF- Á trous-PCA_Пер.В каі	
(II) FDFF- Á TROUS-PCA_ Π EP. Γ .	107
Парартнма III - Eikona 11: (i) FDFFпагхр- Á trous kai	
(II) FDFFпагхр- Á trous-PCA_Пер.А	107
ПАРАРТНМА III - EIKONA 12: (I) FDFFПАГХР- Á TROUS-PCA_ПЕР.В КАІ (II) FDFFПАГХР- Á TRO	OUS-
ΡCΑ_ΠΕΡ.Γ	108
ПАРАРТНМА III - EIKONA 13: (I) FDFFПАГХР-PCA_ПЕР.А КАІ (II) FDFFПАГХР-PCA_ПЕР.В.	108
Парартнма III - Еікопа 14: (і) FDFFпагхр-PCA_Пер.Г каі (іі) Átrous-PCA_Пер.Г	109
ПАРАРТНМА III - EIKONA 15: (I) PCA_ПЕР.А КАІ (II) PCA_ПЕР.В.	111
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ - ΕΙΚΟΝΑ 16: (Ι) PCA_ΠΕΡ.Γ ΚΑΙ (ΙΙ) IHS.	111
Парартнма III - Eikona 17: (і) Á Trous kai (іі) ́Á Trous-IHS.	112
Парартнма III - Eikona 18: (i) Á Trous-PCA_Пер.А , (ii)) Á Trous-PCA_Пер.В.	112

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ - ΕΙΚΟΝΑ 19: (Ι) ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΚΥΜΑΤΙΔΙΩΝ MALLAT ΚΑΙ (ΙΙ) ΣΥΝΔΥΑΣΜ	1ΟΣ
METAΣXHMATIΣMΩN MALLAT KAI PCA (MALLAT-PCA).	113
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ - ΕΙΚΟΝΑ 20: (Ι) ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ MALLAT ΚΑΙ ΙΗS (MALLA	.Т-
ΙΗS) ΚΑΙ (ΙΙ) ΜΕΘΟΔΟΣ FDFF.	113
ПАРАРТНМА III - EIKONA 21: (I) FDFF-PCA_ПЕР.А КАІ (II) FDFF-PCA_ПЕР.В.	114
ПАРАРТНМА III - EIKONA 22: (I) FDFF-PCA_ПЕР.Г КАІ (II) FDFF- Á TROUS-PCA_ПЕР.А.	114
Парартнма III - Eikona 23: (i) FDFF- Á trous-PCA_Пер.В каі	
(II) FDFF- Á TROUS-PCA_ΠΕΡ.Γ.	115
Парартнма III - Eikona 24: (i) FDFFпагхр- Á trous kai	
(II) FDFFпагхр- Á trous-PCA_Пер.А	115
Парартнма III - Еікопа 25: (і) FDFFпагхр- А́ trous-PCA_Пер.В каі (іі) FDFFпагхр- А́	
TROUS-PCA_ Π EP. Γ .	116
ПАРАРТНМА III - ЕІКОNА 26: (І) FDFFПАГХР-РСА_ПЕР.А КАІ (ІІ) FDFFПАГХР-РСА_ПЕР.В.	116
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ - ΕΙΚΟΝΑ 27: (Ι) FDFFΠΑΓΧΡ-PCA_ΠΕΡ.Γ ΚΑΙ (ΙΙ) Α΄ TROUS-PCA_ΠΕΡ.Γ.	117
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ - ΕΙΚΟΝΑ 28: (Ι) ΔΙΑΣΤΑΣΗ ΕΙΚΟΝΟΣΤΟΙΧΕΙΟΥ 2,44Μ Χ 2,44Μ, (Ι) ΔΙΑΣΤΑΣΗ	
EIKONO Σ TOIXEIOY 0,61M X 0,61M.	119
ПАРАРТНМА III - EIKONA 29: (I) PCA_ПЕР.А КАІ (II) PCA_ПЕР.В.	121
Парартнма III - Еікоna 30: (і) РСА_Пер.Г каі (іі) IHS.	121
Парартнма III - Eikona 31: (і) Á Trous каі (іі) Á Trous-IHS.	122
ПАРАРТНМА III - EIKONA 32: (I) Á TROUS-PCA_ПЕР.А , (II) Á TROUS-PCA_ПЕР.В	122
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ - ΕΙΚΟΝΑ 33: (Ι) ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΚΥΜΑΤΙΔΙΩΝ MALLAT ΚΑΙ (ΙΙ) ΣΥΝΔΥΑΣΜ	1ΟΣ
METAEXHMATIEMON MALLAT KAI PCA (MALLAT-PCA).	123
Παραρτημα III - Είκονα 34: (i) Σύνδυασμός μετασχηματισμών Mallat και IHS (Malla	. T-
IHS) ΚΑΙ (ΙΙ) ΜΕΘΟΔΟΣ FDFF.	123
ПАРАРТНМА III - EIKONA 35: (I) FDFF-PCA_ПЕР.А КАІ (II) FDFF-PCA_ПЕР.В.	124
ПАРАРТНМА III - EIKONA 36: (I) FDFF-PCA_ПЕР.Г КАІ (II) FDFF-Á TROUS-PCA_ПЕР.А.	124
Парартнма III - Eikona 37: (i) FDFF-Á trous-PCA_Пер.В каі	
(II) FDFF-Á TROUS-PCA_ΠΕΡ.Γ.	125
ПАРАРТНМА III - EIKONA 38: (I) FDFFПАГХР-Ќ TROUS KAI (II) FDFFПАГХР-Ќ TROUS-PCA_ПЕ	P.A.
	125
ПАРАРТНМА III - EIKONA 39: (I) FDFFПАГХР-Á TROUS-PCA_ПЕР.В КАІ (II) FDFFПАГХР-Á TRO	OUS-
ΡCΑ_ΠΕΡ.Γ.	126
ПАРАРТНМА III - EIKONA 40: (I) FDFFПАГХР-PCA_ПЕР.А КАІ (II) FDFFПАГХР- PCA_ПЕР.В.	126
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ - ΕΙΚΟΝΑ 41: (Ι) FDFFΠΑΓΧΡ-PCA_ΠΕΡ.Γ ΚΑΙ (ΙΙ) Ά TROUS-PCA_ΠΕΡ.Γ.	127
ПАРАРТНМА III - EIKONA 42: (I) PCA_ПЕР.А КАІ (II) PCA_ПЕР.В.	129
ПАРАРТНМА III - EIKONA 43: (I) PCA_ПЕР.Г КАІ (II) IHS.	129
Парартнма III - Eikona 44: (i) Á Trous kai (ii) Á Trous-IHS.	130
Парартнма III - Eikona 45: (i) Á Trous-PCA_Пер.А , (ii) Á Trous-PCA_Пер.В.	130
	xvii

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ - ΕΙΚΟΝΑ 46: (Ι) ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΚΥΜΑΤΙΔΙΩΝ MALLAT ΚΑΙ (ΙΙ) ΣΥΝΔΥΑΣΜ	ΔΟΣ
METAEXHMATIEMON MALLAT KAI PCA (MALLAT-PCA).	131
Παραρτημα III - Εικόνα 47: (ι) Σύνδυασμος μετασχηματισμών Mallat και IHS (Malla	A T-
ΙΗS) ΚΑΙ (ΙΙ) ΜΕΘΟΔΟΣ FDFF.	131
ПАРАРТНМА III - EIKONA 48: (I) FDFF-PCA_ПЕР.А КАІ (II) FDFF-PCA_ПЕР.В.	132
ПАРАРТНМА III - EIKONA 49: (I) FDFF-PCA_ПЕР.Г КАІ (II) FDFF-Á TROUS-PCA_ПЕР.А.	132
ПАРАРТНМА III - EIKONA 50: (I) FDFF-ATROUS-PCA_ПЕР.В КАІ	
(II) FDFF- TROUS-PCA_ Π EP. Γ .	133
Парартнма III - Eikona 51: (i) FDFFпагхр-́Atrous каі	
(II) FDFFпагхр-Á trous-PCA_Пер.А.	133
ПАРАРТНМА III - EIKONA 52: (I) FDFFПАГХР-Á TROUS-PCA_ПЕР.В КАІ (II) FDFFПАГХР-Á AT	ROUS-
ΡCΑ_ΠΕΡ.Γ.	134
ПАРАРТНМА III - EIKONA 53: (I) FDFFПАГХР-PCA_ПЕР.А КАІ (II) FDFFПАГХР-PCA_ПЕР.В.	134
Парартнма III - Eikona 54: (i) FDFFпагхр-PCA_Пер.Г каі (ii) Á trous-PCA_Пер.Г.	135

1 Εισαγωγή

1.1 Σκοπός διατριβής

Το αντικείμενο της παρούσας διατριβής είναι η ανάπτυξη νέων μεθόδων συγχώνευσης δορυφορικών εικόνων. Μια μέθοδος συγχώνευσης δύναται να θεωρηθεί ιδανική όταν επιτυγχάνει πλήρη διατήρηση, στην συγχωνευμένη εικόνα, της αρχικής χωρικής και φασματικής πληροφορίας. Μέχρι σήμερα δεν έχει βρεθεί κάποια μέθοδος που να μην παρουσιάζει σε κάποιο βαθμό, μετά την συγχώνευση, απώλειες της αρχικής πληροφορίας των εικόνων. Η παρούσα διατριβή στοχεύει στην δημιουργία μεθόδων συγχώνευσης που θα οδηγήσουν, βραχυπρόθεσμα ή μακροπρόθεσμα, την έρευνα ένα ακόμα βήμα πιο κοντά στην επίτευξη της ιδανικής τεχνικής συγχώνευσης.

Οι μέθοδοι που αναπτύχθηκαν θα εφαρμοστούν για τη χωρική και ποιοτική (στάδια ανάπτυξης και κατάσταση υγείας φυτών) διάκριση των φυτών σε περιοχές με προηγούμενη εξορυκτική δραστηριότητα, και συγκεκριμένα στη νήσο Μήλο (Κυκλάδες).

Πέραν της παρακολούθησης της βλάστησης, ανάγκη εικόνων που συνδυάζουν την υψηλή χωρική πληροφορία των παγχρωματικών και την φασματική πληροφορία των πολυφασματικών ή υπερφασματικών δεδομένων παρατηρείται και σε άλλες εφαρμογές της Τηλεπισκόπησης (π.χ. γεωλογία και ανίχνευση ορυκτών πόρων). Σε εμπορικό τουλάχιστον επίπεδο, δεν υπάρχουν εικόνες που να χαρακτηρίζονται ταυτόχρονα από υψηλή χωρική και φασματική ανάλυση.

Τα πολυφασματικά συστήματα καταγράφουν εικόνες στη παγχρωματική και πολυφασματική ζώνη. Η παγχρωματική εικόνα επιτρέπει καλό διαχωρισμό των αντικειμένων στο χώρο (π.χ. φυτά, οχήματα, κατοικίες) αλλά παρουσιάζει χαμηλή φασματική ανάλυση, καθότι καλύπτει μεγάλο εύρος μηκών κύματος. Ανάλογα με τον δορυφορικό αισθητήρα, στην παγχρωματική εικόνα καταγράφεται μόνο το ορατό (π.χ. δορυφόρος SPOT) ή το ορατό και το εγγύς υπέρυθρο (π.χ. δορυφόροι IKONOS και Quickbird) φάσμα.

Η πολυφασματική εικόνα συνίσταται από επιμέρους εικόνες, έκαστη των οποίων καταγράφει στενές περιοχές μηκών κύματος (φασματικά κανάλια). Η αλληλεπίδραση μεταξύ των υλικών της γήινης επιφάνειας και της ηλιακής ακτινοβολίας διαφοροποιείται με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Κατ' επέκταση, το ίδιο υλικό εμφανίζεται με διαφορετικό τρόπο σε κάθε κανάλι (π.χ. η βλάστηση εμφανίζεται σκουρόχρωμη στα κανάλια του ορατού και ανοιχτόχρωμη στο εγγύς υπέρυθρο). Συνεπώς, οι πολυφασματικές εικόνες επιτρέπουν τον ποιοτικό διαχωρισμό επιφανειών ή αντικειμένων (π.χ. γυμνά ή πρόσφατα καλλιεργημένα εδάφη, δασικές περιοχές, στάδια ανάπτυξης και κατάσταση υγείας φυτών). Το μειονέκτημα

1

των ψηφιακών εικόνων που καταγράφονται από κάθε κανάλι των πολυφασματικών αισθητήρων είναι η χαμηλή χωρική ανάλυση.

Η συγχώνευση εικόνων αποτελεί, μέχρι σήμερα, την καλύτερη λύση σε αυτό το πρόβλημα, καθότι επιτυγχάνεται συνδυασμός, σε μία μοναδική εικόνα, της υψηλής χωρικής και φασματικής πληροφορίας, που περιέχουν οι παγχρωματικές και πολυφασματικές εικόνες. Ο συνδυασμός πολυφασματικών ή υπερφασματικών εικόνων με μια παγχρωματική εικόνα πολύ υψηλής χωρικής ανάλυσης παρέχει τη δυνατότητα ακριβέστερης μελέτης και παρακολούθησης βλάστησης, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις που ενδιαφέρει η εξέλιξη κάθε φυτού χωριστά (π.χ. δεντροφυτεμένες περιοχές ή γεωργικές καλλιέργειες).

1.2 Κίνητρο και καινοτομία διατριβής

Στη βιβλιογραφία απαντούν διάφορες τεχνικές συγχώνευσης εικόνων. Όπως αναφέρθηκε στο υποκεφάλαιο 1.1, μέχρι στιγμής δεν έχει βρεθεί κάποια μέθοδος που να επιτυγχάνει πλήρη διατήρηση της χωρικής και φασματικής πληροφορίας των αρχικών εικόνων. Ανεξάρτητα από τη μέθοδο, κατά τη διαδικασία συγχώνευσης χάνεται μέρος αυτών πληροφοριών. Αυτό διαπιστώθηκε και κατά την εφαρμογή ορισμένων από τις πλέον διαδεδομένες μεθόδους συγχώνευσης (Κεφάλαιο 3) στις δορυφορικές εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της διατριβής.

Κίνητρο για την παρούσα διατριβή αποτέλεσε η επιθυμία δημιουργίας μεθόδου συγχώνευσης εικόνων που να επιτρέπει την εκμετάλλευση όλων των πληροφοριών που παρέχονται από τους τηλεπισκοπικούς αισθητήρες.

Ανεπτύχθησαν 14 νέες μέθοδοι συγχώνευσης εικόνας οι οποίες παρουσιάζονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 6. Η πρώτη μέθοδος (Fourier Domain Filtering Fusion– FDFF) που αναπτύχθηκε βασίζεται στην εφαρμογή φίλτρων διέλευσης υψηλών και χαμηλών συχνοτήτων στο φάσμα Fourier των εικόνων. Στη συνέχεια δημιουργήθηκαν και άλλες μέθοδοι που αποτελούν συνδυασμό της προαναφερθείσας με κάποιες από τις ήδη υπάρχουσες τεχνικές συγχώνευσης. Για κάθε μια από τις νέες μεθόδους που αναπτύχθηκαν αξιολογήθηκε η δυνατότητα διατήρησης της πληροφορίας που περιλαμβάνουν οι δυο εικόνες που συγχωνεύθηκαν. Επιπρόσθετα πραγματοποιήθηκε σύγκριση της αποδοτικότητας των νέων μεθόδων, ως προς τη διατήρηση της αρχικής χωρικής και φασματικής πληροφορίας, σε σχέση με κάποιες μεθόδους συγχώνευσης εικόνων που απαντούν ήδη στη βιβλιογραφία.

Η πρώτη μέθοδος (FDFF) που αναπτύχθηκε πέτυχε διατήρηση της χωρικής πληροφορίας που περιέχει η αρχική παγχρωματική εικόνα σε ποσοστό ίσο ή μεγαλύτερο του 99%. Καμία από τις διαδεδομένες στη βιβλιογραφία μεθόδους που εξετάστηκαν στη διατριβή δεν

παρουσίασε τόσο καλή διατήρηση της αρχικής χωρικής πληροφορίας. Επίσης, από τις νέες μεθόδους που αναπτύχθηκαν, αποτελεσματικές ήταν οι: FDFFπαγχρ-Á trous-PCA_Περ.Γ (περισσότερο από 96% διατήρηση της αρχικής χωρικής πληροφορίας), FDFFπαγχρ-Á trous (περισσότερο από 96% διατήρηση της αρχικής χωρικής πληροφορίας), και FDFF-Á trous-PCA_Περ.Γ (περισσότερο από 97% διατήρηση της αρχικής πληροφορίας). Συνεπώς οι προαναφερθείσες μέθοδοι είναι οι πλέον κατάλληλες όταν απαιτείται διατήρηση της χωρικής λεπτομέρειας των παγχρωματικών εικόνων.

Σχετικά με τη διατήρηση της φασματικής πληροφορίας που περιέχει η αρχική πολυφασματική εικόνα, οι νέες μέθοδοι δεν έχουν την υψηλότερη απόδοση, συγκριτικά με τις ήδη γνωστές. Μολαταύτα, συνδυάζοντας την υψηλή χωρική και την ικανοποιητική φασματική ποιότητα των συγχωνευμένων εικόνων που παρήχθησαν, οι προαναφερθείσες μέθοδοι δύναται να θεωρηθούν κατάλληλες για την ταυτόχρονη ποιοτική και χωρική διάκριση φυτών. Όπως αναφέρεται και στην Ενότητα 1.1, η «ποιοτική διάκριση» αφορά εις τον διαχωρισμό των φυτών ως προς τα στάδια ανάπτυξης (π.χ. στάδιο νεότητας ή ωριμότητας) και την κατάσταση της υγείας αυτών. Οι πολυφασματικές εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν δεν παρέχουν πληροφορίες ως προς το είδος των φυτών.

Επισημαίνεται ότι οι νέες μέθοδοι εφαρμόστηκαν σε εικόνες τύπου Quickbird που καλύπτουν κυρίως περιοχές με βλάστηση καθώς και καλλιεργημένα εδάφη. Δεν ερευνήθηκε η απόδοση τους σε εικόνες από άλλους δορυφόρους και για διαφορετικού τύπου περιοχές (π.χ. αστικό περιβάλλον). Η αξιολόγηση των νέων μεθόδων βασίστηκε και στη σύγκριση των αποτελεσμάτων αυτών με τις εικόνες που προέκυψαν από κάποιες από τις ήδη γνωστές στη βιβλιογραφία μεθόδους. Για όλες τις μεθόδους χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες αρχικές εικόνες. Συνεπώς, σε περιπτώσεις αντίστοιχες (ως προς τις περιοχές κάλυψης και τον τύπο των εικόνων) της παρούσας διατριβής οι νέες τεχνικές συγχώνευσης υπερτερούν των υπολοίπων που εφαρμόστηκαν, ως προς τη διαφοροποίηση των φυτών χωρικά ή ποιοτικά.

1.3 Σχέδιο ανάπτυξης διατριβής

Στην Ενότητα 1.1 παρουσιάστηκε ο σκοπός της διδακτορικής διατριβής. Το κίνητρο και η καινοτομία της διατριβής αναφέρονται στην Ενότητα 1.2.

Στο δεύτερο Κεφάλαιο παρουσιάζονται κάποιες βασικές έννοιες της Τηλεπισκόπησης και περιγράφεται η σχέση αυτής με τη βλάστηση. Γίνεται επίσης μια σύντομη εισαγωγή στο αντικείμενο της συγχώνευσης εικόνων.

Οι υπάρχουσες στη βιβλιογραφία μέθοδοι συγχώνευσης που εφαρμόστηκαν περιγράφονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3. Στα Κεφάλαια 4 και 5 παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο στο οποίο βασίζονται οι νέες μέθοδοι που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια της διατριβής. Οι νέες μέθοδοι περιγράφονται στο έκτο Κεφάλαιο. Πληροφορίες για τα δορυφορικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν και για τις περιοχές μελέτης δίδονται στο έβδομο Κεφάλαιο.

Οι στατιστικοί δείκτες αξιολόγησης και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη σύγκριση των νέων και των υπαρχόντων στη βιβλιογραφία μεθόδων συγχώνευσης, παρουσιάζονται και αξιολογούνται στο όγδοο Κεφάλαιο. Το ένατο Κεφάλαιο περιέχει τα συμπεράσματα της παρούσας διατριβής. Οι αρχικές και οι συγχωνευμένες εικόνες παρατίθενται στο πρώτο Παράρτημα. Στο δεύτερο Παράρτημα δίνονται, υπό μορφή πινάκων, τα αποτελέσματα των στατιστικών δεικτών που χρησιμοποιήθηκαν στο έβδομο Κεφάλαιο. Στο Παράρτημα ΙΙΙ παρουσιάζονται οι εικόνες του κανονικοποιημένου δείκτη βλάστησης (NDVI) που προέκυψαν για κάθε μέθοδο συγχώνευσης.

2 Θεωρητικό υπόβαθρο

Το παρόν κεφάλαιο διαχωρίζεται σε τέσσερις ενότητες. Η πρώτη Ενότητα παρουσιάζει κάποιες βασικές έννοιες της Τηλεπισκόπησης. Στη δεύτερη Ενότητα περιγράφεται η αλληλεπίδραση της βλάστησης με την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Η Ενότητα 2.3 αποτελεί μια εισαγωγή στο αντικείμενο της συγχώνευσης εικόνων. Συνοπτική περίληψη του Κεφαλαίου παρατίθεται στην Ενότητα 2.4.

2.1 Τηλεπισκόπηση

Η τηλεπισκόπηση ασχολείται με την απομακρυσμένη συλλογή και ερμηνεία πληροφοριών που αφορούν τα φυσικά και βιολογικά χαρακτηριστικά αντικειμένων ή περιοχών, χρησιμοποιώντας την εξ αυτών εκπεμπόμενη ή ανακλώμενη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Η συλλογή και καταγραφή της ακτινοβολίας που εκπέμπεται ή ανακλάται συλλέγεται και καταγράφεται υπό μορφή ψηφιακών εικόνων από τηλεπισκοπικούς αισθητήρες προσαρτημένους σε αεροσκάφη ή δορυφόρους.

Διαφορετικά υλικά ανακλούν την προσπίπτουσα σε αυτά ακτινοβολία με διαφορετικό και χαρακτηριστικό τρόπο, ως προς το ποσοστό της ανάκλασης και τα μήκη κύματος στα οποία παρατηρείται αυτή. Η διαφοροποίηση αυτή εξαρτάται κυρίως από τη χημική σύσταση και την κρυσταλλική δομή των υλικών.

Για κάθε αντικείμενο η κατανομή της καταγεγραμμένης εκπεμπόμενης ή ανακλώμενης ακτινοβολίας στα διάφορα μήκη κύματος περιγράφεται από μια καμπύλη. Η καμπύλη αυτή είναι μοναδική για κάθε αντικείμενο και αποτελεί τη φασματική ταυτότητα αυτού. Βάσει της φασματικής ταυτότητας ενός στόχου καθίσταται δυνατή η αναγνώριση και διάκριση αυτού από τα γειτονικά αντικείμενα.

Κάθε εικονοστοιχείο (pixel) των καταγεγραμμένων ψηφιακών εικόνων αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη περιοχή της επιφάνειας της γης, και εμφανίζει συγκεκριμένη τιμή ακτινοβολίας στην οποία αποδίδεται συγκεκριμένο χρώμα ή τόνος του γκρι. Η διάσταση της γήινης επιφάνειας που αντιστοιχεί σε ένα εικονοστοιχείο καθορίζει και τη χωρική διαχωριστική ικανότητα ή χωρική ανάλυση του αισθητήρα, δηλαδή τη δυνατότητα διάκρισης των αντικειμένων στον χώρο.

Οι τηλεπισκοπικοί αισθητήρες χαρακτηρίζονται επίσης και από τη φασματική ανάλυση τους, η οποία εξαρτάται από τα μήκη κύματος του φάσματος που καταγράφει κάθε αισθητήρας. Η πληροφορία που καταγράφεται από μια στενή περιοχή μηκών κύματος (φασματική ζώνη) συλλέγεται και αποθηκεύεται σε ένα φασματικό κανάλι. Όσο αυξάνεται η φασματική ανάλυση, τόσο μειώνεται ο αριθμός των μηκών κύματος που καταγράφει το κάθε φασματικό κανάλι του αισθητήρα, γεγονός που συνεπάγεται ακριβέστερη απόδοση της φασματική καμπύλης ενός υλικού. Ψηφιακή απεικόνιση της φασματικής πληροφορίας που περιλαμβάνουν τα κανάλια μπορεί να πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας συνδυασμούς τριών καναλιών, σε κάθε ένα από τα οποία αποδίδεται ένα από τα τρία βασικά χρώματα (ερυθρό, πράσινο, ιώδες).

Ανάλογα με εύρος της ζώνης, οι αισθητήρες διακρίνονται σε υπερφασματικούς και πολυφασματικούς. Οι υπερφασματικοί (π.χ. Hyperion) καταγράφουν από 32 έως και περισσότερες από 256 φασματικές ζώνες και καλύπτουν το ορατό και υπέρυθρο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (Μερτίκας, 1999). Οι πολυφασματικοί αισθητήρες συνήθως δεν υπερβαίνουν τις επτά ζώνες καταγραφής (π.χ. δορυφόρος LANDSAT 7). Βάσει των μηκών κύματος, οι φασματικές ζώνες της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που ανιχνεύονται από τα υπερφασματικά και πολυφασματικά καταγραφικά συστήματα είναι:

- 0,38μm 0,72μm: Ορατό φάσμα,
- 0,72μm 3μm: Εγγύς και Μέσο υπέρυθρο φάσμα.

Πρέπει να σημειωθεί ότι τα όρια του διαχωρισμού σε φασματικές ζώνες είναι σχετικά αυθαίρετα, καθότι στην πραγματικότητα η μετάβαση από τη μια ζώνη στην άλλη είναι βαθμιαία.

2.2 Τηλεπισκόπηση και βλάστηση

Η χρήση της τηλεπισκόπησης σε εφαρμογές που σχετίζονται με παρακολούθηση βλάστησης στηρίζονται στη δυνατότητα των τηλεπισκοπικών αισθητήρων να καταγράφουν την ανάκλαση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που προσπίπτει στη γήινη επιφάνεια.

Η συσχέτιση της φαινολογικής κατάστασης και βιοχημικής σύστασης των φυτών με τη φασματική τους απόκριση στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία μελετήθηκε από αρκετούς επιστήμονες, όπως οι Davids & Tyler, 2003, Schmidt & Skidmore, 2003, Kokaly *et al.*, 2003, Sims & Gamon, 2002 και Rogan *et al.*, 2002. Η συσχέτιση αυτή βασίζεται στην ιδιότητα της βλάστησης να χρησιμοποιεί τμήμα του φάσματος της ηλιακής ενέργειας για την ανάπτυξη της, ενώ το υπόλοιπο ανακλάται και επιστρέφει στην ατμόσφαιρα.

Όλα τα είδη βλάστησης περιέχουν κοινά βιοφυσικά και βιοχημικά χαρακτηριστικά, όπως η δομή του φύλλου, οι περιεχόμενες στο φύλλο χρωστικές ουσίες, η περιεκτικότητα σε διάφορα χημικά στοιχεία και η περιεχόμενη στους ιστούς των φύλλων υγρασία (Συλλαίος,1990, Kokaly *et al.*, 2003, NASA, 2007). Αυτά τα χαρακτηριστικά διαφοροποιούνται ανάλογα με το είδος, την ανάπτυξη και την υγεία των φυτών. Το

φαινόμενο αυτό επηρεάζει το ποσοστό ανάκλασης της ηλιακής ακτινοβολίας σε κάθε περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (NASA, 2007, Siegal & Gillespie, 1980). Οι διαφορετικές φασματικές συμπεριφορές των φυτών καταγράφονται από τους τηλεπισκοπικούς ανιχνευτές, καθιστώντας έτσι δυνατή την αναγνώριση των διαφόρων ειδών βλάστησης και τον εντοπισμό ασθενειών ακόμα και σε πρώιμα στάδια, πριν γίνουν αντιληπτές από την ανθρώπινη όραση (Συλλαίος,1990).

Η βλάστηση παρουσιάζει έντονα φαινόμενα απορρόφησης της ηλιακής ενέργειας στο ιώδες και ερυθρό τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (0,4-0,5 μm και 0,6-0,7 μm αντίστοιχα) και ανάκλαση στα υπόλοιπα μήκη κύματος (Εικόνα 1). Τα φαινόμενα ανάκλασης, απορρόφησης και εκπομπής ηλιακής ενέργειας από τα φύλλα, σε διαφορετικές ζώνες τις ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, και οι παράγοντες που σχετίζονται με αυτά παρατίθενται παρακάτω (Συλλαίος, 1990):

- Από 0,4μm 0,7μm: απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας στο ερυθρό και ιώδες τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (Εικόνα 1). Αυτό το φαινόμενο οφείλεται στις χρωστικές ουσίες των φύλλων και κυρίως στη χλωροφύλλη, στα εξωτερικά τμήματα της εσωτερικής δομής των φύλλων (Εικόνα 2), (Συλλαίος,1990, NASA, 2007), που απορροφά σημαντικό ποσοστό ενέργειας, γεγονός που αποτελεί ένδειξη καλής υγείας των φυτών (NASA, 2007, Kokally & Clark, 1999).
- Από 0,7μm 1,35μm: στο εγγύς υπέρυθρο παρατηρείται απότομη αύξηση του ποσοστού της ηλιακής ακτινοβολίας που ανακλάται, στο διάστημα 0,7μm – 0,8μm, το οποίο εν συνεχεία παραμένει σχεδόν σταθερό μέχρι τα 1,3μm (Συλλαίος,1990, NASA, 2007) (Εικόνα 1). Η αυξημένη ανάκλαση αποδίδεται στις πολλαπλές εσωτερικές ανακλάσεις από τις επιφάνειες μεταξύ ενυδατωμένων τοιχωμάτων των κυττάρων και του ενδοκυτταρικού αέρα των σπογγωδών ιστών του μεσόφυλλου (Συλλαίος, 1990) (Εικόνα 2). Η ανάκλαση της βλάστησης στο εγγύς υπέρυθρο είναι υψηλότερη από αυτή που παρουσιάζουν τα περισσότερα ανόργανα υλικά με αποτέλεσμα η βλάστηση να εμφανίζεται ανοιχτόχρωμη στα εν λόγω μήκη κύματος (Συλλαίος, 1990). Σε περίπτωση ασθένειας του φυτού, όπου η εσωτερική δομή του κυττάρου (Εικόνα 2) καταρρέει, ή όταν το φυτό φτάσει στο τελευταίο στάδιο ωριμότητας του, όταν οι μεσοκυττάριοι χώροι και κατ' επέκταση το φύλλο συρρικνώνονται, το ποσοστό της ανακλώμενης ακτινοβολίας μειώνεται (Συλλαίος,1990). Σε αυτή την περίπτωση τα χρώματα που απεικονίζουν τη βλάστηση στις πολυφασματικές εικόνες γίνονται σκουρότερα, και η κατάσταση του φυτού δύναται να γίνει αντιληπτή μέρες πριν από την ορατή αλλαγή στο πράσινο χρώμα των φύλλων (Συλλαίος,1990). Στις ψευδοχρωματικές εικόνες, στις οποίες το ερυθρό χρώμα αποδίδεται στο φασματικό κανάλι του εγγύς υπέρυθρου, η βλάστηση εμφανίζεται

κόκκινη. Παρουσία ασθενειών ή όταν η βλάστηση βρίσκεται στο τελικό στάδιο ανάπτυξης το κόκκινο χρώμα γίνεται πιο σκοτεινό.

Από 1,35μm – 2,3μm: σε αυτά τα μήκη κύματος η συμπεριφορά της βλάστησης επηρεάζεται ιδιαίτερα από το περιεχόμενο στους ιστούς των φύλλων νερό (Συλλαίος,1990, NASA, 2007). Στα 1,45μm και 1,95μm το ποσοστό της ανακλώμενης ηλιακής ακτινοβολίας μειώνεται με την αύξηση του νερού στους ιστούς των φύλλων (Εικόνα 1), γεγονός που αποδίδεται στην υψηλή απορρόφηση της ακτινοβολίας, στα συγκεκριμένα μήκη κύματος, από το νερό (Συλλαίος,1990, NASA, 2007).



Εικόνα 1: Δομή φύλλου ενός πλατύφυλλου φωτόφιλου δασοπονικού είδους και τα φασματικά του χαρακτηριστικά. Η χλωροφύλλη ανακλά την ακτινοβολία στο πράσινο τμήμα του ορατού φάσματος και την απορροφά στο ιώδες και ερυθρό τμήμα αυτού. Η υπέρυθρη ακτινοβολία δεν επηρεάζεται από την χλωροφύλλη, ανακλάται όμως από τα τοιχώματα των κυττάρων (Καρτέρης, 1990).



Εικόνα 2: Παράδειγμα φασματικής καμπύλης δυόσμου (USGS Spectral Library, από ENVI 4.1®). Στον άνω οριζόντιο άξονα αναγράφονται οι βασικοί παράγοντες που ελέγχουν την ανάκλαση των φύλλων στα επιμέρους φάσματα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, όπως αυτά διακρίνονται στον κάτω οριζόντιο άξονα.

Η συμπεριφορά της βλάστησης στα διάφορα μήκη κύματος καθορίζει τις φασματικές καμπύλες των φυτών (Εικόνα 1), που διαφοροποιούνται ανάλογα με το είδος, την ανάπτυξη και την υγεία αυτών. Η αναγνώριση και μελέτη των φυτών καθίσταται δυνατή με τη χρήση αυτών των φασματικών καμπυλών. Τα πολυφασματικά συστήματα καταγραφής επιτρέπουν την παρακολούθηση του κύκλου ανάπτυξης και της υγείας των φυτών. Οι υπερφασματικοί αισθητήρες παρέχουν περισσότερο λεπτομερείς φασματικές καμπύλες, καθιστώντας εφικτή ακόμα και την αναγνώριση των βιοχημικών και βιοφυσικών χαρακτηριστικών της βλάστησης.

Το μειονέκτημα των ψηφιακών εικόνων που καταγράφονται από κάθε κανάλι των πολυφασματικών και υπερφασματικών αισθητήρων είναι η χαμηλή χωρική ανάλυση. Τα πολυφασματικά συστήματα καταγράφουν, για την ίδια περιοχή, μία παγχρωματική εικόνα χαμηλής φασματικής ανάλυσης, καθότι καλύπτει μεγάλο εύρος μηκών κύματος. Ανάλογα με τον δορυφορικό αισθητήρα, στην παγχρωματική εικόνα καταγράφεται μόνο το ορατό (π.χ. δορυφόρος SPOT) ή αμφότερα τα φάσματα του ορατού και εγγύς υπέρυθρου (π.χ. δορυφόροι IKONOS και Quickbird). Το πλεονέκτημα των παγχρωματικών εικόνων είναι η υψηλή χωρική ανάλυση.

Ο συνδυασμός των πολυφασματικών ή υπερφασματικών εικόνων με μια παγχρωματική εικόνα πολύ υψηλής χωρικής ανάλυσης αποτελεί την ιδανική λύση για μελέτη και παρακολούθηση βλάστησης, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις που ενδιαφέρει η εξέλιξη κάθε φυτού χωριστά (π.χ. δεντροφυτεμένες περιοχές ή γεωργικές καλλιέργειες). Η παρούσα διατριβή στοχεύει στην ανάπτυξη νέας μεθόδου συνδυασμού των προαναφερθέντων εικόνων, προκειμένου να καταστεί αποτελεσματικότερη η μελέτη μεμονωμένων φυτών.

2.3 Συγχώνευση εικόνων

Η συγχώνευση εικόνων αφορά εις το συνδυασμό εικόνων, με διαφορετικά και συμπληρωματικά χαρακτηριστικά, για τη δημιουργία μιας νέας εικόνας που περιλαμβάνει όσο το δυνατό περισσότερα από τα χαρακτηριστικά και τις πληροφορίες των αρχικών δεδομένων. Η πληροφορία που εξάγεται από την τελική εικόνα είναι σαφώς βελτιωμένη και η ερμηνεία αυτής αρκετά πιο εύκολη, σε σύγκριση με την ερμηνεία των μεμονωμένων αρχικών εικόνων.

Σε αρκετές εφαρμογές της Τηλεπισκόπησης (π.χ. παρακολούθηση και καταγραφή βλάστησης, γεωλογία, ανίχνευση ορυκτών πόρων) παρατηρείται η ανάγκη εικόνων που παρέχουν ταυτόχρονα την υψηλή χωρική ανάλυση των παγχρωματικών και την υψηλή φασματική ανάλυση των πολυφασματικών ή υπερφασματικών εικόνων. Σε εμπορικό τουλάχιστον επίπεδο, δεν υπάρχουν αισθητήρες που να καταγράφουν τέτοιου τύπου εικόνες. Η συγχώνευση εικόνων αποτελεί, μέχρι σήμερα, την καλύτερη λύση σε αυτό το πρόβλημα, καθότι επιτυγχάνεται συνδυασμός της υψηλής χωρικής και φασματικής πληροφορίας, που περιλαμβάνεται στις παγχρωματικές και πολυφασματικές ή υπερφασματικές εικόνες αντίστοιχα, σε μία μοναδική εικόνα.

Η συγχώνευση εικόνων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το συνδυασμό ποικίλων δεδομένων από την ίδια περιοχή (Pohl and Van Genderen, 1998), όπως:

- Εικόνες προερχόμενες από τον ίδιο τηλεπισκοπικό αισθητήρα αλλά σε διαφορετικές χρονολογίες,
- Εικόνες προερχόμενες από αισθητήρες διαφορετικής φασματικής και χωρικής ανάλυσης,
- Εικόνες προερχόμενες από διαφορετικούς αισθητήρες και σε διαφορετικές χρονολογίες,
- Εικόνες προερχόμενες από διαφορετικούς αισθητήρες με διαφορετική φασματική και χωρική ανάλυση,
- Δορυφορικές εικόνες και συμπληρωματικές πληροφορίες προερχόμενες, επί παραδείγματι, από γεωλογικούς, υδρολογικούς, τοπογραφικούς ή θεματικούς χάρτες.

Η θεωρία της συγχώνευσης εικόνων αποτέλεσε, από τα μέσα της δεκαετίας του 1980, και συνεχίζει να αποτελεί αντικείμενο μελέτης για διάφορους ερευνητές (Li *et al.*, 1995, Schowengerdt, 1997, Pohl & Van Genderen, 1998, Carter, 1998, Nunez *et al.*, 1999, Pohl, 1999, Bretschneider & Kao, 2000, Epinat *et al.*, 2001, Gomez *et al.*, 2001, King & Wang,

2001, Petrovic, 2001, Sanjeevi *et al.* 2001, Tu *et al.*, 2001, Canga, 2002, Chibani & Houacine, 2002, Hill *et al.*, 2002, Li *et al.*, 2002, Ventura & Fonseca, 2002, Wald, 2002, Zhang, 2002, Afary & Emamy, 2003, Chen *et al.*, 2003, Francis *et al.*, 2003, Marcelino *et al.*, 2003, Piella, 2003, Samadzadegan, 2003, Zhou *et al.*, 2003, Gonzalo & Lillo-Saavedra, 2004, Gonzalez-Audicana *et al.*, 2004, Gungor & Shan, 2004, Lewis *et al.*, 2004, Pajares & Cruz, 2004, Qing *et al.*, 2004, Tu *et al.*, 2004, Vijayaraj, 2004, Gonzalez-Audicana *et al.*, 2005, Otazu & Pujol 2006, Ling *et al.*, 2007, Hak *et al.*, 2007, Stathaki, 2008).

Συγχώνευση εικόνων μπορεί να πραγματοποιηθεί σε τρία διαφορετικά επίπεδα (Pohl and Van Genderen, 1998):

- Επίπεδο εικονοστοιχείου, όπου το εικονοστοιχείο της μιας εικόνας συγχωνεύεται με το αντίστοιχο εικονοστοιχείο της δεύτερης εικόνας. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι οι δύο εικόνες να έχουν ίδιες διαστάσεις εικονοστοιχείων (Ghassemian, 2003).
- Επίπεδο χωρικών γνωρισμάτων που περιλαμβάνονται στις εικόνες, όπως κτήρια, γεωλογικές γραμμώσεις, ποτάμια, κ.ά. Σκοπός είναι η εξαγωγή και ο συνδυασμός παρόμοιων αντικειμένων που εμφανίζονται στα διαθέσιμα δεδομένα.
- Επίπεδο αποφάσεων. Κυρίως χρησιμοποιείται για βελτίωση της ακρίβειας στην ταξινόμηση των ψηφιακών εικόνων, συνδυάζοντας ήδη ταξινομημένες εικόνες οι οποίες όμως έχουν διαφορετική προέλευση.

Κάποιες από τις περισσότερο διαδεδομένες στη βιβλιογραφία τεχνικές συγχώνευσης είναι:

- Μετασχηματισμός "Ενταση–Απόχρωση–Κορεσμός" Intensity-Hue–Saturation Transform (Carter, 1998, Pohl, 1999, Pohl & Van Genderen, 1998, Bretschneider & Kao, 2000, Sanjeevi *et al.*, 2001, Chibani & Houacine, 2002, Li *et al.*, 2002, Wald, 2002, Zhang, 2002, Chen *et al.*, 2003, Francis *et al.*, 2003, Samadzadegan, 2003, Zhou *et al.*, 2003, Gonzalez-Audicana *et al.*, 2004, Tu *et al.*, 2004, Vijayaraj, 2004, Ling *et al.*, 2007, Hak *et al.*, 2007).
- Ανάλυση Κυριών Συνιστωσών Principal Component Analysis (Schowengerdt, 1997, Carter, 1998, Pohl, 1999, Pohl & Van Genderen, 1998, Bretschneider & Kao, 2000, Sanjeevi *et al.*, 2001, Li *et al.*, 2002, Wald, 2002, Zhang, 2002, Francis *et al.*, 2003, Samadzadegan, 2003, Zhou *et al.*, 2003, Gonzalez-Audicana *et al.*, 2004, Vijayaraj, 2004).
- Μετασχηματισμός Κυματιδίων Wavelet Transform fusion (Li *et al.*, 1995, Pohl & Van Genderen, 1998, Nunez *et al.*, 1999, Pohl, 1999, Bretschneider & Kao, 2000, Epinat *et al.*, 2001, Gomez *et al.*, 2001, King & Wang, 2001, Petrovic, 2001, Sanjeevi *et al.*, 2001, Canga, 2002, De Audicana *et al.*, 2002, Hill *et al.*, 2002, Li *et al.*, 2002, Ventura &

Fonseca, 2002, Wald, 2002, Zhang, 2002, Afary & Emamy, 2003, Du *et al.*, 2003, Marcelino *et al.*, 2003, Piella, 2003, Samadzadegan, 2003, Zhou *et al.*, 2003, Gonzalo & Lillo-Saavedra, 2004, Gungor & Shan, 2004, Hong & Zhang, 2004, Lewis *et al.*, 2004, Pajares & Cruz, 2004, Qing *et al.*, 2004, Vijayaraj, 2004, Gonzalez-Audicana *et al.*, 2005, Otazu *et al.* 2005, Stathaki, 2008).

- Μετασχηματισμός «À trous» (Chibani & Houacine, 2002, Wald, 2002, Gonzalo & Lillo-Saavedra, 2004, Gonzalez-Audicana *et al.*, 2005, Otazu *et al.* 2005, Stathaki, 2008)
- Συνδυασμοί μετασχηματισμών (Nunez et al., 1999, Gonzalez-Audicana et al., 2005):
 - Συνδυασμός μετασχηματισμών Mallat και IHS,
 - Συνδυασμός μετασχηματισμών Mallat και PCA,
 - Συνδυασμός μετασχηματισμών «À trous» και IHS,
 - Συνδυασμός μετασχηματισμών «À trous» και PCA.

Στην παρούσα διατριβή αναπτύχθηκαν 14 νέες μέθοδοι συγχώνευσης εικόνων, οι οποίες βασίζονται στο φιλτράρισμα των μετασχηματισμών Fourier των αρχικών εικόνων. Τις αρχικές, προς συγχώνευση, εικόνες αποτελούν μια πολυφασματική και μια παγχρωματική εικόνα από το δορυφόρο Quickbird. Η συγχώνευση πραγματοποιήθηκε σε επίπεδο εικονοστοιχείου.

2.4 Περίληψη κεφαλαίου

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάστηκαν περιληπτικά κάποιες από τις βασικές έννοιες της Τηλεπισκόπησης, καθώς και η εφαρμογή της στην παρακολούθηση και μελέτη της βλάστησης. Παρατέθηκε επίσης μια εισαγωγή στο αντικείμενο της συγχώνευσης εικόνων. Εκτενής περιγραφή των τεχνικών συγχώνευσης εικόνων που αναφέρονται στην Ενότητα 2.3 γίνεται στο Κεφάλαιο 3. Οι νέες μέθοδοι συγχώνευσης εικόνων που αναπτύχθηκαν στη διατριβή αναλύονται στο Κεφάλαιο 6.

3 Μέθοδοι συγχώνευσης εικόνων

Στο παρόν κεφάλαιο παρατίθενται ορισμένες από τις περισσότερο διαδεδομένες μεθόδους συγχώνευσης εικόνων. Η υλοποίηση και εφαρμογή αυτών στις διαθέσιμες δορυφορικές εικόνες πραγματοποιήθηκε με χρήση του λογισμικού MATLAB® 6.5 v.13.

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2, η διατριβή εστιάζει στη συγχώνευση εικόνων σε επίπεδο εικονοστοιχείου. Συνεπώς προϋπόθεση για τη σωστή εφαρμογή των μεθόδων που συγχώνευσης είναι η παγχρωματική και πολυφασματική εικόνα να έχουν ίδιες διαστάσεις εικονοστοιχείου. Αυτό πραγματοποιήθηκε με ήθηκε επανάληψη δειγματοληψίας (resampling) των εικονοστοιχείων της αρχικής πολυφασματικής εικόνας με τη μέθοδο της διγραμμικής παρεμβολής.

Οι εικόνες που προέκυψαν παρατίθενται στο Παράρτημα Ι. Οι μέθοδοι αυτές αξιολογήθηκαν οπτικά καθώς και με χρήση των στατιστικών εκτιμητών που αναφέρονται στο όγδοο Κεφάλαιο. Τα συγκριτικά αποτελέσματα παρουσιάζονται επίσης στο Κεφάλαιο 8.

3.1 Χρωματικός Μετασχηματισμός «Ένταση – Απόχρωση – Κορεσμός»

Με το μοντέλο RGB (Red, Green, Blue) περιγράφεται η χρωματική ένταση κάθε εικονοστοιχείου χρησιμοποιώντας τρία πρωτεύοντα αθροιστικά χρώματα ή χρωματικά κανάλια. Οποιοδήποτε χρώμα συντίθεται αναμειγνύοντας όχι περισσότερα από τρία άλλα χρώματα. Η τριάδα των χρωμάτων που μπορούν να χρησιμοποιηθεί δεν είναι μοναδική. Βασικός κανόνας είναι κάθε ένα από αυτά τα χρώματα δεν πρέπει να έχει παραχθεί από τα υπόλοιπα δύο. Τα βασικά χρώματα που χρησιμοποιούνται είναι το ερυθρό, το πράσινο και το ιώδες.



Εικόνα 3: Το RGB χρωματικό μοντέλο.
Παρόμοια με το RGB (Red, Green, Blue) σύστημα απόδοσης μιας έγχρωμης εικόνας, το IHS αποτελεί μια ακόμα μορφή χρωματικού συστήματος. Η διαφορά μεταξύ των δυο αυτών συστημάτων μπορεί να γίνει αντιληπτή παρατηρώντας τα σχήματα των εικόνων (Εικόνες 3 και 4). Το σύστημα RGB απεικονίζεται ως κύβος, του οποίου οι άξονες x, y και z αντιστοιχούν στα τρία πρωτεύοντα αθροιστικά χρώματα, πράσινο, ιώδες και ερυθρό, αντίστοιχα (Εικόνα 3).

Το σύστημα IHS (Εικόνα 4) αναπαρίσταται από ένα κώνο, του οποίου ο κατακόρυφος άξονας αντιστοιχεί στην ένταση (Intensity - I) ενός χρώματος και, για 8-bit κβαντοποίηση φωτεινότητας, παίρνει τιμές από 0 (μαύρο) έως 255 (λευκό), (Chen *et al.*, 2003). Η περιφέρεια του κώνου αντιστοιχεί στην απόχρωση (Hue - H) ενός χρώματος, δηλαδή στο μήκος κύματος που συνεισφέρει σ' ένα χρώμα και η τιμή του αυξάνει από το 0, διαμέσου του πράσινου και του μπλε στο 255 που βρίσκεται δίπλα στο 0) (Chen *et al.*, 2003). Ο κορεσμός (Saturation - S) ορίζει την καθαρότητα ενός χρώματος ως προς το γκρι (Carter, 1998) και οι τιμές του κυμαίνονται από 0, στο κέντρο της σφαίρας, μέχρι 255, στην περιφέρεια αυτής.



Εικόνα 4: Το χρωματικό σύστημα. «Ένταση – Απόχρωση – Κορεσμός» (IHS).

Η μέθοδος συγχώνευσης «Ένταση – Απόχρωση – Κορεσμός» (Intensity – Hue – Saturation Transform– IHS) βασίζεται στην αρχή του μετασχηματισμού τριών φασματικών καναλιών της αρχικής, χαμηλής χωρικής ανάλυσης εικόνας από το RGB στο IHS χρωματικό πεδίο (Carter, 1998, Zhou *et al.*, 1998, Pohl & Van Genderen, 1998, Pohl, 1999, Bretschneider & Kao, 2000, Sanjeevi *et al.*, 2001, Chibani & Houacine, 2002, Zhang, 2002, Li *et al.*, 2002, Wald, 2002, Chen *et al.*, 2003, Samadzadegan, 2003, Francis *et al.*, 2003,

Zhou et al., 2003, Marcelino et al., 2003, Zhou et al., 2004, Vijayaraj, 2004, Della Rocca et al., 2005 Gonzalez-Audicana et al., 2006, Stathaki, 2008).

Μαθηματικά, ο μετασχηματισμός δίνεται από τις εξ. (3.1α) και (3.1β) (Pohl & van Genderen, 1998, Wald 2002), όπου τα v_1 , v_2 και I αντιπροσωπεύουν τις x, y και z, αντίστοιχα, πολικές συντεταγμένες του IHS συστήματος.

$$\begin{pmatrix} I \\ v_1 \\ v_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{6}} & -\frac{2}{\sqrt{6}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}$$
(a)
$$H = \tan^{-1} \left(\frac{v_2}{v_1} \right), \quad S = \sqrt{v_1^2 + v_2^2} \quad (\beta)$$

Η συνιστώσα της έντασης, (I) που είναι το άθροισμα των τριών καναλιών της πολυφασματικής εικόνας, περιγράφει την ολική φωτεινότητα της πολυφασματικής εικόνας αυτής και παρουσιάζει έντονη ομοιότητα με την παγχρωματική εικόνα (Bretschneider & Kao, 2000). Η απόχρωση (H) και ο κορεσμός (S) σχετίζονται με τη φασματική πληροφορία ενώ η ένταση με τη χωρική πληροφορία της πολυφασματικής εικόνας (Samadzadegan, 2003). Μετά το μετασχηματισμό πραγματοποιείται ταίριασμα του ιστογράμματος της παγχρωματικής εικόνας με το ιστόγραμμα της έντασης. Το ταίριασμα ιστογράμματος γίνεται ώστε η παγχρωματική εικόνα να αποκτήσει περίπου την ίδια διασπορά και μέση τιμή με την εικόνα της έντασης (Chen et al., 2003). Η διαδικασία της συγχώνευσης συνεχίζεται με αντικατάσταση της έντασης I από την παγχρωματική εικόνα που προέκυψε από το προαναφερθέν ταίριασμα ιστογράμματος. Με τον αντίστροφο μετασχηματισμό IHS η παγχρωματική εικόνα συγχωνεύεται με τις συνιστώσες της απόχρωσης και του κορεσμού και η τελική εικόνα επαναφέρεται στο αρχικό πεδίο χρωμάτων (RGB).

Ο αντίστροφος μετασχηματισμός δίδεται από την εξίσωση:

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{6}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{2}{\sqrt{6}} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I \\ v_1 \\ v_2 \end{pmatrix},$$
(3.2)

Σχεδιάγραμμα της συγχώνευσης εικόνων με το μετασχηματισμό IHS παρατίθεται στην Εικόνα 5.



Εικόνα 5: Σχηματικό διάγραμμα της συγχώνευσης εικόνων με το μετασχηματισμό IHS (*R*: ερυθρό ή εγγύς υπέρυθρο κανάλι, *G*: πράσινο κανάλι, *B*: ιώδες κανάλι, *R*': συγχωνευμένο ερυθρό η εγγύς υπέρυθρο κανάλι, *G*': συγχωνευμένο πράσινο κανάλι, *B*': συγχωνευμένο ιώδες κανάλι, *ΠΓ*: η παγχρωματική εικόνα που προέκυψε μετά το ταίριασμα του ιστογράμματος της αρχικής παγχρωματικής στο ιστόγραμμα της Έντασης).

Στην περίπτωση των δορυφορικών εικόνων Quickbird, η εικόνα της έντασης που προκύπτει από το μετασχηματισμό IHS των τριών καναλιών του ορατού φάσματος δεν περιέχει, σε αντίθεση με την παγχρωματική, στοιχεία από το εγγύς υπέρυθρο. Στο ορατό φάσμα η βλάστηση φαίνεται σκουρόχρωμη, εξαιτίας της χαμηλής ανάκλασης, ενώ στο εγγύς υπέρυθρο, που η ανάκλαση είναι υψηλή, εμφανίζεται αρκετά ανοιχτόχρωμη. Κατά συνέπεια, στο παγχρωματικό κανάλι η βλάστηση εμφανίζεται, συγκριτικά με την εικόνα της έντασης, περισσότερο ανοιχτόχρωμη. Κατ' επέκταση, αντικατάσταση της έντασης με την παγχρωματική εικόνα ενδέχεται να προκαλέσει σφάλματα και αλλοίωση των χρωμάτων στη συγχωνευμένη εικόνα. Σύμφωνα με την εταιρεία Digital Globe®¹ (εταιρία κατασκευής του δορυφόρου Quickbird) το πρόβλημα δύναται να λυθεί τροποποιώντας την αρχική παγχρωματική εικόνα. Η τροποποίηση αυτή αφορά εις την αφαίρεση της συμβολής του εγγύς υπερύθρου στο παγχρωματικό κανάλι χρησιμοποιώντας την σχέση:

$$Vispan = pan-0,24*nir, \tag{3.3}$$

όπου Vispan το τροποποιημένο παγχρωματικό κανάλι, pan το αρχικό παγχρωματικό και nir το εγγύς υπέρυθρο.

¹ Εταιρία κατασκευής του δορυφόρου Quickbird.

Στην παρούσα διατριβή, στις περιπτώσεις συγχώνευσης του παγχρωματικού και των τριών καναλιών του ορατού φάσματος με τη μέθοδο IHS ή τους συνδυασμούς αυτής με άλλες μεθόδους χρησιμοποιήθηκε το τροποποιημένο παγχρωματικό κανάλι (Vispan).

Όπως και στις υπόλοιπες μεθόδους που βασίζονται στο μετασχηματισμό IHS, μόνο τα τρία φασματικά κανάλια που σχηματίζουν την εικόνα RGB μπορούν να συγχωνευθούν. Αυτό αποτελεί μειονέκτημα στις περιπτώσεις όπου τα κανάλια της πολυφασματικής εικόνας είναι περισσότερα από τρία, όπως στην περίπτωση του δορυφόρου Quickbird (ιώδες, πράσινο, ερυθρό και εγγύς υπέρυθρο). Συνεπώς, προκειμένου να καταστεί εφικτή η σύγκριση των μεθόδων που βασίζονται στο μετασχηματισμό IHS με τις υπόλοιπες, όλοι οι αλγόριθμοι συγχώνευσης εφαρμόστηκαν σε τρεις διαφορετικούς συνδυασμούς φασματικών καναλιών:

- Ερυθρό Πράσινο Ιώδες (Ε.Π.Ι),
- Εγγύς υπέρυθρο Πράσινο Ιώδες (ΕΥ.Π.Ι),
- Πράσινο Ερυθρό Εγγύς υπέρυθρο (Π.Ε.ΕΥ).

Οι εικόνες που προέκυψαν από τη συγχώνευση της πολυφασματικής με την παγχρωματική εικόνα παρατίθενται στο Παράρτημα Ι. Παρόλο που στην περίπτωση του συνδυασμού Ε.Π.Ι χρησιμοποιήθηκε το Vispan κανάλι, η αλλοίωση των χρωμάτων, σε σύγκριση με την αρχική πολυφασματική εικόνα, παραμένει εμφανής. Σε επίπεδο χωρικής ποιότητας των τελικών εικόνων, ανεξάρτητα από τον συνδυασμό των φασματικών καναλιών στον οποίο εφαρμόστηκε ο μετασχηματισμός IHS, παρατηρείται αρκετά καλή διατήρηση της αρχικής χωρικής πληροφορίας.

3.2 Μετασχηματισμός Ανάλυσης Κυρίων Συνιστωσών

Η ανάλυση κυρίων συνιστωσών (Principal Components Analysis - PCA) αποτελεί μια στατιστική τεχνική που μετασχηματίζει ένα σύνολο μεταβλητών (π.χ. φασματικά κανάλια) σ' ένα νέο σύνολο που μεταβλητών που είναι γραμμικά συσχετισμένες με τις αρχικές, αλλά ασυσχέτιστες μεταξύ τους (Pohl and van Genderen, 1998, Μερτίκας, 1999).

Η μετατροπή των τριών φασματικών καναλιών (R,G,B) σε τρεις κύριες συνιστώσες (PC1, PC2, PC3) βασίζεται στην εξίσωση (Meenakshisundaram, 2005):

$$\begin{bmatrix} PC1\\ PC2\\ PC3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{21} & e_{31}\\ e_{12} & e_{22} & e_{32}\\ e_{13} & e_{23} & e_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R\\ G\\ B \end{bmatrix},$$
(3.4)

όπου ο πίνακας με τα ιδιοδιανύσματα e_{i,j} αποτελεί ένα πίνακα στροφής που μετασχηματίζει τα αρχικά φασματικά κανάλια στις κύριες συνιστώσες (το i αφορά τα φασματικά κανάλια και το *j* τις κύριες συνιστώσες).

Στην παρούσα διατριβή υλοποιήθηκαν και δυο παραλλαγές (PCA Περ.Β και ΡCΑ Περ.Γ) της παραδοσιακής μεθόδου (PCA Περ.Α) συγχώνευσης εικόνων με την ανάλυση κυρίων συνιστωσών. Όπως αναφέρεται παρακάτω, η κλασσική μέθοδος βασίζεται στην αντικατάσταση της πρώτης κύριας συνιστώσας ($1\eta K.\Sigma$) από την παγχρωματική εικόνα. Η 1η Κ.Σ. αντιστοιχεί στις μέσες τιμές των τιμών φωτεινότητας όλων των καναλιών που χρησιμοποιούνται για τον μετασχηματισμό κυρίων συνιστωσών και δεν περιέχει συγκεκριμένη φασματική πληροφορία (Βασιλοπούλου, 2002). Σύμφωνα με τον Carter (1998) η φασματική πληροφορία συγκεντρώνεται κυρίως στη δεύτερη και τρίτη κύρια συνιστώσα, καθώς η 1η Κ.Σ. συγκεντρώνει κυρίως την κοινή χωρική πληροφορία, για όλα τα κανάλια που χρησιμοποιούνται στο μετασχηματισμό. Ωστόσο πρόκειται για τη συνιστώσα που περιέχει το υψηλότερο ποσοστό πληροφορίας της αρχικής εικόνας. Αντικατάσταση αυτής συνεπάγεται απώλεια μέρους της πληροφορίας της πολυφασματικής εικόνας στην οποία εφαρμόζεται η ανάλυση κυρίων συνιστωσών. Στοχεύοντας στη διατήρηση αυτής της πληροφορίας, οι προτεινόμενες παραλλαγές διαφοροποιούνται από την PCA Περ.Α ως προς τον τρόπο εισαγωγής της χωρικής λεπτομέρειας στην αρχική πολυφασματική εικόνα.

3.2.1 ΡCA_**Π**ερ.**A**

Η διαδικασία συγχώνευσης της παγχρωματικής με την πολυφασματική εικόνα είναι παρόμοια με τη διαδικασία της μεθόδου συγχώνευσης IHS (Samadzadegan, 2003). Αρχικά τα τρία κανάλια της αρχικής πολυφασματικής εικόνας αναλύονται σε κύριες συνιστώσες. Πριν

τη συγχώνευση πραγματοποιείται, όπως και στην περίπτωση της μεθόδου IHS, ταίριασμα του ιστογράμματος της παγχρωματικής εικόνας με το ιστόγραμμα της πρώτης κύριας συνιστώσας. Στη συνέχεια η $I\eta K.\Sigma$. αντικαθίσταται από την νέα παγχρωματική εικόνα (ΠΓ) και ακολουθεί ο αντίστροφος μετασχηματισμός κυριών συνιστωσών στο σύνολο των αρχικών, συσχετισμένων δεδομένων (Schowengerdt, 1997, Carter, 1998, Zhou et al., 1998, Pohl, 1999, Bretschneider & Kao, 2000, Sanjeevi, et al., 2001, Li et al., 2002, Wald, 2002, Zhang, 2002, Samadzadegan, 2003, Francis et al., 2003, Zhou et al., 2003, Marcelino et al,. 2003, Vijayaraj, 2004). 0 αντίστροφος μετασχηματισμός δίδεται από την (Meenakshisundaram, 2005):

$$\begin{bmatrix} R'\\G'\\B' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13}\\e_{21} & e_{22} & e_{23}\\e_{31} & e_{32} & e_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} PAN\\PC2\\PC3 \end{bmatrix},$$
(3.5)

Τα στάδια εφαρμογής του μετασχηματισμού κυριών συνιστωσών απεικονίζονται και στην Εικόνα 6.



Εικόνα 6: Σχηματικό διάγραμμα της PCA_Περ.Α (ΠΓ: η παγχρωματική εικόνα που προέκυψε μετά το ταίριασμα του ιστογράμματος της αρχικής παγχρωματικής στο ιστόγραμμα της *1ης Κ.Σ.*).

3.2.2 ΡCΑ_Περ.Β

Η εισαγωγή της χωρικής πληροφορίας στην αρχική πολυφασματική εικόνα επιτυγχάνεται με πρόσθεση της παγχρωματικής εικόνας και στις τρεις κύριες συνιστώσες (Εικόνα 7), και όχι με απλή αντικατάσταση της πρώτης κύριας συνιστώσας από την παγχρωματική εικόνα. Ακολουθεί ο αντίστροφος μετασχηματισμός κυρίων συνιστωσών με χρήση της εξίσωσης:

$$\begin{bmatrix} R'\\G'\\B' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13}\\e_{21} & e_{22} & e_{23}\\e_{31} & e_{32} & e_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} PC1 + PAN\\PC2 + PAN\\PC3 + PAN \end{bmatrix},$$
(3.6)



Εικόνα 7: Σχηματικό διάγραμμα της PCA_Περ.Β.

3.2.3 ΡCΑ_Περ.Γ

Η αρχική χωρική και φασματική πληροφορία συγχωνεύονται με πρόσθεση της παγχρωματικής εικόνας στην πρώτη κύρια συνιστώσα (Εικόνα 8). Στη συνέχεια εφαρμόζεται ο αντίστροφος μετασχηματισμός κυρίων συνιστωσών:

$$\begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} PC1 + PAN \\ PC2 \\ PC3 \end{bmatrix},$$
(3.7)

20



Εικόνα 8: Σχηματικό διάγραμμα της PCA_Περ.Γ.

Το πλεονέκτημα της συγχώνευσης εικόνων με χρήση της ανάλυσης κυρίων συνιστωσών είναι ότι δεν υπάρχει περιορισμός στον αριθμό των φασματικών καναλιών που δύναται να χρησιμοποιηθούν. Μειονέκτημα όμως συνιστά η εξάρτηση της αποτελεσματικότητας αυτής από το είδος της περιοχή ενδιαφέροντος (π.χ. αστική περιοχή, περιοχή με φυτοκάλυψη κ.α), καθώς η διασπορά των τιμών των εικονοστοιχείων και η συσχέτιση των διαφόρων καναλιών ενδέχεται να μεταβάλλεται με τον εκάστοτε στόχο σάρωσης (Vijayaraj, 2004).

Κατά τους Pohl & van Genderen (1998), η μέθοδος των κυρίων συνιστωσών μπορεί να εφαρμοστεί συνολικά ή επιλεκτικά. Στην πρώτη περίπτωση χρησιμοποιούνται όλα τα διαθέσιμα κανάλια της πολυφασματικής εικόνας. Για παράδειγμα στην περίπτωση του δορυφόρου Quickbird η ανάλυση συμπεριλαμβάνει και τα τέσσερα κανάλια της πολυφασματικής εικόνας, ερυθρό και εγγύς υπέρυθρο). Στη δεύτερη περίπτωση πραγματοποιείται επιλογή των καναλιών που θα χρησιμοποιηθούν (π.χ. πράσινο, ερυθρό και εγγύς υπέρυθρο).

Οι εικόνες που προέκυψαν από τη συγχώνευση της πολυφασματικής με την παγχρωματική εικόνα, με τις μεθόδους που αναφέρονται στην παρούσα Ενότητα, παρατίθενται στο Παράρτημα Ι.. Από οπτική παρατήρηση των συγχωνευμένων εικόνων διαπιστώνεται ότι οι μέθοδοι PCA Περ.Α και PCA Περ.Β εμφανίζουν καλή χωρική ανάλυση. Η μέθοδος PCA_Περ.Γ παρουσιάζει χαμηλή χωρική ανάλυση αλλά υψηλότερη, σε σύγκριση με τις άλλες δυο περιπτώσεις, φασματική ποιότητα.

3.3 Μετασχηματισμοί κυματιδίων

Οι μετασχηματισμοί κυματιδίων παρέχουν τη δυνατότητα ανάλυσης μιας εικόνας στις χαμηλής και υψηλής συχνότητας συνιστώσες της. Οι χαμηλές συχνότητες αντιστοιχούν σε περιοχές που οι διαβαθμίσεις του τόνου του γκρι εναλλάσσονται σταδιακά και ομαλά (π.χ. λίμνες). Αυτές οι συχνότητες συγκεντρώνουν τη φασματική πληροφορία που χρησιμοποιείται για την ποιοτική αναγνώριση αντικειμένων και περιοχών σε μια εικόνα.

Οι υψηλές συχνότητες χαρακτηρίζουν τις περιοχές που εμφανίζουν απότομες και ασυνεχείς εναλλαγές του τόνου του γκρι (π.χ. δρόμοι, ρήγματα, κ.α.) και συγκεντρώνουν τη χωρική πληροφορία μιας εικόνας. Συνεπώς με χρήση αυτών των μετασχηματισμών είναι εφικτή η απομόνωση της χωρικής και φασματικής πληροφορίας που περιλαμβάνουν οι παγχρωματικές και πολυφασματικές εικόνες αντίστοιχα.

Ο διαχωρισμός των υψηλών και χαμηλών συχνοτήτων μιας εικόνας πραγματοποιείται με την ανάλυση πολλαπλής διακριτότητας (Multiresolution Analysis – MRA).





Στην εικόνα 9 η αρχική (π.χ. παγχρωματική) εικόνα συνιστά τη βάση της πυραμίδας. Τα διαδοχικά επίπεδα της πυραμίδας αποτελούν χαμηλότερης χωρικής ανάλυσης αναπαραστάσεις της αρχικής εικόνας (approximation images). Ουσιαστικά πρόκειται για εικόνες που συγκεντρώνουν τις χαμηλές συχνότητες και προκύπτουν από συνέλιξη της αρχικής ή του αμέσως προηγούμενου επιπέδου εικόνας με ένα φίλτρο διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων (Wald, 2002, Ptáček *et al.*, 2004, González-Audicana *et al.*, 2005).

Η χωρική λεπτομέρεια που αποβάλλεται κατά τη μετάβαση στο επόμενο επίπεδο της πυραμίδας συγκεντρώνεται σε μία ή περισσότερες εικόνες, ανάλογα με το μετασχηματισμό κυματιδίων που χρησιμοποιείται.

Οι πιο διαδεδομένοι διακριτοί μετασχηματισμοί κυματιδίων είναι οι αλγόριθμοι Mallat και "Á trous".

3.3.1 Αλγόριθμος Mallat

Η ανάλυση μιας εικόνας f(x,y) σε χαμηλές και υψηλές συχνότητες πραγματοποιείται με εφαρμογή φίλτρων διέλευσης χαμηλών (L) και υψηλών (H) συχνοτήτων αρχικά στις γραμμές (πλήθος γραμμών: M) και έπειτα στις στήλες (πλήθος γραμμών: N) της εικόνας. Από το φιλτράρισμα των γραμμών προκύπτουν δυο νέες εικόνες $(f_L(x,y) \text{ και } f_H(x,y))$. Η εικόνα $f_L(x,y)$ περιλαμβάνει τις χαμηλές συχνότητες και η $f_H(x,y)$ τις υψηλές συχνότητες της f(x,y). Προκειμένου να μειωθούν οι πράξεις που απαιτούνται στο επόμενο στάδιο, πραγματοποιείται υποδειγματοληψία κατά στήλες (δηλαδή αφαίρεση ζυγών στηλών) των εικόνων $f_L(x,y)$ και $f_H(x,y)$. Εν συνεχεία τα ίδια φίλτρα (L και H) που χρησιμοποιήθηκαν στις γραμμές της f(x,y)εφαρμόζονται στις στήλες των $f_L(x,y)$ και $f_H(x,y)$ και ακολουθεί υποδειγματοληψία κατά γραμμές. Τελικά προκύπτουν τέσσερις εικόνες $(f_{LL}(x,y), f_{LH}(x,y), f_{HL}(x,y))$ και $f_{HH}(x,y)$) με διαστάσεις $M/2 \ge N/2$. Από αυτές τις εικόνες η $f_{LL}(x,y)$ (approximation image) αποτελεί αναπαράσταση της αρχικής (Wald, 2002, Jing et al., 2005). Οι υπόλοιπες τρεις (detail images) απεικονίζουν την κάθετη, οριζόντια και διαγώνια χωρική πληροφορία της αρχικής εικόνας (Wald, 2002, Jing et al., 2005). Η χωρική λεπτομέρεια που περιλαμβάνεται σε κάθε μια από τις τρεις τελευταίες εικόνες περιγράφεται από κάποιους κυματιδιακούς συντελεστές λεπτομέρειας (wavelet detail coefficients) που, σε αντιστοιχία με τις εικόνες διακρίνονται σε κάθετους, οριζόντιους και διαγώνιους (Bretschneider & Kao, 2000, Wald, 2002, González-Audicana et al., 2005).

Στην εικόνα 10 παρατίθεται παράδειγμα διάσπασης τμήματος παγχρωματικής εικόνας Quickbird με τον αλγόριθμο Mallat.

Η αναδόμηση της αρχικής εικόνας επιτυγχάνεται με αντιστροφή της προαναφερθείσας διαδικασίας ανάλυσης. Στην περίπτωση της αναδόμησης όμως χρησιμοποιούνται τα συμπληρωματικά φίλτρα των *L* και *H* που χρησιμοποιούνται κατά τη διάσπαση.

Στην περίπτωση της συγχώνευσης εικόνων ο μετασχηματισμός κυματιδίων Mallat εφαρμόζεται χωριστά στην παγχρωματική και σε κάθε κανάλι της πολυφασματικής εικόνας. Σκοπός είναι η συγχώνευση της $f^{M}_{LL}(x,y)$ (όπου το M αντιστοιχεί στα κανάλια της πολυφασματικής εικόνας) με τις $f^{P}_{LH}(x,y)$, $f^{P}_{HL}(x,y)$ και $f^{P}_{HH}(x,y)$ της παγχρωματικής εικόνας P(x,y).

Η εισαγωγή της χωρικής πληροφορίας της παγχρωματικής εικόνας σε κάθε κανάλι της πολυφασματικής δύναται να πραγματοποιηθεί με τους κάτωθι τρόπους:

- 1. Αντικατάσταση των $f^{M}_{LH}(x,y)$, $f^{M}_{HL}(x,y)$ και $f^{M}_{HH}(x,y)$ του καναλιού με τις αντίστοιχες $f^{P}_{LH}(x,y)$, $f^{P}_{HL}(x,y)$ και $f^{P}_{HH}(x,y)$ της παγχρωματικής εικόνας (González-Audicana *et al.*, 2005).
- 2. Πρόσθεση των $f^{M}_{LH}(x,y)$, $f^{M}_{HL}(x,y)$ και $f^{M}_{HH}(x,y)$ του καναλιού της με τις αντίστοιχες $f^{P}_{LH}(x,y)$, $f^{P}_{HL}(x,y)$ και $f^{P}_{HH}(x,y)$ της παγχρωματικής εικόνας (González-Audicana *et al.*, 2005).
- 3. Επιλογή, για κάθε f_{LL}(x,y), f_{LH}(x,y), f_{HL}(x,y) και f_{HH}(x,y), των συντελεστών χωρικής λεπτομέρειας με τη μέγιστη απόλυτη τιμή για την αναδόμηση της εικόνας. Αυτός ο τρόπος βασίζεται στην αρχή ότι οι χωρικές δομές μιας εικόνας χαρακτηρίζονται από υψηλές απόλυτες τιμές των εν λόγω συντελεστών. Κατά συνέπεια, επιλογή των συντελεστών με τη μέγιστη απόλυτη τιμή αυξάνει την περιεχόμενη, στη συγχωνευμένη εικόνα, χωρική λεπτομέρεια.

H διαδικασία της συγχώνευσης ολοκληρώνεται με τον αντίστροφο μετασχηματισμό κυματιδίων (Εικόνα 11), (González-Audicana *et al.*, 2005, Nunez *et al.*, 1999, Gomez *et al.*, 2001, Hill *et al.*, 2002, Epinat *et al.*, 2001, Lewis *et al.*, 2004, Samadzadegan, 2003, Du *et al.*, 2003, Pohl, 1999, Zhang, 2002, Hong & Zhang, 2004, Sanjeevi *et al.*, 2001, de Audicana *et al.*, 2002, Bretschneider & Kao, 2000, Pohl & Van Genderen, 1998, King & Wang, 2001, Gungor & Shan, 2004, Petrovic, 2001, Canga, 2002, Zhou *et al.*, 2003, Li *et al.*, 2002, Wald, 2002, Li *et al.*, 1995, Vijayaraj, 2004, Piella, 2003, Marcelino *et al.*, 2003, Pajares & Cruz, 2004, Gonzalo & Lillo-Saavedra, 2004, Ventura & Fonseca, 2002, Afary & Emamy, 2003, Qing *et al.*, 2004).

Ο μετασχηματισμός κυματιδίων πραγματοποιείται χωριστά για κάθε κανάλι. Τα συγχωνευμένα κανάλια συνδυάζονται για τη δημιουργία μιας σύνθετης ψευδοχρωματικής εικόνας RGB.

Κατά την εφαρμογή του μετασχηματισμού κυματιδίων Mallat δοκιμάστηκαν τέσσερις διαφορετικές ομάδες κυματιδίων (Daubechies, Biorthogonal, Coiflets, Symlets). Διαπιστώθηκε ότι οι διαφορές μεταξύ των συγχωνευμένων εικόνων που προέκυψαν από όλες τις ανωτέρω ομάδες κυματιδίων ήταν αμελητέες.

Συνοπτικά, τα στάδια που ακολουθήθηκαν στην παρούσα διατριβή, για την υλοποίηση της συγχώνευσης εικόνων με το μετασχηματισμό κυματιδίων Mallat είναι:

 Εφαρμογή μετασχηματισμού κυματιδίων Mallat στην παγχρωματική και σε κάθε κανάλι της πολυφασματικής εικόνας.

24

- 2. Για κάθε φασματικό κανάλι, η χαμηλής χωρικής ανάλυσης αναπαράσταση της παγχρωματικής εικόνας (C_{Aa}^{P}) αντικαθίστανται από τη χαμηλής χωρικής ανάλυσης αναπαράσταση του καναλιού (C_{Aa}^{M}) (Εικόνα11).
- Με την εφαρμογή του αντίστροφου μετασχηματισμού κυματιδίων, η οριζόντια, κάθετη και διαγώνια χωρική πληροφορία της παγχρωματικής εικόνας συγχωνεύεται με τη φασματική πληροφορία του κάθε καναλιού της πολυφασματικής εικόνας (Εικόνα 11).
- Οι συγχωνευμένες εικόνες που προκύπτουν (μία για κάθε κανάλι της πολυφασματικής εικόνας) από τον αντίστροφο μετασχηματισμό κυματιδίων συνδυάζονται σε μία τελική, ψευδοχρωματική εικόνα (Εικόνα 11).



Εικόνα 10: Διάσπαση τμήματος παγχρωματικής εικόνας Quickbird (περιοχή Αχιβαδολίμνη) με χρήση του μετασχηματισμού κυματιδίων Mallat. Η εικόνα A αντιστοιχεί στην χαμηλότερης χωρικής ανάλυσης αναπαράσταση της παγχρωματικής. Οι εικόνες H, V, και D απεικονίζουν την οριζόντια, κάθετη και διαγώνια χωρική πληροφορία αντίστοιχα. Τα L και H είναι τα φίλτρα διέλευσης χαμηλών και υψηλών συχνοτήτων, αντίστοιχα.



Εικόνα 11: Σχηματικό διάγραμμα της συγχώνευσης εικόνων με το μετασχηματισμό κυματιδίων Mallat. Τα C_{H}^{P} , C_{V}^{P} , C_{D}^{P} , C_{H}^{M} , C_{V}^{M} , C_{D}^{M} αντιπροσωπεύουν τους οριζόντιους, κάθετους και διαγώνιους συντελεστές χωρικής λεπτομέρειας για την παγχρωματική και πολυφασματική εικόνα αντίστοιχα. Τα C_{A}^{P} , C_{V}^{F} , C_{D}^{F} , C_{V}^{M} , C_{D}^{M} , C_{V}^{M} , C_{D}^{M} αντιπροσωπεύουν τους οριζόντιους, κάθετους και διαγώνιος συντελεστές της παγχρωματικής, πολυφασματικής και συγχωνευμένης εικόνας αντίστοιχα. Τα C_{H}^{F} , C_{V}^{F} , C_{D}^{F} , C_{V}^{F} , C_{V}^{F} , C_{D}^{F} , C_{V}^{F} ,

3.3.2 Αλγόριθμος "Á Trous"

Ο αλγόριθμος Mallat αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα ανάλυσης πολλαπλής διακριτότητας κατά την οποία οι διαδοχικές, χαμηλότερης χωρικής ανάλυσης, αναπαραστάσεις της αρχικής εικόνας σχηματίζουν μια πυραμίδα (Εικόνα 9), (Wald, 2002). Αντίθετα, στον αλγόριθμο " Á trous" οι διαδοχικές αναπαραστάσεις της αρχικής εικόνας σχηματίζουν ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο (Εικόνα 12). Αυτό συμβαίνει γιατί ο αριθμός των εικονοστοιχείων της αρχικής εικόνας παραμένει σταθερός.



Εικόνα 12: Απεικόνιση του " Á Trous" αλγόριθμου διάσπασης εικόνας (από Wald, 2002).

Ο μετασχηματισμός επιτυγχάνεται με συνέλιξη της αρχικής εικόνας (A_{ij}) (όπου *i*, *j* οι συντεταγμένες των εικονοστοιχείων στην εικόνα) με φίλτρο χαμηλών συχνοτήτων (*W*). Στη βιβλιογραφία απαντάται κυρίως το κάτωθι [5 x 5] φίλτρο χαμηλών συχνοτήτων (Wald, 2002, Gonzalez-Audicana *et al.*, 2005, Gonzalo & Lillo-Saavedra, 2004):

$$W_1 = 1/256 * \begin{vmatrix} 1 & 4 & 6 & 4 & 1 \\ 4 & 16 & 24 & 16 & 4 \\ 6 & 24 & 36 & 24 & 6 \\ 4 & 16 & 24 & 16 & 4 \\ 1 & 4 & 6 & 4 & 1 \end{vmatrix}$$

Στη συνέχεια, για κάθε νέο επίπεδο διάσπασης, μεταξύ των γραμμών και των στηλών του φίλτρου χαμηλών συχνοτήτων παρεμβάλλονται αντίστοιχα γραμμές και στήλες με μηδενικές τιμές (Wald, 2002, Gonzalez-Audicana *et al.*, 2005). Έτσι, στο δεύτερο επίπεδο διάσπασης το φίλτρο (W_2) έχει τη μορφή:

	1	0	4	0	6	0	4	0	1
$W_2 = 1/256 *$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	0	16	0	24	0	16	0	4
	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6	0	24	0	36	0	24	0	6
	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	0	16	0	24	0	16	0	4
	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	0	4	0	6	0	4	0	1

Η συνεχής παρεμβολή γραμμών και στηλών με μηδενικές τιμές αποσκοπεί στη διατήρηση των διαστάσεων της αρχικής εικόνας (Wald, 2002, Gonzalez-Audicana *et al.*, 2005).

Σε κάθε επίπεδο διάσπασης, πραγματοποιείται συνέλιξη του φίλτρου χαμηλών συχνοτήτων μόνο με την κατά προσέγγιση εικόνα που προέρχεται από το προηγούμενο επίπεδο διάσπασης. Τα επίπεδα των κυματιδίων (*wavelet planes*) που σχετίζονται με την χωρική πληροφορία δίνονται από τη διαφορά των κατά προσέγγιση εικόνων που προέρχονται από δυο διαδοχικά επίπεδα διάσπασης (Wald, 2002, Gonzalez-Audicana *et al.*, 2005).

Ο συγκεκριμένος μετασχηματισμός εφαρμόζεται παράλληλα στην παγχρωματική και στα επιμέρους κανάλια της πολυφασματικής εικόνας. Προκειμένου να επιτευχθεί η συγχώνευση, στην κατά προσέγγιση εικόνα που προέρχεται από το τελευταίο επίπεδο διάσπασης της πολυφασματικής εικόνας προστίθεται το άθροισμα των επιπέδων των κυματιδίων της παγχρωματικής εικόνας (Wald, 2002, Gonzalez-Audicana *et al.*, 2005). Στην εικόνα 13 παρουσιάζεται σχηματικά η διαδικασία συγχώνευσης παγχρωματικής και πολυφασματικής εικόνας με τον αλγόριθμο "Á trous".



Εικόνα 13: Σχηματικό διάγραμμα της συγχώνευσης εικόνων με το μετασχηματισμό "A Trous". (W1: [5x5] φίλτρο χαμηλών συχνοτήτων, W2: [9x9] φίλτρο χαμηλών συχνοτήτων, E.K.1: πρώτο επίπεδο κυματιδίων, E.K.2: δεύτερο επίπεδο κυματιδίων, ΠΓ-1: προσέγγιση της αρχικής παγχρωματικής εικόνας, ΠΓ-2: προσέγγιση της ΠΓ-1, R1, G1 και B1: προσεγγίσεις των αρχικών καναλιών (R, G και B) της πολυφασματικής εικόνας, R2, G2 και B2: προσεγγίσεις των R1, G1 και B1, αντίστοιχα).

3.3.3 Συνδυασμοί μετασχηματισμών

3.3.1.1 Συνδυασμός μετασχηματισμών IHS και Mallat

Όπως και στην περίπτωση του απλού μετασχηματισμού IHS, η πολυφασματική εικόνα μεταφέρεται από το RGB στο IHS σύστημα απόδοσης έγχρωμων εικόνων. Εν συνεχεία εφαρμόζεται ο μετασχηματισμός κυματιδίων Mallat στη συνιστώσα της έντασης της πολυφασματικής και στην παγχρωματική εικόνα (González-Audicana *et al.*, 2005).

Η κατά προσέγγιση εικόνα της έντασης εμπεριέχει τη φασματική πληροφορία της αρχικής πολυφασματικής εικόνας. Οι υπό-εικόνες που αφορούν τη χωρική πληροφορία και τη διεύθυνση αυτής (οριζόντια, κάθετη και διαγώνια) στην παγχρωματική εικόνα, συνδυάζονται με την αδρή προσέγγιση της εικόνας της έντασης που προέρχεται από το μετασχηματισμό κυματιδίων αυτής (González-Audicana *et al.*, 2005). Με εφαρμογή του αντίστροφου μετασχηματισμού κυματιδίων Mallat, η χωρική πληροφορία της αρχικής εικόνας συγχωνεύεται με τη φασματική πληροφορία της αρχικής εικόνας συγχωνεύεται με τη φασματική πληροφορία της αρχικής εικόνας συγχωνεύεται με τη συγχώνευσης εικόνων με συνδυασμό των μετασχηματισμών Mallat και IHS απεικονίζεται στο σχήμα της Εικόνας 14.



Εικόνα 14: Σχηματικό διάγραμμα της συγχώνευσης εικόνων με συνδυασμό των μετασχηματισμών IHS και Mallat.

3.3.1.2 Συνδυασμός μετασχηματισμών PCA και Mallat

Κατά τη συγχώνευση εικόνων με το μετασχηματισμό κυρίων συνιστωσών η παγχρωματική εικόνα αντικαθιστά την πρώτη κύρια συνιστώσα της πολυφασματικής εικόνας. Μετά την εφαρμογή του αντίστροφου μετασχηματισμού κυρίων συνιστωσών η χωρική και φασματική πληροφορία της παγχρωματικής συγχωνεύεται με τη φασματική πληροφορία της πολυφασματικής εικόνας (González-Audicana *et al.*, 2005).

Στην περίπτωση του συνδυασμού των μετασχηματισμών Mallat και Κυρίων Συνιστωσών μόνο η χωρική πληροφορία της παγχρωματικής εικόνας συνδυάζεται με την πρώτη κύρια συνιστώσα της πολυφασματικής εικόνας (González-Audicana *et al.*, 2005). Όπως διακρίνεται και στην Εικόνα 15, η διαδικασία συγχώνευσης των δυο αρχικών εικόνων είναι αντίστοιχη με την περίπτωση του συνδυασμού των μετασχηματισμών Mallat και IHS (González-Audicana *et al.*, 2005). Αναλυτικά, τα στάδια εφαρμογής του συνδυασμού των μετασχηματισμών PCA και Mallat (Gonzalez-Audicana *et al.*, 2005), όπως παρουσιάζονται και στην Εικόνα 15, είναι:

- Διαχωρισμός της αρχικής πολυφασματικής εικόνας στα επιμέρους κανάλια της (ιώδες, πράσινο, ερυθρό, εγγύς υπέρυθρο).
- Εφαρμογή της ανάλυσης κυρίων συνιστωσών (PCA) στα κανάλια της πολυφασματικής εικόνας.
- Εφαρμογή του μετασχηματισμού κυματιδίων Mallat στην παγχρωματική εικόνα (ΠΓ) και στην πρώτη κύρια συνιστώσα (1η Κ.Σ.).
- 4. Συγχώνευση της οριζόντιας, κάθετης και διαγώνιας χωρικής πληροφορίας της παγχρωματικής εικόνας με τη φασματική πληροφορία της πρώτης κύριας συνιστώσας, η οποία πλέον είναι συγκεντρωμένη στην εικόνα που αποτελεί αδρή προσέγγιση αυτής ως αποτέλεσμα της εφαρμογής του μετασχηματισμού κυματιδίων στην πρώτη κύρια συνιστώσα.
- 5. Εφαρμογή του αντίστροφου μετασχηματισμού κυματιδίων Mallat.
- 6. Συνδυασμός της εικόνα που προκύπτει από το προηγούμενο στάδιο συνδυάζεται με την δεύτερη και τρίτη κύρια συνιστώσα (2η και 3η Κ.Σ. αντίστοιχα). Έπειτα πραγματοποιείται αντίστροφος μετασχηματισμός κυρίων συνιστωσών και προκύπτει η τελική συγχωνευμένη εικόνα



Εικόνα 15: Σχηματικό διάγραμμα της συγχώνευσης εικόνων με συνδυασμό των μετασχηματισμών PCA και Mallat.

3.3.1.3 Συνδυασμός μετασχηματισμών IHS και "Á trous"

Η συγκεκριμένη μέθοδος συγχώνευσης διαχωρίζεται σε πέντε επιμέρους στάδια (Núñez *et al.*, 1999), (Εικόνα 16):

- 1. Μετασχηματισμός της αρχικής πολυφασματικής εικόνας από το RGB στο IHS πεδίο.
- Προσαρμογή του ιστογράμματος της αρχικής παγχρωματικής στο ιστόγραμμα της εικόνας της έντασης.
- Εφαρμογή του μετασχηματισμού "Á trous" στη νέα παγχρωματική εικόνα που προέκυψε στο προηγούμενο στάδιο (ΠΓ).
- 4. Προσθήκη των επιπέδων των κυματιδίων αυτής στην εικόνα της έντασης.
- 5. Εφαρμογή του αντίστροφου μετασχηματισμού IHS.



Εικόνα 16: Σχηματικό διάγραμμα της συγχώνευσης εικόνων με συνδυασμό των μετασχηματισμών IHS και "Á Trous".

3.3.1.4 Συνδυασμός μετασχηματισμών PCA και "Á trous"

Εκτός από την κλασική μέθοδο (Á Trous-PCA_Περ.Α) συγχώνευσης εικόνων με συνδυασμό των μετασχηματισμών PCA και "Á trous", στην παρούσα διατριβή υλοποιήθηκαν και δυο παραλλαγές (Á Trous-PCA_Περ.Β και Á Trous-PCA_Περ.Γ) αυτής, οι οποίες σχετίζονται με τον τρόπο εισαγωγής της χωρικής πληροφορίας στην αρχική πολυφασματική εικόνα.

Και στις τρεις αυτές μεθόδους τα αρχικά στάδια που ακολουθήθηκαν για την υλοποίηση τους είναι κοινά:

- 1. Ανάλυση της αρχικής πολυφασματικής εικόνας ($\Pi \Phi$) σε κύριες συνιστώσες.
- Προσαρμογή του ιστογράμματος της αρχικής παγχρωματικής στο ιστόγραμμα της εικόνας της πρώτης κύριας συνιστώσας..
- Εφαρμογή του μετασχηματισμού κυματιδίων "A trous" στη νέα παγχρωματική εικόνα που προέκυψε στο προηγούμενο στάδιο (ΠΓ).

3.3.1.4.(i) Á Trous-PCA_Пер.А

Η χωρική πληροφορία της παγχρωματικής εικόνας εισάγεται στην πολυφασματική με προσθήκη του αθροίσματος των επιπέδων των κυματιδίων της παγχρωματικής εικόνας (Ε.Κ.1 + Ε.Κ.2) στην πρώτη κύρια συνιστώσα (1^η Κ.Σ.). Σχηματικά, η μέθοδος παρουσιάζεται στην Εικόνα 17.

3.3.1.4.(ii) Á Trous-PCA_Пεр.В

Σε αυτή την περίπτωση το άθροισμα των επιπέδων των κυματιδίων της παγχρωματικής εικόνας προστίθεται σε κάθε κύρια συνιστώσα της πολυφασματικής εικόνας (Εικόνα 18).

3.3.1.4.(iii)Á Trous-PCA_Пер.Г

Η εισαγωγή της χωρικής πληροφορίας στην πολυφασματική επιτυγχάνεται με αντικατάσταση της 1^{ης} Κ.Σ. από το άθροισμα των επιπέδων των κυματιδίων της παγχρωματικής εικόνας. Σχηματικά, η μέθοδος παρουσιάζεται στην Εικόνα 19.

Και στις τρεις προαναφερθείσες μεθόδους, μετά την εισαγωγή της χωρικής πληροφορίας, η διαδικασία συγχώνευσης ολοκληρώνεται με εφαρμογή του αντίστροφου μετασχηματισμού κυριών συνιστωσών.



Εικόνα 17: Συγχώνευση πολυφασματικής και παγχρωματικής εικόνας Quickbird με χρήση της μεθόδου Á Trous-PCA_Περ.Α.



Εικόνα 18 Συγχώνευση πολυφασματικής και παγχρωματικής εικόνας Quickbird με χρήση της μεθόδου Α΄ Trous-PCA_Περ.B.



Εικόνα 19: Συγχώνευση πολυφασματικής και παγχρωματικής εικόνας Quickbird με χρήση της μεθόδου Α΄ Trous-PCA_Περ.Γ.

Οι συγχωνευμένες εικόνες που προέκυψαν από την εφαρμογή των μεθόδων που αναφέρονται στην παρούσα Ενότητα παρατίθενται στο Παράρτημα Ι. Βάσει οπτικών παρατηρήσεων, καμία από τις τρεις μεθόδους δεν παρουσιάζει υψηλή διατήρηση της χωρικής πληροφορίας που περιλαμβάνει η παγχρωματική εικόνα. Επιπρόσθετα, στην περίπτωση του συνδυασμού καναλιών ερυθρό – πράσινο – ιώδες, και οι τρεις μέθοδοι καταλήγουν σε ελαφρά διαστρέβλωση των χρωμάτων της αρχικής ψευδοχρωματικής εικόνας.

3.4 Περίληψη κεφαλαίου

Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύθηκαν ορισμένες από τις περισσότερο διαδεδομένες μεθόδους συγχώνευσης εικόνων. Κίνητρο επιλογής των συγκεκριμένων μεθόδων αποτέλεσε η ευρεία χρήση αυτών στα πεδία εφαρμογών της συγχώνευσης εικόνων. Οι τεχνικές αυτές εφαρμόστηκαν στα διαθέσιμα δορυφορικά δεδομένα. Οι συγχωνευμένες εικόνες που προέκυψαν συγκρίθηκαν με εκείνες που προήλθαν από τις νέες μεθόδους που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής. Τα αποτελέσματα αυτής της σύγκρισης δίδονται στο Κεφάλαιο 8.

4 Φιλτράρισμα εικόνων

Οι εικόνες δύναται να θεωρηθούν ως άθροισμα συνιστωσών χαμηλής και υψηλής συχνότητας. Οι υψηλές συχνότητες αντιστοιχούν σε απότομες εναλλαγές των διαβαθμίσεων του γκρι σε μια εικόνα (π.χ.. δρόμοι, φράχτες, ρήγματα κ.α.). Αντίθετα, οι χαμηλές συχνότητες εντοπίζονται σε περιοχές της εικόνας όπου οι διαβαθμίσεις του γκρι μεταβάλλονται σταδιακά. Με το φιλτράρισμα επιτυγχάνεται επιλεκτική ενίσχυση κάποιων συνιστωσών συχνότητας και εξασθένηση άλλων. Τα φίλτρα που επιτυγχάνουν διαχωρισμό των συνιστωσών χαμηλής και υψηλής συχνότητας μιας εικόνας διαχωρίζονται στα φίλτρα διέλευσης χαμηλών και υψηλών συχνοτήτων, αντίστοιχα.

Οι μέθοδοι συγχώνευσης που αναπτύχθηκαν στην παρούσα διατριβή (Κεφάλαιο 6) βασίζονται στην εφαρμογή φίλτρων διέλευσης χαμηλών και υψηλών συχνοτήτων στο μετασχηματισμό Fourier των αρχικών εικόνων. Δοκιμάστηκαν έξι διαφορετικά είδη φίλτρων (τρία φίλτρα διέλευσης χαμηλών και τρία φίλτρα διέλευσης υψηλών συχνοτήτων). Τα βασικά γνωρίσματα των φίλτρων αυτών καθώς και τα αποτελέσματα της εφαρμογής αυτών στους μετασχηματισμούς Fourier των εικόνων παρουσιάζονται στις παρακάτω ενότητες.

4.1 Φίλτρα διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων

Τα φίλτρα διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων χρησιμοποιούνται για την αποκοπή της χωρικής λεπτομέρειας των εικόνων, η οποία απαντάται στις υψηλές συχνότητες του φάσματος. Αποτέλεσμα της εφαρμογής αυτών των φίλτρων είναι η εξομάλυνση της αρχικής εικόνας.

4.1.1 Ιδανικό φίλτρο διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων

Πρόκειται για την απλούστερη μορφή φίλτρου διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων. Απομακρύνει πλήρως όλες τις συχνότητες με τιμές μεγαλύτερες από αυτή της συχνότητας αποκοπής και διατηρεί της συχνότητες που έχουν τιμές μικρότερες αυτής (Gonzalez & Woods, 1992). Η συνάρτηση μεταφοράς ενός ιδανικού φίλτρου $H(\kappa_{x,},\kappa_{y})$ δυο διαστάσεων δίνεται από την εξίσωση (Gonzalez & Woods, 1992):

$$H(\kappa_x,\kappa_y) = \begin{cases} 1, & D(\kappa_x,\kappa_y) \le D_o \\ 0, & D(\kappa_x,\kappa_y) > D_o \end{cases},$$
(4.1)

όπου D_o είναι η ακτίνα κύκλου που έχει ως κέντρο την αρχή των αξόνων των συντεταγμένων στο πεδίο συχνοτήτων (Εικόνα 20(ii)), παίρνει θετικές τιμές και αντιστοιχεί στη συχνότητα

αποκοπής (Gonzalez & Woods, 2008). Η συνάρτηση $D(\kappa_{x,},\kappa_{y})$ ορίζει την απόσταση του σημείου (κ_{x},κ_{y}) από την αρχή των αξόνων των συντεταγμένων στο πεδίο συχνοτήτων, και δίνεται από την:

$$D(\kappa_x,\kappa_y) = \sqrt{\kappa_x^2 + \kappa_y^2}, \qquad (4.2)$$

Στην περίπτωση που η αρχή των αξόνων συντεταγμένων στο πεδίο συχνοτήτων βρίσκεται στο κέντρο της εικόνας του φάσματος, η εξ. (4.2) γίνεται (Gonzalez, Woods & Eddins, 2004):

$$D(\kappa_{x},\kappa_{y}) = \sqrt{(\kappa_{x} - \frac{M}{2})^{2} + (\kappa_{y} - \frac{N}{2})^{2}}, \qquad (4.3)$$

όπου $M \ge N$ είναι οι διαστάσεις της εικόνας.



Εικόνα 20: Απεικόνιση ενός ιδανικού φίλτρου διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων σε (i) δυο διαστάσεις και (ii) τρεις διαστάσεις.









(iii)

Εικόνα 21: Αποτέλεσμα εφαρμογής ιδανικού φίλτρου διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων στο μετασχηματισμό Fourier του ερυθρού καναλιού της πολυφασματικής εικόνας (περιοχή Αχιβαδολίμνη) με συχνότητα αποκοπής (i) $D_o=10$, (ii) $D_o=15$, και (iii) $D_o=20$.

Το μειονέκτημα του εν λόγω φίλτρου είναι, όπως φαίνεται στην Εικόνα 21, η παρουσία πλασματικών δακτυλίων ("ringing effects") γύρω από τα χωρικά στοιχεία της φιλτραρισμένης εικόνας.

4.1.2 Butterworth φίλτρο διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων

Η συνάρτηση μεταφοράς ενός φίλτρου Butterworth $H(\kappa_x, \kappa_y)$ τάξης *n* δίνεται από την εξίσωση (Gonzalez & Woods, 1992):

$$H(\kappa_x, \kappa_y) = \frac{1}{1 + \left[\frac{D(\kappa_x, \kappa_y)}{D_o}\right]^{2n}},$$
(4.4)

όπου D_o η απόσταση, από την αρχή των αξόνων των συντεταγμένων στο πεδίο συχνοτήτων, που αντιστοιχεί στη συχνότητα αποκοπής και $D(\kappa_{x,},\kappa_{y})$ η απόσταση του σημείου (κ_{x},κ_{y}) από την αρχή των αξόνων, η οποία δίνεται από τις εξ. (4.2) και (4.3), (Gonzalez, Woods & Eddins, 2004). Με αύξηση της τάξης *n* το Butterworth φίλτρο προσεγγίζει σε συμπεριφορά το ιδανικό φίλτρο (Gonzalez & Woods, 1992). Σύμφωνα με τους Gonzalez και Woods (2008), το φίλτρο δεύτερης τάξης αποτελεί καλό συμβιβασμό μεταξύ της απόδοσης στο φιλτράρισμα χαμηλών συχνοτήτων και του φαινομένου δακτυλίων ("ringing effects") που εμφανίζονται στην τελική εικόνα.



Εικόνα 22: Απεικόνιση ενός Butterworth φίλτρου διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων σε (i) δυο διαστάσεις και (ii) τρεις διαστάσεις.

Σε αντίθεση με το αντίστοιχο ιδανικό φίλτρο, το φίλτρο Butterworth εμφανίζει μια σταδιακή, και όχι απότομη, αποκοπή των υψηλών συχνοτήτων (Gonzalez & Woods, 1992).





Εικόνα 23: Αποτέλεσμα εφαρμογής Butterworth φίλτρου (2⁵ τάξης) διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων στο μετασχηματισμό Fourier του ερυθρού καναλιού της πολυφασματικής εικόνας (περιοχή Αχιβαδολίμνη) με συχνότητα αποκοπής (i) D_o =10, (ii) D_o =15, και (iii) D_o =20.

4.1.3 Φίλτρο Gauss διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων

Η συνάρτηση μεταφοράς ενός φίλτρου Gauss $H(\kappa_{x,r},\kappa_{y})$ δίνεται από την εξ. (4.5) (Gonzalez & Woods, 1992):

$$H(\kappa_x,\kappa_y) = \exp[-\frac{D^2(\kappa_x,\kappa_y)}{2D_o^2}], \qquad (4.5)$$

όπου D_o η απόσταση, από την αρχή των αξόνων των συντεταγμένων στο πεδίο συχνοτήτων, που αντιστοιχεί στη συχνότητα αποκοπής και $D(\kappa_{x,},\kappa_{y})$ η απόσταση του σημείου (κ_{x},κ_{y}) από την αρχή των αξόνων, η οποία δίνεται από τις εξ. (4.2) και (4.3), (Gonzalez, Woods & Eddins, 2004).

Ο μετασχηματισμός Fourier ενός φίλτρου Gauss είναι επίσης μια συνάρτηση Gauss, με αποτέλεσμα να μην παρουσιάζονται φαινόμενα δακτυλίων ("ringing effects") στη φιλτραρισμένη εικόνα (Gonzalez, Woods & Eddins, 2004). Αυτό αποτελεί το πλεονέκτημα του φίλτρου Gauss, σε σχέση με τα ιδανικά φίλτρα και φίλτρα Butterworth, όταν η παρουσία τεχνητών σχηματισμών ("artifacts") είναι ανεπιθύμητη. Στην περίπτωση που απαιτείται στενό εύρος της μεταβατικής ζώνης μεταξύ των χαμηλών και υψηλών συχνοτήτων, το Butterworth φίλτρο θεωρείται καλύτερο αλλά παρουσιάζει το μειονέκτημα της εμφάνισης δακτυλίων ("ringing effects"), (Gonzalez, Woods & Eddins, 2004).



Εικόνα 24: Απεικόνιση ενός φίλτρου Gauss διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων σε (i) δυο διαστάσεις και (ii) τρεις διαστάσεις.



(i)

(ii)



Εικόνα 25: Αποτέλεσμα εφαρμογής Gauss φίλτρου διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων στο μετασχηματισμό Fourier του ερυθρού καναλιού της πολυφασματικής εικόνας (περιοχή Αχιβαδολίμνη) με συχνότητα αποκοπής (i) $D_o=10$, (ii) $D_o=15$, και (iii) $D_o=20$.

4.2 Φίλτρα διέλευσης υψηλών συχνοτήτων

Τα συγκεκριμένα φίλτρα χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση της χωρικής πληροφορίας των εικόνων, η οποία απαντά στις υψηλές συχνότητες του φάσματος, αποκόπτοντας τις χαμηλές συχνότητες.

4.2.1 Ιδανικό φίλτρο διέλευσης υψηλών συχνοτήτων

Η συνάρτηση μεταφοράς ενός ιδανικού φίλτρου διέλευσης υψηλών συχνοτήτων *Η*(*κ_x,κ_y*) δίνεται από την παρακάτω εξίσωση (Gonzalez & Woods, 1992):

$$H(\kappa_x, \kappa_y) = \begin{cases} 0, & D(\kappa_x, \kappa_y) \le D_o \\ 1, & D(\kappa_x, \kappa_y) > D_o \end{cases},$$
(4.6)

όπου D_o είναι η απόσταση, από την αρχή των αξόνων των συντεταγμένων στο πεδίο συχνοτήτων, που αντιστοιχεί στη συχνότητα αποκοπής και παίρνει θετικές τιμές, και $D(\kappa_x, \kappa_y)$ η απόσταση του σημείου (κ_x, κ_y) από την αρχή των συντεταγμένων, η οποία δίνεται από τις εξ. (4.2) και (4.3), ανάλογα με τη θέση της αρχής των αξόνων (Gonzalez, Woods & Eddins, 2004).



Εικόνα 26: Απεικόνιση ενός ιδανικού φίλτρου διέλευσης υψηλών συχνοτήτων σε (i) δυο διαστάσεις και (ii) τρεις διαστάσεις.

Όπως και στην περίπτωση του φίλτρου διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων Butterworth, το φίλτρο Butterworth των υψηλών συχνοτήτων προκαλεί δακτυλίους ("ringing effects") γύρω από τα χωρικά στοιχεία της φιλτραρισμένης εικόνας (Gonzalez & Woods, 2008).





(iii)

Εικόνα 27: Αποτέλεσμα εφαρμογής ιδανικού φίλτρου διέλευσης υψηλών συχνοτήτων στο μετασχηματισμό Fourier του ερυθρού καναλιού της πολυφασματικής εικόνας (περιοχή Αχιβαδολίμνη) με συχνότητα αποκοπής (i) $D_o=10$, (ii) $D_o=15$, και (iii) $D_o=20$.

4.2.2 Butterworth φίλτρο διέλευσης υψηλών συχνοτήτων

Η συνάρτηση μεταφοράς ενός φίλτρου Butterworth $H(\kappa_{x,r},\kappa_{y})$ δίνεται από την εξίσωση (Gonzalez & Woods, 1992):

$$H(\kappa_x, \kappa_y) = \frac{1}{1 + \left[\frac{D_o}{D(\kappa_x, \kappa_y)}\right]^{2n}},$$
(4.7)

όπου D_o είναι η απόσταση, από την αρχή των αξόνων των συντεταγμένων στο πεδίο συχνοτήτων, που αντιστοιχεί στη συχνότητα αποκοπής και $D(\kappa_x, \kappa_y)$ η απόσταση του σημείου (κ_x, κ_y) από την αρχή των συντεταγμένων, η οποία προκύπτει από τις εξ. (4.2) και (4.3) (Gonzalez, Woods & Eddins, 2004).



Εικόνα 28: Απεικόνιση Butterworth φίλτρου διέλευσης υψηλών συχνοτήτων σε (i) δυο διαστάσεις και (ii) τρεις διαστάσεις.



Εικόνα 29: Αποτέλεσμα εφαρμογής Butterworth φίλτρου διέλευσης υψηλών συχνοτήτων στο μετασχηματισμό Fourier του ερυθρού καναλιού της πολυφασματικής εικόνας (περιοχή Αχιβαδολίμνη) με συχνότητα αποκοπής (i) $D_o=10$, (ii) $D_o=15$, και (iii) $D_o=20$.
4.2.3 Φίλτρο Gauss διέλευσης υψηλών συχνοτήτων

Η συνάρτηση μεταφοράς του φίλτρου Gauss διέλευσης υψηλών συχνοτήτων $H(\kappa_{x,r},\kappa_{y})$ δίνεται από την (Gonzalez & Woods, 1992):

$$H(\kappa_x,\kappa_y) = 1 - \exp[-\frac{D^2(\kappa_x,\kappa_y)}{2D_o^2}], \qquad (4.8)$$

όπου D_o είναι η απόσταση, από την αρχή των αξόνων των συντεταγμένων στο πεδίο συχνοτήτων, που αντιστοιχεί στη συχνότητα αποκοπής και $D(\kappa_{x,},\kappa_{y})$ η απόσταση του σημείου $(\kappa_{x,}\kappa_{y})$ από την αρχή των αξόνων των συντεταγμένων (Gonzalez, Woods & Eddins, 2004).



Εικόνα 30: Απεικόνιση ενός φίλτρου Gauss διέλευσης υψηλών συχνοτήτων σε (i) δυο διαστάσεις και (ii) τρεις διαστάσεις.



(iii)

Εικόνα 31: Αποτέλεσμα εφαρμογής φίλτρου Gauss διέλευσης υψηλών συχνοτήτων στο μετασχηματισμό Fourier του ερυθρού καναλιού της πολυφασματικής εικόνας (περιοχή Αχιβαδολίμνη) με συχνότητα αποκοπής (i) $D_o=10$, (ii) $D_o=15$, και (ii) $D_o=20$.

4.3 Περίληψη κεφαλαίου

Αποσκοπώντας στην εύρεση του καταλληλότερου ζεύγους φίλτρων, για το διαχωρισμό των συχνοτήτων μιας εικόνας, τα προαναφερθέντα φίλτρα εφαρμόστηκαν στους μετασχηματισμούς Fourier των εικόνων. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής επιβεβαιώνουν τους Gonzalez & Woods (2008), σύμφωνα με τους οποίους τα φίλτρα Gauss δεν προκαλούν, συγκριτικά με τα αντίστοιχα ιδανικά και Butterworth φίλτρα, τεχνητούς σχηματισμούς (π.χ. ringing effects). Συνεπώς κρίθηκαν περισσότερο κατάλληλα για την υλοποίηση των μεθόδων συγχώνευσης που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής (Κεφάλαιο 6).

5 Φιλτράρισμα εικόνων στο πεδίο κυματαριθμών

5.1 Μετασχηματισμός Fourier εικόνας

Ο Γάλλος μαθηματικός Jean Baptiste Joseph Fourier κατέληξε ότι κάθε περιοδική συνάρτηση δύναται να εκφραστεί ως άθροισμα ημιτονοειδών και/ή συνημιτονοειδών συναρτήσεων διαφορετικών συχνοτήτων, έκαστη πολλαπλασιασμένη από μια διαφορετική σταθερά (Gonzalez & Woods, 2008). Αυτό το άθροισμα καλείται «Σειρά Fourier» (Gonzalez & Woods, 2008). Αυτό το άθροισμα καλείται «Σειρά Fourier» (Gonzalez & Woods, 2008). Αυτό το άθροισμα καλείται «Σειρά Fourier» (Gonzalez & Woods, 2008). Αυτό το άθροισμα καλείται «Σειρά Fourier» (Gonzalez & Woods, 2008). Αυτό το άθροισμα καλείται «Σειρά Fourier» (Gonzalez & Woods, 2008). Το ολοκλήρωμα αυτό ορίζεται ως «Μετασχηματισμός Fourier» (Gonzalez & Woods, 2008).

Οι μετασχηματισμοί Fourier είναι γραμμικοί μετασχηματισμοί σήματος. Ο χώρος στον οποίο μεταβάλλεται το σήμα ονομάζεται «Πεδίο Χώρου» και ο χώρος στον οποίο ορίζεται ο μετασχηματισμός Fourier αυτού ονομάζεται «Πεδίο Συχνοτήτων» (Χριστόπουλος, 2003). Όταν το σήμα είναι μια εικόνα, ο μετασχηματισμός Fourier εκφράζει το φάσμα της εικόνας, το οποίο είναι η ανάλυση της στις αρμονικές συνιστώσες από τις οποίες απαρτίζεται και παρέχει ένα μέτρο για τη σχετική σημασία της κάθε συνιστώσας (Μερτίκας, 1999).

5.1.1 Μετασχηματισμός Fourier μονοδιάστατης συνάρτησης

Έστω f(x) συνεχής συνάρτηση πραγματικής μεταβλητής x. Ο μετασχηματισμός Fourier $F(\kappa)$ της f(x) ορίζεται από τη σχέση (Μερτίκας, 1999, Gonzalez & Woods, 1992):

$$F(\kappa) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \exp[-i2\pi\kappa x] dx , \qquad (5.1)$$

όπου i μιγαδικός αριθμός ($i = \sqrt{-1}$) και κ πραγματική μεταβλητή. Χρησιμοποιώντας τη σχέση του Euler

$$e^{i\theta} = \cos(\theta) + i\sin(\theta) \tag{5.2}$$

η 5.1 μπορεί να γραφεί με τη μορφή:

$$F(\kappa) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) [\cos(2\pi\kappa x) - i\sin(2\pi\kappa x)] dx$$
(5.3)

Ουσιαστικά, ο μετασχηματισμός Fourier αποτελεί ένα μετασχηματσμό της f(x)πολλαπλασιασμένο με ημιτονοειδείς και συνημιτονοειδείς όρους, των οποίων οι συχνότητες καθορίζονται από τη μεταβλητή κ (Gonzalez & Wood, 2008). Καθότι η μεταβλητή (κ) αντιστοιχεί σε χωρική συχνότητα, το πεδίο Fourier καλείται πεδίο συχνοτήτων (Gonzalez & Wood, 2008). Οι μονάδες συχνότητας της μεταβλητής κ εξαρτώνται από τις μονάδες της μεταβλητής x. Αν το x έχει μονάδες χρόνου, για παράδειγμα δευτερόλεπτα (seconds), το κ εκφράζεται ως κύκλοι ανά δευτερόλεπτο (cycles/sec) ή Hertz (Hz). Αν το x είναι σε μονάδες απόστασης, για παράδειγμα μέτρα (meters), το κ εκφράζεται σε κύκλους ανά μέτρο (cycles/m).

Η f(x) δύναται να ανακτηθεί από την $F(\kappa)$ χρησιμοποιώντας τον αντίστροφο μετασχηματισμό Fourier (Μερτίκας, 1999, Gonzalez & Woods, 1992):

$$f(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(\kappa) \exp[i2\pi\kappa x] d\kappa$$
(5.4)

Οι σχέσεις (5.1) και (5.4) ισχύουν μόνο αν η f(x) είναι συνεχής και ολοκληρώσιμη και η $F(\kappa)$ ολοκληρώσιμη.

5.1.2 Διακριτός μετασχηματισμός Fourier

Πρόκειται για μετασχηματισμό συναρτήσεων πεπερασμένου μήκους. Έστω g(x) συνεχής συνάρτηση με πεπερασμένο αριθμό δειγμάτων: { $g(x_o)$, $g(x_o + \Delta x)$, $g(x_o + 2\Delta x)$,..., $g(x_o + [N-1]\Delta x)$ }, όπου N ο αριθμός των δειγματοληπτικών σημείων και Δx το διάστημα δειγματοληψίας (Gonzalez & Woods, 1992). Σε αυτή την περίπτωση, ο μετασχηματισμός Fourier $G(\kappa)$ δεν υπολογίζεται σε όλο το εύρος της συνεχούς συνάρτησης g(x) αλλά μόνο στα N δειγματοληπτικά σημεία (Μερτίκας, 1999, Gonzalez & Woods, 1992). Ο εν λόγω μετασχηματισμός αποκαλείται διακριτός μετασχηματισμός Fourier (Discrete Fourier Transform – DFT). Για μονοδιάστατη συνάρτηση εκφράζεται από την εξίσωση:

$$g(x) = \sum_{\kappa=0}^{N-1} G(\kappa) \exp[(i2\pi\kappa x)/N]$$
(5.5)

Ο αντίστροφος διακριτός μετασχηματισμός Fourier δίδεται από την εξ. (5.6):

$$G(\kappa) = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{N-1} g(x) \exp[-(i2\pi\kappa x)/N]$$
(5.6)

Ο διακριτός μετασχηματισμός Fourier όπως στην περίπτωση του συνεχούς μετασχηματισμού Fourier, είναι μιγαδικός και χαρακτηρίζεται από το μέτρο $|G(\kappa)|$ και τη γωνία φάσης $\varphi_g(\kappa)$, (Μερτίκας, 1999):

$$\left|G(\kappa)\right| = \sqrt{\left\{\operatorname{Re}[G(\kappa)]\right\}^2 + \left\{\operatorname{Im}[G(\kappa)]\right\}^2}$$
(5.7)

και

$$\phi_g(\kappa) = \tan^{-1} \frac{\text{Im}[G(\kappa)]}{\text{Re}[G(\kappa)]}$$
(5.8)

5.1.3 Μετασχηματισμός Fourier δισδιάστατης συνάρτησης

Οι ψηφιακές εικόνες απαρτίζονται από $M \ge N$ εικονοστοιχεία και ουσιαστικά συνιστούν συναρτήσεις δυο μεταβλητών που αντιστοιχούν στις συντεταγμένες των εικονοστοιχείων (x,y) (Μερτίκας, 1999). Ο διακριτός μετασχηματισμός Fourier δυο διαστάσεων $G(\kappa_x, \kappa_y)$ μιας εικόνας g(x,y) μεγέθους $M \ge N$ εικονοστοιχείων, ορίζεται ως (Gonzalez and Woods, 1992):

$$g(x,y) = \sum_{\kappa_x=0}^{M-1} \sum_{\kappa_y=0}^{N-1} G(\kappa_x,\kappa_y) \exp[i2\pi((\kappa_x x)/M + (\kappa_y y)/N)]$$
(5.9)

Ο αντίστροφος, δυο διαστάσεων, διακριτός μετασχηματισμός Fourier δίδεται από τη σχέση Gonzalez and Woods, 1992):

$$G(\kappa_x, \kappa_y) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} g(x, y) \exp[-i2\pi((\kappa_x x)/M + (\kappa_y y)/N)]$$
(5.10)

Όταν πρόκειται για πραγματικές συναρτήσεις, όπως οι ψηφιακές εικόνες, ο μετασχηματισμός Fourier $G(\kappa_x, \kappa_y)$ είναι μιγαδικός, δηλαδή αποτελείται από μία πραγματική ($Re(\kappa_x, \kappa_y)$) και μια φανταστική συνιστώσα ($iIm(\kappa_x, \kappa_y)$), (Μερτίκας, 1999, Gonzalez & Woods, 1992):

$$G(\kappa_x, \kappa_y) = \operatorname{Re}[G(\kappa_x, \kappa_y)] + i \operatorname{Im}[G(\kappa_x, \kappa_y)]$$
(5.11)

Η εξίσωση (5.11) παρουσιάζεται συχνά με εκθετική μορφή (εξ. 5.12), (Μερτίκας, 1999, Gonzalez & Woods, 1992).

$$G(\kappa_x,\kappa_y) = |G(\kappa_x,\kappa_y)| \cdot \exp[i\phi(\kappa_x,\kappa_y)] = |G(\kappa_x,\kappa_y)| \cdot \left\{\cos\phi(\kappa_x,\kappa_y) + i\sin\phi(\kappa_x,\kappa_y)\right\} (5.12)$$

όπου

$$G(\kappa_x, \kappa_y) = \sqrt{\left\{ \operatorname{Re}[G(\kappa_x, \kappa_y)] \right\}^2 + \left\{ \operatorname{Im}[G(\kappa_x, \kappa_y)] \right\}^2}$$
(5.13)

και

$$\phi(\kappa_x, \kappa_y) = \tan^{-1} \frac{\operatorname{Im}[G(\kappa_x, \kappa_y)]}{\operatorname{Re}[G(\kappa_x, \kappa_y)]}$$
(5.14)

Η συνάρτηση ονομάζεται $G(\kappa_x, \kappa_y)$ καλείται φάσμα Fourier της συνάρτησης g(x, y) και το μέτρο $|G(\kappa_x, \kappa_y)|$ αυτής αποτελεί το πλάτος του φάσματος (Εικόνα 32(ii) & 32(iii)). Η γωνία $\varphi(\kappa_x, \kappa_y)$ ονομάζεται γωνία φάσης του φάσματος (Εικόνα 32iv)). Το τετράγωνο του φάσματος:

$$P(\kappa_x,\kappa_y) = \left| G(\kappa_x,\kappa_y) \right|^2 = \left\{ \operatorname{Re}[G(\kappa_x,\kappa_y)] \right\}^2 + \left\{ \operatorname{Im}[G(\kappa_x,\kappa_y)] \right\}^2$$
(5.15)

συνιστά το φάσμα ισχύος, γνωστό και ως συνάρτηση φασματικής πυκνότητας της g(x,y), (Μερτίκας, 1999, Gonzalez & Woods, 1992).

Δεδομένου ότι ο μετασχηματισμός Fourier μιας εικόνας είναι μιγαδικός αριθμός, προκειμένου να μελετηθεί το φάσμα αυτής, το πλάτος και η γωνία φάσης του φάσματος εξετάζονται χωριστά.

Το μέτρο του φάσματος Fourier μιας εικόνας είναι συνήθως αρκετά μεγαλύτερο από αυτό που μπορεί να αναπαράγει μία οθόνη (Μερτίκας, 1999, Gonzalez and Woods, 1992). Προκειμένου να γίνει εφικτή η απεικόνιση του φάσματος στην οθόνη πραγματοποιείται συμπίεση του εύρους των τιμών του φάσματος βάσει της σχέσης (Gonzalez and Woods, 1992):

$$D(\kappa_{x},\kappa_{y}) = c \cdot \log\{1 + |G(\kappa_{x},\kappa_{y})|\} = c \cdot \log\{1 + \sqrt{\{\operatorname{Re}[G(\kappa_{x},\kappa_{y})]\}^{2} + \{\operatorname{Im}[G(\kappa_{x},\kappa_{y})]\}^{2}\}}$$
(5.16)

Η λογαριθμική συνάρτηση πραγματοποιεί την επιθυμητή συμπίεση. Το *c* είναι ένας συντελεστής κλίμακας (Μερτίκας, 1999, Gonzalez and Woods, 1992).



(iii)

(iv)

Εικόνα 32: (i) Τμήμα παγχρωματικής εικόνας Quickbird, (ii) πλάτος φάσματος Fourier πριν τη συμπίεση του εύρους τιμών του φάσματος, (iii) πλάτος φάσματος Fourier μετά τη συμπίεση του εύρους τιμών του φάσματος , (iv) γωνία φάσης του φάσματος Fourier.

Στην Εικόνα 33 παρουσιάζονται το μέτρο και η φάση του φάσματος εικόνων από δυο διαφορετικές περιοχές μελέτης (παγχρωματική εικόνα, περιοχές Αχιβαδολίμνη και Πάχαινα). Τα μέτρα των δυο εικόνων εμφανίζουν έντονο αρμονικό περιεχόμενο στις χαμηλές χωρικές συχνότητες (κέντρο των εικόνων του μέτρου του μετασχηματισμού Fourier) και συγκεκριμένα με διευθύνσεις κάθετες στις διευθύνσεις όπου στην αρχική εικόνα υπάρχει απότομη μεταβολή των τιμών του επιπέδου του γκρι. Αντιθέτως, οι απεικονίσεις των φάσεων του φάσματος αυτών εμφανίζουν τυχαία κατανομή στον χώρο και η σύγκριση αυτών είναι ανέφικτη.



Εικόνα 33: (i) Περιοχή Αχιβαδολίμνη, (ii) μέτρο φάσματος μετασχηματισμού εικόνας 26(i), (iii) φάση φάσματος μετασχηματισμού εικόνας 26(i), (iv) περιοχή Πάχαινα, (v) μέτρο φάσματος μετασχηματισμού εικόνας 26(iv), (vi) φάση φάσματος μετασχηματισμού εικόνας 26(iv).

5.1.4 Ιδιότητες μετασχηματισμού Fourier

Περιοδικότητα

Όμοια με την περίπτωση του μονοδιάστατου μετασχηματισμού Fourier, ο ευθύς και ο αντίστροφος δισδιάστατος μετασχηματισμός είναι απείρως περιοδικοί κατά τις διευθύνσεις κ_x και κ_y (Gonzalez & Woods, 2008). Συνεπώς ισχύει (Gonzalez & Woods, 2008):

$$G(\kappa_x, \kappa_y) = G(\kappa_x + aM, \kappa_y) = G(\kappa_x, \kappa_y + bN) = G(\kappa_x + aM, \kappa_y + bN), \quad (5.17)$$

και

$$g(x, y) = g(x + aM, y) = g(x, y + bN) = g(x + aM, y + bN),$$
(5.18)

όπου α και b ακέραιοι αριθμοί.

Μετατόπιση και Περιστροφή

Από τις σχέσεις (5.9) και (5.10) προκύπτει (Gonzalez & Woods, 2008):

$$g(x, y) \cdot \exp[i \cdot 2\pi \cdot (\kappa_{xo} \cdot x/M + \kappa_{yo} \cdot y/N)] \Leftrightarrow G(\kappa_x - \kappa_{xo}, \kappa_y - \kappa_{yo})^{-2}$$
(5.19)

και

$$g(x - x_o, y - y_o) \Leftrightarrow G(\kappa_x, \kappa_y) \cdot \exp[-i \cdot 2\pi \cdot (\kappa_x \cdot x_o / M + \kappa_y \cdot y_o / N)]$$
(5.20)

Δηλαδή, πολλαπλασιασμός της g(x,y) με την εκθετική συνάρτηση επιφέρει μετατόπιση της αρχής συντεταγμένων του μετασχηματισμού Fourier στο σημείο (κ_{xo} , κ_{yo}), και αντίστροφα, πολλαπλασιασμός της $G(\kappa_x, \kappa_y)$ με τον αρνητικό της εκθετικής συνάρτησης μετατοπίζει την αρχή συντεταγμένων της g(x,y) στο σημείο (x_o, y_o) (Gonzalez & Woods, 2008).

Χρησιμοποιώντας τις πολικές συντεταγμένες

 $x = r \cdot \cos(\theta)$, $y = r \cdot \sin(\theta)$ και

$$\kappa_{\gamma} = \omega \cdot \cos(\phi) \, , \, \kappa_{\gamma} = \omega \cdot \sin(\phi)$$

προκύπτει το εξής ζεύγος μετασχηματισμού Fourier (Gonzalez & Woods, 2008):

² Το σύμβολο ⇔ υποδηλώνει ζεύγος μετασχηματισμού Fourier.

$$g(r,\theta+\theta_o) \Leftrightarrow G(\omega,\phi+\theta_o) \tag{5.21}$$

Η παραπάνω σχέση υποδηλώνει ότι περιστροφή της g(x,y) κατά γωνία θ_o προκαλεί περιστροφή της $G(\kappa_x, \kappa_y)$ κατά την ίδια γωνία. Αντίστροφα, περιστρέφοντας την $G(\kappa_x, \kappa_y)$ η g(x,y) περιστρέφεται κατά την ίδια γωνία (Gonzalez & Woods, 2008).

> Συμμετρία

- Αν η συνάρτηση g(x,y) είναι πραγματική, ισχύει G(-κ_x,-κ_y)=[G(κ_x,κ_y)]^{*}, όπου G(κ_x,κ_y) ο μετασχηματισμός Fourier της g(x,y) και [G(κ_x,κ_y)]^{*} ο συζυγής μιγαδικός αριθμός του μετασχηματισμού Fourier G(κ_x,κ_y) (Gonzalez & Woods, 2008, Μερτίκας, 1999).
- Αν η συνάρτηση g(x,y) είναι φανταστική, ισχύει $-G(\kappa_x,\kappa_y)=[G(-\kappa_x,-\kappa_y)]^*$ (Gonzalez & Woods, 2008, Μερτίκας, 1999).
- Αν η συνάρτηση g(x,y) είναι άρτια, ισχύει G(-κ_x,-κ_y)=G(κ_x,κ_y). Δηλαδή και ο μετασχηματισμός Fourier αυτής είναι επίσης άρτια συνάρτηση (Μερτίκας, 1999, Χριστόπουλος, 2003).
- Αν η συνάρτηση g(x,y) είναι περιττή, ισχύει G(-κ_x,-κ_y)=-G(κ_x,κ_y). Δηλαδή και ο μετασχηματισμός Fourier αυτής είναι περιττή συνάρτηση (Μερτίκας, 1999, Χριστόπουλος, 2003).
- Αν η συνάρτηση g(x,y) είναι πραγματική και άρτια, η συνάρτηση G(κ_x,κ_y) είναι επίσης πραγματική και άρτια (Gonzalez & Woods, 2008, Μερτίκας, 1999, Χριστόπουλος, 2003).
- Αν η συνάρτηση g(x,y) είναι πραγματική και περιττή, η συνάρτηση $G(\kappa_x,\kappa_y)$ είναι φανταστική και περιττή (Gonzalez & Woods, 2008).
- Αν η συνάρτηση g(x,y) είναι φανταστική και άρτια, η συνάρτηση $G(\kappa_x,\kappa_y)$ είναι φανταστική και άρτια (Gonzalez & Woods, 2008).
- Αν η συνάρτηση g(x,y) είναι φανταστική και περιττή, η συνάρτηση G(κ_x,κ_y) είναι πραγματική και περιττή (Gonzalez & Woods, 2008, Μερτίκας, 1999, Χριστόπουλος, 2003).
- Αν η συνάρτηση g(x,y) είναι μιγαδική και άρτια, η συνάρτηση G(κ_x,κ_y) είναι επίσης μιγαδική και άρτια (Gonzalez & Woods, 2008).
- Αν η συνάρτηση g(x,y) είναι μιγαδική και περιττή, η συνάρτηση G(κ_x,κ_y) είναι επίσης μιγαδική και περιττή (Gonzalez & Woods, 2008).

- Όταν υπάρχει αλλαγή κλίμακας, που εκφράζεται από μια σταθερά α, στο πεδίο του χώρου (δηλαδή η συνάρτηση g(x,y) γίνεται g(ax,ay)), για το μετασχηματισμό Fourier της g ισχύει 1/|a| G(κ/a, κ/y) / (Μερτίκας, 1999, Χριστόπουλος, 2003).
- Όταν υπάρχει αλλαγή κλίμακας, που εκφράζεται από μια σταθερά *b*, στο πεδίο συχνοτήτων (δηλαδή η συνάρτηση $G(\kappa_x, \kappa_y)$ γίνεται $G(b\kappa_x, b\kappa_y)$), για τον αντίστροφο μετασχηματισμό Fourier της *G* ισχύει $\frac{1}{|b|}g\left(\frac{x}{b}, \frac{y}{b}\right)$ (Μερτίκας, 1999,

Χριστόπουλος, 2003).

Γραμμικότητα

Εφόσον οι συναρτήσεις $g_1(x,y)$ και $g_2(x,y)$ αποτελούν ζεύγη μετασχηματισμού Fourier με τις $G_1(x,y)$ και $G_2(x,y)$ αντίστοιχα, ισχύει(Gonzalez & Woods, 2008):

$$ag_1(x, y) + bg_2(x, y) \Leftrightarrow aG_1(\kappa_x, \kappa_y) + bG_2(\kappa_x, \kappa_y)$$
(5.22)

Επισημαίνεται ότι στην περίπτωση πολυφασματικών εικόνων ο μετασχηματισμός Fourier εφαρμόζεται χωριστά σε κάθε φασματικό κανάλι.

5.1.5 Ταχύς μετασχηματισμός Fourier

Έστω εικόνα με μέγεθος $M \ge N$ εικονοστοιχεία. Από την εξίσωση (5.9) είναι εμφανές ότι παράγεται ένα φάσμα με $M \ge N$ όρους, που συνήθως είναι όλοι μιγαδικοί αριθμοί (Gonzalez & Woods, 1992). Για κάθε όρο του φάσματος Fourier απαιτούνται $M \ge N$ πολλαπλασιασμοί και σχεδόν άλλες τόσες προσθέσεις (Gonzalez & Woods, 1992). Συνεπώς η διαδικασία υπολογισμού το διακριτού μετασχηματισμού Fourier είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα. Προκειμένου να επιταχυνθεί η διαδικασία υπολογισμού του διακριτού μετασχηματισμού Fourier εικόνας χρησιμοποιείται ο ταχύς μετασχηματισμός Fourier (Fast Fourier Transform - FFT), που επιτυγχάνει μείωση των απαιτούμενων πράξεων για τον υπολογισμό του φάσματος σε πλήθος ανάλογο της τάξης $MNlog_2MN$ (Gonzalez & Woods, 2008). Αυτό επιτυγχάνεται με ανάλυση του δισδιάστατου μετασχηματισμού Fourier σε δυο μονοδιάστατους διακριτούς μετασχηματισμούς, εκ των οποίων ο ένας εφαρμόζεται στις γραμμές και ο άλλος στις στήλες της εικόνας (Gonzalez & Woods, 1992).

5.1.6 Θεώρημα της Συνέλιξης

Η συνέλιξη δυο συναρτήσεων *f(x)* και *g(x)* δηλώνεται με το σύμβολο * και μαθηματικά ορίζεται ως (Μερτίκας, 1999, Χριστόπουλος, 2003):

$$f(x) * g(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(X)g(x - X)dX$$
(5.23)

Σύμφωνα με το θεώρημα της συνέλιξης, ο μετασχηματισμός Fourier της συνέλιξης δυο συναρτήσεων ισούται με το γινόμενο των μετασχηματισμών Fourier των συναρτήσεων αυτών, και αντίστροφα (Μερτίκας, 1999).

5.2 Βασικές αρχές φιλτραρίσματος στο χώρο συχνοτήτων

Η εφαρμογή των φίλτρων διέλευσης υψηλών και χαμηλών συχνοτήτων μπορεί να γίνει:

απευθείας στα δεδομένα της αρχικής εικόνας (Πεδίο Χώρου), ή

- στο φάσμα Fourier της αρχικής εικόνας (Πεδίο Συχνοτήτων).

Και στις δυο περιπτώσεις η διαδικασία του φιλτραρίσματος βασίζεται στη συνέλιξη της εικόνας f(x,y) με ένα φίλτρο h(x,y) (Gonzalez, Woods & Eddins, 2004). Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής πραγματοποιήθηκε εφαρμογή φίλτρων διέλευσης χαμηλών και υψηλών συχνοτήτων μόνο στο φάσμα Fourier των εικόνων.

Αρχή του φιλτραρίσματος εικόνων στο πεδίο συχνοτήτων είναι η απομάκρυνση των υψηλών ή χαμηλών συχνοτήτων των εικόνων και ανάκτηση του αποτελέσματος, στο πεδίο του χώρου, με εφαρμογή του αντίστροφου μετασχηματισμού Fourier (Gonzalez & Woods, 2008).

Έστω, στο πεδίο του χώρου, εικόνα f(x,y) που προκύπτει από τη συνέλιξη μιας εικόνας g(x,y) με μια συνάρτηση h(x,y), που αντιστοιχεί σε κάποιο φίλτρο εικόνας:

$$f(x, y) = g(x, y) * h(x, y)$$
(5.24)

Σύμφωνα με το θεώρημα της συνέλιξης, στο πεδίο των συχνοτήτων ισχύει:

$$F(\kappa_x, \kappa_y) = G(\kappa_x, \kappa_y) * H(\kappa_x, \kappa_y), \qquad (5.25)$$

όπου *F*, *G* και *H* είναι οι μετασχηματισμοί Fourier των *f*, *g* και *h* αντίστοιχα (Gonzalez & Woods, 1992). Η συνάρτηση $H(\kappa_{x,},\kappa_{y})$ καλείται συνάρτηση μεταφοράς του φίλτρου (transfer function) και η $F(\kappa_{x,},\kappa_{y})$ αντιστοιχεί στο φιλτραρισμένο φάσμα της εικόνας $G(\kappa_{x,},\kappa_{y})$ (Μερτίκας, 1999).

Προκειμένου να διευκολυνθεί η οπτική παρατήρηση του φάσματος και του φίλτρου, καθώς και η διαδικασία φιλτραρίσματος, προτιμάται οι συναρτήσεις μεταφοράς φίλτρου που χρησιμοποιούνται να είναι συμμετρικές γύρω από το κέντρο τους. Σε αυτές τις περιπτώσεις είναι απαραίτητο η συνάρτηση $G(\kappa_x, \kappa_y)$ να είναι επίσης κεντραρισμένη (Gonzalez & Woods, 2008). Αυτό επιτυγχάνεται με πολλαπλασιασμό του μετασχηματισμού Fourier της εικόνας με το $(-1)^{x+y}$ (Gonzalez, Woods & Eddins, 2003). Το $(-1)^{x+y}$ προκύπτει θέτοντας $\kappa_{xo} = M/2$ και $\kappa_{yo} = N/2$ στην εκθετική συνάρτηση της σχέσης (5.19), όπου M/2 και N/2 οι συντεταγμένες του κέντρου της εικόνας του φάσματος (Εικόνα 34 (ii)).



Εικόνα 34: (i) Πλάτος φάσματος Fourier της παγχρωματικής εικόνας (περιοχή Αχιβαδολίμνη), (ii) μετατόπιση του φάσματος στο κέντρο της εικόνας του.

Ο διαχωρισμός των συχνοτήτων σε χαμηλές και υψηλές είναι αρκετά ευδιάκριτος στο φάσμα των εικόνων. Οι χαμηλές συχνότητες βρίσκονται στο κέντρο του φάσματος (π.χ. ανοιχτόχρωμες περιοχές στην Εικόνα 34(ii) και οι υψηλές συχνότητες προς την περιφέρεια αυτού (π.χ. σκουρόχρωμες περιοχές στην Εικόνα

34(ii)). Συνεπώς, η επιλογή του φίλτρου που θα χρησιμοποιηθεί για την ενίσχυση ή αποδυνάμωση συγκεκριμένων συχνοτήτων καθίσταται ευκολότερη.

Όταν πρόκειται για φίλτρα μεγάλων διαστάσεων, όπως αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, το φιλτράρισμα εικόνων στο πεδίο συχνοτήτων είναι υπολογιστικά ταχύτερο από το φιλτράρισμα το πεδίο του χώρου (Gonzalez, Woods & Eddins, 2003).

Αναλυτικά, η διαδικασία που ακολουθείται για το φιλτράρισμα εικόνων στο πεδίο συχνοτήτων είναι:

- 1. Πολλαπλασιασμός της αρχικής εικόνας g(x,y) με τον παράγοντα $(-1)^{(x+y)}$ (Gonzalez, Woods & Eddins, 2003).
- Υπολογισμός του μετασχηματισμού Fourier G(κ_x, κ_y) της εικόνας που προέκυψε στο προηγούμενο στάδιο.
- Δημιουργία νέου φιλτραρισμένου φάσματος F(κ_x,κ_y), με πολλαπλασιασμό του μετασχηματισμού Fourier G(κ_x,κ_y) με τη συνάρτηση μεταφοράς του φίλτρου H(κ_x,κ_y).
- 4. Υπολογισμός του αντίστροφου μετασχηματισμού Fourier f(x,y) του φάσματος $F(\kappa_{x,r},\kappa_{y})$.
- Πολλαπλασιασμός του πραγματικού μέρους της f(x,y) με το (-1)^(x+y) για επαναφορά της αρχής των συντεταγμένων του φάσματος στην αρχική τους θέση.

Η προαναφερθείσα διαδικασία φιλτραρίσματος περιγράφεται σχηματικά στην Εικόνα 35.



Εικόνα 35: Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας φιλτραρίσματος στο πεδίο συχνοτήτων.

5.3 Περίληψη κεφαλαίου

Στο Κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκαν μερικές από τις βασικές έννοιες της θεωρίας των μετασχηματισμών Fourier και της εφαρμογής αυτών σε εικόνες. Στο επόμενο Κεφάλαιο αναλύονται οι νέες μέθοδοι που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια της διατριβής, οι οποίες βασίζονται στην εφαρμογή φίλτρων διέλευσης συχνοτήτων (Κεφάλαιο 4) στους μετασχηματισμούς Fourier των προς συγχώνευση εικόνων.

6 Συγχώνευση εικόνων με μεθόδους που βασίζονται σε φιλτράρισμα των μετασχηματισμών Fourier

Στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής αναπτύχθηκε μία μέθοδος συγχώνευσης που βασίζεται στο φιλτράρισμα των αρχικών εικόνων στο πεδίο συχνοτήτων και άλλες δεκατρείς μέθοδοι που αφορούν το συνδυασμό αυτής με το μετασχηματισμό "Á trous" και την ανάλυση κυρίων συνιστωσών. Στην Ενότητα 6.1 παρατίθεται αναλυτικά η πρώτη μέθοδος και στις Ενότητες 6.2-6.4 αναλύονται οι συνδυασμοί αυτής με τους προαναφερθέντες μετασχηματισμούς.

Η υλοποίηση και εφαρμογή αυτών στις διαθέσιμες δορυφορικές εικόνες πραγματοποιήθηκε με χρήση του λογισμικού MATLAB® 6.5 v. 13. Οι εικόνες που προέκυψαν παρατίθενται στο Παράρτημα Ι. Οι μέθοδοι αυτές αξιολογήθηκαν οπτικά καθώς και με χρήση των στατιστικών εκτιμητών που αναφέρονται στο όγδοο Κεφάλαιο. Τα συγκριτικά αποτελέσματα παρουσιάζονται επίσης στο Κεφάλαιο 8.

6.1 Συγχώνευση εικόνων μετά από φιλτράρισμα στο πεδίο συχνοτήτων (Frequency Domain Filtering Fusion - FDFF)

Η πρώτη μέθοδος που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής βασίζεται στην εφαρμογή, στο πεδίο συχνοτήτων, φίλτρων διέλευσης υψηλών και χαμηλών συχνοτήτων στην παγχρωματική και τα επιμέρους κανάλια της πολυφασματικής εικόνας αντίστοιχα. Στη συνέχεια οι φιλτραρισμένες εικόνες επαναφέρονται στο πεδίο του χώρου όπου τα φασματικά κανάλια τα οποία περιλαμβάνουν, πλέον, κυρίως τις χαμηλές συχνότητες συγχωνεύονται με τη φιλτραρισμένη παγχρωματική εικόνα που περιέχει τις υψηλές συχνότητες.. Στην Εικόνα 36 παρουσιάζεται σχεδιάγραμμα της μεθόδου.

Παρακάτω παρατίθενται αναλυτικά τα στάδια που ακολουθήθηκαν κατά την υλοποίηση της μεθόδου. Επισημαίνεται ότι πριν την υλοποίηση του πρώτου σταδίου πραγματοποιήθηκε επανάληψη δειγματοληψίας (resampling) των εικονοστοιχείων της αρχικής πολυφασματικής εικόνας, προκειμένου αυτή να αποκτήσει διαστάσεις εικονοστοιχείου ίδιες με της παγχρωματικής.

Στάδιο 1°: Υπολογισμός του μετασχηματισμού Fourier της παγχρωματικής εικόνας $P(\kappa_x, \kappa_y)$ και των επιμέρους καναλιών της πολυφασματικής $M_i(\kappa_x, \kappa_y)$, όπου το *i* αντιστοιχεί στο εγγύς υπέρυθρο, ερυθρό, πράσινο ή ιώδες κανάλι.

- Στάδιο 2°: Μετάθεση της αρχής των συντεταγμένων της εικόνας του φάσματος του μετασχηματισμού των εικόνων στο κέντρο αυτών με πολλαπλασιασμό του φάσματος με τον παράγοντα (-1)^(x+y) (βλ. Εικόνα 34, Ενότητα 5.2).
- Στάδιο 3°: Επιλογή της κατάλληλης συχνότητας αποκοπής *D*_o. Σύμφωνα με τους Gonzalez and Woods (2008) μια καλή επιλογή τιμών για το *D*_o είναι πλησίον του κέντρου του φάσματος, μεταξύ 2% και 5% της μικρής διάστασης της εικόνας. Για τις εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν κατά την υλοποίηση της συγκεκριμένης μεθόδου συγχώνευσης δοκιμάστηκαν όλα τα *D*_o που βρίσκονται εντός του προαναφερθέντος εύρους τιμών. Για τις ανάγκες της παρούσας εφαρμογής, ο βέλτιστος διαχωρισμός των υψηλών και χαμηλών συχνοτήτων επιτεύχθηκε με τιμή του *D*_o ίση με 3,15% της διάστασης της εικόνας που χρησιμοποιήθηκε (διαστάσεις εικόνας: 476 γραμμές x 476 στήλες).
- Στάδιο 4°: (i) Εφαρμογή φίλτρου Gauss διέλευσης υψηλών συχνοτήτων στο φάσμα της παγχρωματικής εικόνας.
 - (ii) Εφαρμογή φίλτρου Gauss διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων στα φάσματα των επιμέρους καναλιών της πολυφασματικής.
- Στάδιο 5°: Επαναφορά της αρχής των συντεταγμένων του φάσματος των φιλτραρισμένων εικόνων στην αρχική τους θέση με πολλαπλασιασμό του νέου φάσματος με τον παράγοντα (-1)^(x+y).
- Στάδιο 6°: Συνδυασμός της φιλτραρισμένης παγχρωματικής εικόνας με κάθε φιλτραρισμένο φασματικό κανάλι. Η συγχώνευση ολοκληρώνεται με επαναφορά των συνδυασμένων εικόνων στο πεδίο του χώρου υπολογισμό του αντίστροφου μετασχηματισμού Fourier. Αποτέλεσμα της συγχώνευσης είναι η δημιουργία τεσσάρων νέων εικόνων που διατηρούν τη χωρική ανάλυση της παγχρωματικής εικόνας και τη φασματική πληροφορία του εκάστοτε καναλιού.
- Στάδιο 7°: Συνδυασμός των συγχωνευμένων φασματικών καναλιών για τη δημιουργία ψευδοχρωματικών εικόνων RGB.



Εικόνα 36: Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου συγχώνευσης εικόνων FDFF

6.2 Συγχώνευση με συνδυασμό των μεθόδων FDFF και PCA

Οι μέθοδοι που αναλύονται σε αυτή την Ενότητα έχουν διαχωριστεί σε δυο κατηγορίες, βάσει των δεδομένων στα οποία εφαρμόζεται ο μετασχηματισμός Fourier. Συγκεκριμένα, στην πρώτη κατηγορία (Ενότητα 6.2.1) ο μετασχηματισμός Fourier εφαρμόζεται παράλληλα στην παγχρωματική εικόνα και στις κύριες συνιστώσες της πολυφασματικής εικόνας. Στην δεύτερη κατηγορία (Ενότητα 6.2.2) ο μετασχηματισμός Fourier εφαρμόζεται μόνο στην παγχρωματική εικόνα.

6.2.1 Εφαρμογή μετασχηματισμού Fourier σε κύριες συνιστώσες και παγχρωματική εικόνα

Διακρίνονται τρεις διαφορετικές περιπτώσεις, ανάλογα με τον τρόπο εισαγωγής της προερχόμενης από την παγχρωματική εικόνα χωρικής πληροφορίας στην πολυφασματική εικόνα. Και στις τρεις αυτές μεθόδους τα αρχικά στάδια που ακολουθήθηκαν για την υλοποίηση τους είναι κοινά:

- 1. Ανάλυση της αρχικής πολυφασματικής εικόνας σε κύριες συνιστώσες.
- 2. Μετασχηματισμός Fourier κυρίων συνιστωσών και της παγχρωματικής εικόνας.
- Εφαρμογή φίλτρου διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων (XΣ) στο φάσμα Fourier των κυρίων συνιστωσών και εκτέλεση του αντίστροφου μετασχηματισμού Fourier.
- Εφαρμογή φίλτρου διέλευσης υψηλών συχνοτήτων (ΥΣ) στο φάσμα Fourier της παγχρωματικής εικόνας και εκτέλεση του αντίστροφου μετασχηματισμού Fourier.

Στην πρώτη περίπτωση (FDFF-PCA_Περ.Α) η χωρική πληροφορία της παγχρωματικής εικόνας εισάγεται στην πολυφασματική με αντικατάσταση της φιλτραρισμένης τρίτης κύριας συνιστώσας (3_η K.Σ._X.Σ.) από τη φιλτραρισμένη παγχρωματική εικόνα. Σχηματικά, η μέθοδος παρουσιάζεται στην Εικόνα 37.

Στην δεύτερη περίπτωση (FDFF-PCA_Περ.Β) η φιλτραρισμένη παγχρωματική εικόνα προστίθεται σε κάθε φιλτραρισμένη κύρια συνιστώσα (Εικόνα 38).

Στην τρίτη περίπτωση (FDFF-PCA_Περ.Γ) η φιλτραρισμένη παγχρωματική εικόνα προστίθεται στην φιλτραρισμένη πρώτη κύρια συνιστώσα (I_{η} K.Σ._X.Σ.). Σχηματικά, η μέθοδος παρουσιάζεται στην Εικόνα 39.

Και στις τρεις προαναφερθείσες μεθόδους, μετά την εισαγωγή της χωρικής πληροφορίας, η διαδικασία συγχώνευσης ολοκληρώνεται με εφαρμογή του αντίστροφου μετασχηματισμού κυριών συνιστωσών.



Εικόνα 37: Σχηματικό διάγραμμα της μεθόδου συγχώνευσης εικόνων FDFF-PCA_Περ.Α. $(1_{\eta} / 2_{\eta} / 3_{\eta} K.\Sigma._X.\Sigma.: πρώτη / δεύτερη / τρίτη φιλτραρισμένη κύρια συνιστώσα). ΠΓ: η παγχρωματική εικόνα που προέκυψε μετά το ταίριασμα του ιστογράμματος της αρχικής παγχρωματικής στο ιστόγραμμα της <math>1^{\eta\varsigma} K.\Sigma$.



Εικόνα38: Σχηματικό διάγραμμα της μεθόδου συγχώνευσης FDFF-PCA_Περ.Β.



Εικόνα 39: Σχηματικό διάγραμμα της μεθόδου συγχώνευσης FDFF-PCA_Περ.Γ.

6.2.2 Εφαρμογή μετασχηματισμού Fourier στην παγχρωματική εικόνα

Αντίστοιχα με την ενότητα 6.2.1, ανάλογα με τον τρόπο προσθήκης της χωρικής πληροφορίας της παγχρωματικής εικόνας στην πολυφασματική εικόνα διακρίνονται τρεις περιπτώσεις. Και σε αυτή την περίπτωση, τα πρώτα στάδια που ακολουθήθηκαν για την υλοποίηση των κάτωθι τριών μεθόδων είναι κοινά:

- 1. Ανάλυση της αρχικής πολυφασματικής εικόνας σε κύριες συνιστώσες.
- 2. Μετασχηματισμός Fourier της παγχρωματικής εικόνας.
- Ξφαρμογή φίλτρου διέλευσης υψηλών συχνοτήτων στο φάσμα Fourier της παγχρωματικής εικόνας και εκτέλεση του αντίστροφου μετασχηματισμού Fourier.

Στην πρώτη περίπτωση (FDFFπαγχρ-PCA_Περ.Α) η προσθήκη της χωρικής πληροφορίας στην πολυφασματική εικόνα πραγματοποιείται με αντικατάσταση της τρίτης κύριας συνιστώσας (3_n K.Σ.) από τη φιλτραρισμένη παγχρωματική εικόνα, (Εικόνα 40).

Στην δεύτερη περίπτωση (FDFFπαγχρ-PCA_Περ.Β) η φιλτραρισμένη παγχρωματική εικόνα προστίθεται σε κάθε κύρια συνιστώσα. Σχηματικά, η μέθοδος παρουσιάζεται στην Εικόνα 41.

Στην τρίτη περίπτωση (FDFFπαγχρ-PCA_Περ.Γ) η φιλτραρισμένη παγχρωματική εικόνα προστίθεται μόνο στην πρώτη κύρια συνιστώσα (1, Κ.Σ.), (Εικόνα 42). Μετά την εισαγωγή της χωρικής πληροφορίας η συγχώνευση ολοκληρώνεται με εφαρμογή του αντίστροφου μετασχηματισμού κυριών συνιστωσών.



Εικόνα 40: Σχηματικό διάγραμμα της FDFFπαγχρ-PCA_Περ.Α μεθόδου συγχώνευσης.



Εικόνα 41: Σχηματικό διάγραμμα της FDFFπαγχρ-PCA_Περ.Β μεθόδου συγχώνευσης.



Εικόνα 42: Σχηματικό διάγραμμα της FDFFπαγχρ-PCA_Περ.Γ μεθόδου συγχώνευσης.

6.3 Συγχώνευση με συνδυασμό της FDFF και του μετασχηματισμού "Á trous"

Τα στάδια που ακολουθήθηκαν για τη υλοποίηση αυτής της μεθόδου (Εικόνα 43) είναι:

- 1. Εφαρμογή μετασχηματισμού "Á trous" στην αρχική πολυφασματική εικόνα.
- 2. Μετασχηματισμός Fourier της παγχρωματικής εικόνας.
- Εφαρμογή φίλτρου διέλευσης υψηλών συχνοτήτων στο φάσμα Fourier της παγχρωματικής εικόνας και εκτέλεση του αντίστροφου μετασχηματισμού Fourier.
- Πρόσθεση της φιλτραρισμένης παγχρωματικής εικόνας στις χαμηλής χωρικής ανάλυσης αναπαραστάσεις των επιμέρους καναλιών της πολυφασματικής, όπως αυτές προέκυψαν από το τελευταίο επίπεδο διάσπασης της πολυφασματικής.



Εικόνα 43: Σχηματικό διάγραμμα της συγχώνευσης εικόνων με συνδυασμό της FDFF και του μετασχηματισμού " Á trous" (R^{l} , G^{l} και B^{l} : προσεγγίσεις των αρχικών καναλιών (R, G και B) της πολυφασματικής εικόνας, R^{2} , G^{2} και B^{2} : προσεγγίσεις των R^{l} , G^{l} και B^{l} , αντίστοιχα).

6.4 Συγχώνευση με συνδυασμό της FDFF με τους μετασχηματισμούς "Á trous" και PCA

Σε αντιστοιχία με την Ενότητα 6.2, οι μέθοδοι που παρουσιάζονται στην παρούσα ενότητα επίσης διαχωρίζονται σε δυο διαφορετικές κατηγορίες. Στην πρώτη κατηγορία (Ενότητα 6.4.1) ο μετασχηματισμός Fourier εφαρμόζεται παράλληλα στην παγχρωματική εικόνα και στις εικόνες που προέκυψαν από το μετασχηματισμό "Á trous" των κυριών συνιστωσών της πολυφασματικής. Στην δεύτερη κατηγορία (Ενότητα 6.4.2) ο μετασχηματισμός εφαρμόζεται μόνο στην παγχρωματική εικόνα.

6.4.1 Εφαρμογή μετασχηματισμού Fourier στη παγχρωματική εικόνα και στις εικόνες που προέκυψαν από το μετασχηματισμό "Á trous" των κυριών συνιστωσών της πολυφασματικής εικόνας

Βάσει του τρόπου εισαγωγής της χωρικής πληροφορίας της παγχρωματικής εικόνας στην πολυφασματική διακρίνονται τρεις διαφορετικές μέθοδοι συγχώνευσης. Και σε αυτή την περίπτωση, τα πρώτα στάδια που ακολουθήθηκαν για την υλοποίηση αυτών είναι κοινά:

 Ανάλυση της αρχικής πολυφασματικής εικόνας σε κύριες συνιστώσες και εφαρμογή του μετασχηματισμού "Á trous" σε αυτές.

- Εφαρμογή φίλτρου διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων στο φάσμα Fourier των εικόνων που προέκυψαν στο προηγούμενο στάδιο και εκτέλεση του αντίστροφου μετασχηματισμού Fourier.
- 3. Μετασχηματισμός Fourier της παγχρωματικής εικόνας.
- Εφαρμογή φίλτρου διέλευσης υψηλών συχνοτήτων στο φάσμα Fourier της παγχρωματικής εικόνας και εκτέλεση του αντίστροφου μετασχηματισμού Fourier.

Στην πρώτη περίπτωση (FDFF-Á trousPCA_Περ.Α) η μετασχηματισμένη και μετέπειτα φιλτραρισμένη τρίτη κύρια συνιστώσα (3ηKΣ_2(XΣ)) αντικαθίσταται από τη φιλτραρισμένη παγχρωματική εικόνα (Εικόνα 44).

Στην δεύτερη περίπτωση (FDFF-Á trousPCA_Περ.Β) η φιλτραρισμένη παγχρωματική εικόνα προστίθεται σε κάθε μετασχηματισμένη και μετέπειτα φιλτραρισμένη κύρια συνιστώσα. (Εικόνα 45).

Στην τρίτη περίπτωση (FDFF-Á trousPCA_Περ.Γ) η φιλτραρισμένη παγχρωματική εικόνα προστίθεται στη μετασχηματισμένη και μετέπειτα φιλτραρισμένη πρώτη κύρια συνιστώσα. Σχηματικά η μέθοδος παρουσιάζεται στην Εικόνα 46.

Το τελευταίο στάδιο για την αποπεράτωση της διαδικασίας συγχώνευσης είναι η εφαρμογή αντίστροφου μετασχηματισμού κυριών συνιστωσών, μετά την εισαγωγή της χωρικής πληροφορίας της παγχρωματικής εικόνας στην πολυφασματική εικόνα.



Εικόνα 44: Σχηματικό διάγραμμα της FDFF- Á trousPCA_Περ.Α. $(1_{\eta} / 2_{\eta} / 3_{\eta} K\Sigma_2)$: προσεγγίσεις της πρώτης / δεύτερης / τρίτης κύριας συνιστώσας που προέκυψαν από το δεύτερο επίπεδο διάσπασης της πολυφασματικής με το μετασχηματισμό " Á trous", $1_{\eta} / 2_{\eta} / 3_{\eta} K\Sigma_2(X\Sigma)$: οι προαναφερθείσες εικόνες μετά την εφαρμογή φίλτρου διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων).



Εικόνα 45: Σχηματικό διάγραμμα της FDFF- Á trousPCA_Περ.Β.



Εικόνα 46: Σχηματικό διάγραμμα της FDFF- Á trousPCA_Περ.Γ.

6.4.2 Εφαρμογή μετασχηματισμού Fourier στην παγχρωματική εικόνα

Όμοια με τις Ενότητες 6.2.1, 6.2.2 και 6.4.1, ανάλογα με τον τρόπο προσθήκης της χωρικής πληροφορίας της παγχρωματικής στην πολυφασματική εικόνα διακρίνονται τρεις διαφορετικές μέθοδοι συγχώνευσης. Τα τρία πρώτα στάδια υλοποίησης των τεχνικών συγχώνευσης που εμπίπτουν στη συγκεκριμένη κατηγορία είναι κοινά και για τις τρεις αυτές μεθόδους. Τα στάδια αυτά είναι:

- Ανάλυση της αρχικής πολυφασματικής εικόνας σε κύριες συνιστώσες και εφαρμογή του μετασχηματισμού "Á trous" σε αυτές.
- 2. Μετασχηματισμός Fourier της παγχρωματικής εικόνας.
- Εφαρμογή φίλτρου διέλευσης υψηλών συχνοτήτων στο φάσμα Fourier της παγχρωματικής εικόνας και εκτέλεση του αντίστροφου μετασχηματισμού Fourier.
 Στην πρώτη περίπτωση (FDFFπαγχρ.-Á trousPCA Περ.Α) η εισαγωγή της χωρικής

πληροφορίας γίνεται με αντικατάσταση της μετασχηματισμένης τρίτης κύριας συνιστώσας από τη φιλτραρισμένη παγχρωματική εικόνα (Εικόνα 47).

Στην δεύτερη περίπτωση (FDFFπαγχρ.-Á trousPCA_Περ.Β) η φιλτραρισμένη παγχρωματική εικόνα προστίθεται σε κάθε μετασχηματισμένη κύρια συνιστώσα (Εικόνα 48).

Στην τρίτη περίπτωση (FDFFπαγχρ.-Á trousPCA_Περ.Γ) η φιλτραρισμένη παγχρωματική εικόνα προστίθεται στην μετασχηματισμένη πρώτη κύρια συνιστώσα. Σχηματικά η μέθοδος περιγράφεται στην Εικόνα 49.

Όμοια με τις προηγούμενες Ενότητες, η συγχώνευση ολοκληρώνεται με την εφαρμογή του αντίστροφου μετασχηματισμού κυριών συνιστωσών.



Εικόνα 47: Σχηματικό διάγραμμα της μεθόδου FDFFπαγχρ.- Á trousPCA_Περ.Α.



Εικόνα 48: Σχηματικό διάγραμμα της μεθόδου FDFFπαγχρ.- Α΄ trousPCA_Περ.Β.



Εικόνα 49: Σχηματικό διάγραμμα της μεθόδου FDFFπαγχρ.- Á trousPCA_Περ.Γ.

6.5 Περίληψη κεφαλαίου

Το παρόν Κεφάλαιο αφορά εις τις νέες μεθόδους που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια της διατριβής. Ουσιαστικά προτάθηκαν 14 νέες μέθοδοι. Η πρώτη μέθοδος (FDFF) αποτέλεσε τη βάση για ανάπτυξη περαιτέρω νέων μεθόδων, οι οποίες αποτελούν συνδυασμό αυτής είτε με το μετασχηματισμό "Á trous", είτε με την Ανάλυση Κυριών Συνιστωσών ή με αμφότερες τις μεθόδους ταυτόχρονα. Ανάλογα με τις εικόνες στις οποίες εφαρμόζεται αρχικά ο μετασχηματισμός Fourier (πολυφασματική και παγχρωματική ή μόνο παγχρωματική) οι προαναφερθέντες συνδυασμοί διαχωρίζονται σε υποπεριπτώσεις (Ενότητες 6.2.1, 6.2.2, 6.4.1 και 6.4.2). Στο επόμενο Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα δεδομένα στα οποία εφαρμόστηκαν οι νέες μέθοδοι, καθώς και οι μέθοδοι που αναλύονται στο Κεφάλαιο 3.

7 Δεδομένα και περιοχές μελέτης

7.1 Δορυφορικά δεδομένα

Οι δορυφορικές εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής προέρχονται από τον εμπορικό δορυφόρο Quickbird (ημερομηνία λήψης: 20 Ιουνίου 2003). Η επιλογή εικόνων προερχόμενων από το συγκεκριμένο δορυφόρο βασίστηκε στην υψηλή χωρική ανάλυση αυτού (0,61m x 0,61m) στο παγχρωματικό κανάλι) που επιτρέπει τη χωρική διάκριση γειτονικών αντικειμένων που εμφανίζονται στην εικόνα και έχουν διαστάσεις μεγαλύτερες των 61 εκατοστών. Συνδυασμός της καλής χωρικής διακριτικής ικανότητας με τη φασματική πληροφορία που προέρχεται από τον πολυφασματικό ανιχνευτή του ίδιου δορυφόρου επιτρέπει την ποιοτική αναγνώριση αντικειμένων, όπως οικίες, φυτά, δέντρα, δεξαμενές, αυτοκίνητα κ.α. Βάσει της συμπεριφοράς στο ορατό και εγγύς υπέρυθρο τμήμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας είναι εφικτός ο διαχωρισμός βλάστησης σε υγιείς και μη υγιείς μονάδες.

Στον Πίνακα 1 αναφέρονται αναλυτικά τα χαρακτηριστικά των φασματικών καναλιών των ανιχνευτών του δορυφόρου Quickbird. Το παγχρωματικό κανάλι εκτείνεται από το ορατό μέχρι και το εγγύς υπέρυθρο (450nm -900nm) και έχει χωρική διακριτική ικανότητα 0,61m x 0,61m. Από τα υπόλοιπα τέσσερα κανάλια (χωρική διακριτική ικανότητα (2,44m x 2,44m), τα πρώτα τρία (ιώδες, πράσινο και ερυθρό) ανήκουν στο ορατό φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και το τέταρτο στο εγγύς υπέρυθρο.

Φασματικά κανάλια	Φασματική περιοχή	Φασματική	Χωρική
		διακριτική	Διακριτική
		ικανότητα (nm)	ικανότητα (m)
Pan	Παγχρωματικό	450-900	0,61
1	Ιώδες	450-520	2,44
2	Πράσινο	520-600	2,44
3	Ερυθρό	630-690	2,44
4	Εγγύς Υπέρυθρο	760-900	2,44

Πίνακας 1: Φασματικά και χωρικά χαρακτηριστικά των καναλιών του δορυφόρου Quickbird (Πηγή: Digital Globe®, 2004).

Στον Πίνακα 2 αναγράφονται γενικά χαρακτηριστικά που αφορούν το δορυφόρο Quickbird και την τροχιά αυτού.

Ημερομηνία εκτόξευσης	18 Οκτωβρίου 2001	
Σύστημα καταγραφής ακτινοβολίας	Διανυσματικής καταγραφής	
Ύψος πτήσης	450 km	
Τροχιά	Ηλιο-σύγχρονη	
Γωνία κλίσης τροχιάς	97,2°	
Ταχύτητα	25.560 km/h	
Περίοδος περιστροφής	93,5 min	
Χρόνος διέλευσης ισημερινού	10:30 π.μ.	
Επαναληπτικότητα	1 – 3,5 ημέρες ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος	
Πλάτος λωρίδας εικόνας	16,5 km	

Πίνακας 2: Γενικά χαρακτηριστικά του δορυφόρου Quickbird (Πηγή: Digital Globe®, 2004).

7.2 Περιοχές μελέτης

Οι περιοχές στις οποίες εφαρμόστηκαν οι μέθοδοι συγχώνευσης εικόνων που υλοποιήθηκαν στα πλαίσια της διατριβής βρίσκονται στη νήσο Μήλο (Κυκλάδες) (Εικόνα. 36). Η πρώτη περιοχή μελέτης είναι ένα αποκατεστημένο, με τη μέθοδο της δεντροφύτευσης, παλιό λατομείο περλίτη (Εικόνα 37). Το λατομείο αυτό βρίσκεται στην ευρύτερη περιοχή της Αχιβαδολίμνης, στο νότιο τμήμα του όρμου της Μήλου. Η δεύτερη περιοχή μελέτης είναι ένα λατομείο μπετονίτη στην περιοχή Πάχαινα (ΒΔ Μήλος, Εικόνα 38). Μόνο τμήματα του συγκεκριμένου λατομείου έχουν ήδη αποκατασταθεί με δεντροφύτευση. Στο υπόλοιπο κείμενο τα δυο λατομεία θα αναφέρονται με το όνομα της ευρύτερης περιοχής στην οποία βρίσκονται, δηλαδή περιοχή Αχιβαδολίμνη και περιοχή Πάχαινα.



Εικόνα 36: Γεωγραφική θέση της Νήσου Μήλος, Κυκλάδες.



Εικόνα 37: Σύνθετη ψευδοχρωματική (RGB) δορυφορική εικόνα Quickbird. Εντός του κόκκινου πλαισίου διακρίνεται το αποκατεστημένο λατομείο περλίτη στην περιοχή της Αχιβαδολίμνης.



Εικόνα 38: Σύνθετη ψευδοχρωματική (RGB) δορυφορική εικόνα Quickbird της Ν. Μήλος. Εντός του κόκκινου πλαισίου διακρίνεται το λατομείο μπετονίτη της περιοχής Πάχαινα.

Για την αποκατάσταση των λατομείων χρησιμοποιούνται αυτοφυή φυτά, όπως Κέδρος, Φίδα, Σχίνος, Αλμύρα ή Αλμυρίκι κ.α. Η τοπική χλωρίδα της Μήλου είναι προσαρμοσμένη στο μεσογειακό κλίμα της νήσου (Ευμεσογειακή ζώνη βλάστησης). Απαρτίζεται από φυτά που έχουν μηχανισμούς αντοχής στην ανομβρία των θερινών μηνών καθώς και από φυτά που ευδοκιμούν σε αλατούχα εδάφη. Ως προς το μέγεθος, η βλάστηση της Μήλου εμφανίζεται με μορφή θάμνων και μικρών δέντρων, το ύψος των οποίων σπάνια υπερβαίνει τα 10m (πηγή: Μεταλλευτικό μουσείο Μήλου). Παράδειγμα της φυτοκάλυψης στο αποκατεστημένο λατομείο της Αχιβαδολίμνης δίδεται στις φωτογραφίες των Εικόνων 39 και 40.



Εικόνα 39: Αχιβαδολίμνη: Βόρειο-Ανατολικό τμήμα αποκατεστημένης με δεντροφύτευση περιοχής



Εικόνα 40: Αχιβαδολίμνη: Βόρειο-Δυτικό τμήμα αποκατεστημένης με δεντροφύτευση περιοχής

Αν και πρόκειται για είδη που αντέχουν στις δύσκολες εδαφοκλιματικές συνθήκες του νησιού, η υγιής και ομαλή ανάπτυξη της βλάστησης που φυτεύεται στα υπό αποκατάσταση λατομεία δεν είναι εγγυημένη. Ακόμη και αν η δεντροφύτευση είναι επιτυχημένη, το φαινόμενο της υπερβόσκησης είναι έντονο και αποτελεί μεγάλη και μόνιμη απειλή για τη θαμνώδη βλάστηση ή τα μικρής ηλικίας δέντρα.

Η χωρική ανάλυση των παγχρωματικών εικόνων Quickbird επιτρέπει τη διάκριση αντικειμένων με μεγέθη αντίστοιχα των θάμνων και δέντρων που απαντούν στη Μήλο. Η πολυφασματική εικόνα Quickbird παρέχει τη δυνατότητα εντοπισμού και αναγνώρισης της βλάστησης. Συγχώνευση των δυο εικόνων επιτρέπει τον ακριβή εντοπισμό ενός φυτού στον χώρο και δίδει πληροφορίες για το στάδιο ωριμότητας ή την υγεία αυτού.

8 Αξιολόγηση της απόδοσης των μεθόδων συγχώνευσης

Η διάκριση της βλάστησης και η παρακολούθηση της ανάπτυξης αυτής με δορυφορικές εικόνες απαιτεί τη συνδυασμένη χρήση εικόνων υψηλής χωρικής και φασματικής ανάλυσης. Αυτό επιτυγχάνεται με συγχώνευση της παγχρωματικής με την πολυφασματική εικόνα, με απώτερο στόχο τη βέλτιστη διατήρηση της χωρικής και φασματικής πληροφορίας παράλληλα. Οι μέθοδοι συγχώνευσης που αναπτύχθηκαν και εφαρμόστηκαν στην παρούσα διατριβή αξιολογήθηκαν με στατιστικά και οπτικά κριτήρια, ως προς τη διατήρηση της χωρικής και φασματικής πληροφορίας που περιέχουν η παγχρωματική και πολυφασματική εικόνα. Κάθε μία από τις Ενότητες που ακολουθούν αναφέρεται σε ένα από τους στατιστικούς εκτιμητές που χρησιμοποιήθηκαν. Τα αποτελέσματα των εκτιμητών παρουσιάζονται με τη μορφή διαγραμμάτων στο τέλος κάθε Ενότητας.

8.1 Χωρική πληροφορία συγχωνευμένων εικόνων

Η αξιολόγηση της ποιότητας της γωρικής πληροφορίας των συγγωνευμένων εικόνων είναι περίπλοκη και βασίζεται κυρίως στον οπτικό έλεγχο των εικόνων. Από βιβλιογραφική έρευνα προέκυψε ότι ο περισσότερο διαδεδομένος εκτιμητής της διατήρησης της χωρικής πληροφορίας εικόνων είναι ο συντελεστής συσχέτισης υψηλών συχνοτήτων (High Pass Correlation Coefficient) (Zhou et al., 1998, Marcelino et al., 2003, Otazu et al., 2005, Pradhan, 2005). Ο συντελεστής παίρνει τιμές στο διάστημα [-1 1]. Όσο περισσότερο πλησιάζει η τιμή του συντελεστή το 1, τόσο μεγαλύτερο το ποσοστό της χωρικής πληροφορίας της παγχρωματικής εικόνας που εισήχθη στη πολυφασματική. Πρόκειται για ένα συντελεστή συσχέτισης γνωρισμάτων της εικόνας που απαντούν σε υψηλές συχνότητες. Η χρήση του συντελεστή βασίζεται στην αρχή ότι η χωρική πληροφορία μιας εικόνας συγκεντρώνεται κυρίως στις υψηλές συγνότητες (Zhou et al., 1998, Pradhan, 2005, Marcelino et al., 2003). Με εφαρμογή φίλτρων διέλευσης υψηλών συχνοτήτων σε μια εικόνα είναι εφικτό να απομονωθούν και να διατηρηθούν μόνο τα υψηλής συχνότητας στοιχεία. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το κάτωθι φίλτρο Laplace διέλευσης υψηλών συχνοτήτων (W_L) (Zhou et al., 1998, Otazu et al., 2005, Pradhan, 2005, Marcelino et al., 2003):

 $W_L = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$

Αυτό το φίλτρο Laplace εφαρμόστηκε στην παγχρωματική και στις συγχωνευμένες εικόνες.
Γενικά, οι μέθοδοι που βασίζονται στη χρήση του μετασχηματισμού Fourier εμφανίζουν καλή χωρική απόδοση. Η βασική μέθοδος που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής (FDFF), καθώς και οι μέθοδοι FDFF-Á Trous-PCA_Περ.Γ (*HPCC*≥97%), FDFFπαγχρ-Á Trous (*HPCC*≥96%), και FDFFπαγχρ-Á Trous-PCA_Περ.Γ (*HPCC*≥95%) εμφανίζουν καλή χωρική απόδοση για τα περισσότερα κανάλια, ανεξάρτητα του συνδυασμού αυτών και της περιοχής μελέτης. Επισημαίνεται ότι μόνο στην μέθοδο FDFF ο συντελεστής χωρικής συσχέτισης λαμβάνει τιμή ίση με τη μονάδα (*HPCC*=1), το οποίο υποδηλώνει πλήρη διατήρηση της αρχικής χωρικής πληροφορίας. Συγκεκριμένα, τιμή συντελεστή ίση με τη μονάδα εμφανίζουν, και στις δυο περιοχές μελέτης, το ερυθρό και πράσινο κανάλι στην περίπτωση του συνδυασμού καναλιών Εγγύς υπέρυθρο – Ερυθρό – Πράσινο. Το εγγύς υπέρυθρο εμφανίζει τιμή ίση με τη μονάδα στην περιοχή Πάχαινα και *HPCC*=0,99 στην περιοχή Αχιβαδολίμνη.

8.1.(i) Περιοχή Αχιβαδολίμνη





Εικόνα 41: Συντελεστής χωρικής συσχέτισης. Περιοχή Αχιβαδολίμνη. Φασματικά κανάλια:Ιώδες - Πράσινο - Ερυθρό.



Εικόνα 42: Συντελεστής χωρικής συσχέτισης. Περιοχή Αχιβαδολίμνη. Φασματικά κανάλια Ιώδες - Πράσινο – Εγγύς





Εικόνα 50: Συντελεστής χωρικής συσχέτισης. Περιοχή Αχιβαδολίμνη. Φασματικά κανάλια: Πράσινο – Ερυθρό – Εγγύς υπέρυθρο.

8.1.(ii) Περιοχή Πάχαινα



Εικόνα 51: Συντελεστής χωρικής συσχέτισης. Περιοχή Πάχαινα. Φασματικά κανάλια:Ιώδες - Πράσινο - Ερυθρό.



Εικόνα 52: Συντελεστής χωρικής συσχέτισης. Περιοχή Πάχαινα. Φασματικά κανάλια:Ιώδες - Πράσινο – Εγγύς υπέρυθρο.



Εικόνα 53: Συντελεστής χωρικής συσχέτισης. Περιοχή Πάχαινα. Φασματικά κανάλια: Πράσινο – Ερυθρό – Εγγύς υπέρυθρο.

8.2 Φασματική πληροφορία συγχωνευμένων εικόνων

Προκειμένου να εκτιμηθεί η φασματική πληροφορία των συγχωνευμένων εικόνων, σε σχέση με την αρχική πολυφασματική, χρησιμοποιήθηκαν αμφότερα οπτικά και στατιστικά μέτρα σύγκρισης. Ο στατιστικός έλεγχος βασίστηκε στη χρήση εκτιμητών που υπολογίζουν το ποσοστό μεταβολής των τιμών φωτεινότητας των εικονοστοιχείων των συγχωνευμένων εικόνων, σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές στην αρχική πολυφασματική εικόνα. Οι εκτιμητές που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή αυτών, παρουσιάζονται στις Ενότητες του παρόντος Κεφαλαίου.

8.2.1 Συντελεστής Συσχέτισης

Πρόκειται για δείκτη της συσχέτισης μεταξύ δυο εικόνων και παίρνει τιμές στο διάστημα [-1, 1]. Για τους σκοπούς της παρούσας διατριβής, η τιμή +1 είναι η ιδανική, καθώς αναπαριστά τη μέγιστη συσχέτιση μεταξύ δυο εικόνων. Ο συντελεστής συσχέτισης ($C_k(f,m)$) δίνεται από τη σχέση:

$$C_k(f,m) = \frac{\sum_{i,j=1}^{MN} (f_k(i,j) - E\{f_k(i,j)\})(m_k(i,j) - E\{m_k(i,j)\})}{\sqrt{\sum_{i,j=1}^{MN} (f_k(i,j) - E\{f_k(i,j)\})^2 \sum_{i,j=1}^{MN} (m_k(i,j) - E\{m_k(i,j)\})^2}}$$

Στην παραπάνω σχέση τα f και m αντιπροσωπεύουν τη συγχωνευμένη και πολυφασματική εικόνα αντίστοιχα, $E\{f\}$ και $E\{m\}$ τις μέσες τιμές αυτών αντίστοιχα, i και j τις συντεταγμένες των εικονοστοιχείων και k το φασματικό κανάλι το οποίο αφορά ο συντελεστής συσχέτισης. Οι τιμές των f και m κυμαίνονται στο διάστημα [0 1].

Στο κείμενο της παρούσας διατριβής, η αναφορά στο συγκεκριμένο στατιστικό εκτιμητή θα γίνεται με χρήση του όρου «συντελεστής φασματικής συσχέτισης», προκειμένου να διαχωριστεί από το «συντελεστή χωρικής συσχέτισης» που αναφέρεται στην Ενότητα 8.1.

Από τις νέες μεθόδους που αναπτύχθηκαν στη διατριβή καλή φασματική απόδοση παρουσίασαν οι μέθοδοι FDFFπαγχρ-PCA_Περ.Α (*C*_k≥97%) και FDFFπαγχρ-PCA_Περ.Γ (*C*_k≥96%). Από τις υπόλοιπες μεθόδους, το υψηλότερο ποσοστό διατήρησης της φασματικής πληροφορίας εμφάνισαν οι μέθοδοι:

- Á Trous-PCA_ $\Pi \epsilon \rho.A$ ($C_k \ge 98\%$),

- Á Trous-PCA_ $\Pi \epsilon \rho$. Γ ($C_k \ge 98\%$)
- Mallat-PCA (*C*^{*k*} ≥98%), και
- PCA_Περ.Γ ($C_k \ge 97\%$).

8.2.1.(i) Περιοχή Αχιβαδολίμνη



Εικόνα 54: Συντελεστής φασματικής συσχέτισης. Περιοχή Αχιβαδολίμνη. Φασματικά κανάλια: Ιώδες– Πράσινο – Ερυθρό.



Εικόνα 55: Συντελεστής φασματικής συσχέτισης. Περιοχή Αχιβαδολίμνη. Φασματικά κανάλια: Ιώδες– Πράσινο – Εγγύς υπέρυθρο.



Εικόνα 56: Συντελεστής φασματικής συσχέτισης. Περιοχή Αχιβαδολίμνη. Φασματικά κανάλια: Πράσινο – Ερυθρό – Εγγύς υπέρυθρο.

8.2.1.(ii) Περιοχή Πάχαινα



Εικόνα 57: Συντελεστής φασματικής συσχέτισης. Περιοχή Πάχαινα. Φασματικά κανάλια: Ιώδες– Πράσινο – Ερυθρό



Εικόνα 58: Συντελεστής φασματικής συσχέτισης. Περιοχή Πάχαινα. Φασματικά κανάλια Ιώδες– Πράσινο – Εγγύς υπέρυθρο.



Εικόνα 59: Συντελεστής φασματικής συσχέτισης. Περιοχή Πάχαινα. Φασματικά κανάλια: Πράσινο – Ερυθρό – Εγγύς υπέρυθρο.

8.2.2 Ρίζα Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος

Η ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (Root Mean Square Error – RMSE) εκφράζεται από την τετραγωνική ρίζα του λόγου του αθροίσματος των τετραγώνων της διαφοράς των δυο εικόνων, διαιρεμένου με το συνολικό αριθμό των εικονοστοιχείων (Otazu *et al.*, 2005, Pradhan, 2005, Vijayaraj, 2004):

$$RMSE_{k} = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{m,n=1}^{M,N} (f_{k}(i,j) - m_{k}(i,j))^{2}},$$

όπου $M \ge N$ ο συνολικός αριθμός των εικονοστοιχείων και kο αριθμός φασματικού καναλιού (k=1,2,...,n,όπου n ο συνολικός αριθμός καναλιών της πολυφασματικής εικόνας).

Από τις νέες μεθόδους που αναπτύχθηκαν στην παρούσα διατριβή, χαμηλότερο σφάλμα παρουσιάζουν οι FDFFπαγχρ-PCA_Περ.Α, FDFFπαγχρ-PCA_Περ.Β, FDFFπαγχρ-PCA_Περ.Γ, PCA_Περ.Β και PCA_Περ.Γ. Μικρό σφάλμα εμφανίζουν και οι μέθοδοι Mallat-IHS, Mallat-PCA και Mallat.

8.2.2.(i) Περιοχή Αχιβαδολίμνη



Εικόνα 60: Ρίζα μέσου τετραγωνικού σφάλματος. Περιοχή Αχιβαδολίμνη. Φασματικά κανάλια: Ιώδες-Πράσινο – Ερυθρό.



Εικόνα 61: Ρίζα μέσου τετραγωνικού σφάλματος Περιοχή Αχιβαδολίμνη. Φασματικά κανάλια: Ιώδες– Πράσινο – Εγγύς υπέρυθρο.



Εικόνα 62: Ρίζα μέσου τετραγωνικού σφάλματος Περιοχή Αχιβαδολίμνη. Φασματικά κανάλια: Πράσινο – Ερυθρό –Εγγύς υπέρυθρο.

8.2.2.(ii) Περιοχή Πάχαινα



Συνδυασμός φασματικών καναλιών: Ιώδες- Πράσινο - Ερυθρό

Εικόνα 63: Ρίζα μέσου τετραγωνικού σφάλματος Περιοχή Πάχαινα. Φασματικά κανάλια: Ιώδες– Πράσινο – Ερυθρό



Εικόνα 64: Ρίζα μέσου τετραγωνικού σφάλματος Περιοχή Πάχαινα. Φασματικά κανάλια Ιώδες- Πράσινο - Εγγύς υπέρυθρο.



Εικόνα 65: Ρίζα μέσου τετραγωνικού σφάλματος. Περιοχή Πάχαινα. Φασματικά κανάλια: Πράσινο – Ερυθρό – Εγγύς υπέρυθρο.

8.2.3 Σχετική Μετατόπιση της μέσης τιμής ιστογράμματος

Το ιστόγραμμα μιας εικόνας αποτελεί γραφική απεικόνιση της συχνότητας εμφάνισης των εικονοστοιχείων που χαρακτηρίζονται από συγκεκριμένη τιμή τόνου του γκρι. Κατ' επέκταση, οποιαδήποτε αλλαγή επηρεάζει τις τιμές φωτεινότητας των εικονοστοιχείων δύναται να γίνει άμεσα αντιληπτή στο ιστόγραμμα της εικόνας.

Καμία από τις υπάρχουσες, μέχρι σήμερα, τεχνικές συγχώνευσης δεν επιτυγχάνει μηδενική αλλοίωση των τιμών φωτεινότητας του κάθε καναλιού μετά την ολοκλήρωση των διαδικασιών συγχώνευσης. Όσο μικρότερες όμως είναι οι μεταβολές που παρουσιάζει το ιστόγραμμα της συγχωνευμένης εικόνας, σε σχέση με της πολυφασματικής, τόσο περισσότερη φασματική πληροφορία έχει διατηρηθεί στην συγχωνευμένη εικόνα. Η χρήση δεικτών που περιγράφουν τις μεταβολές στο ιστόγραμμα μιας εικόνας αποτελούν χρήσιμα μέτρα αξιολόγησης της αποδοτικότητας κάθε μεθόδου συγχώνευσης

Η σχετική μετατόπιση της μέσης τιμής ιστογράμματος (Relative Shift in the Mean - RSM) περιγράφει τις μετατοπίσεις που υφίσταται το ιστόγραμμα μετά από επεξεργασία της εικόνας. Εκφράζεται από τον λόγο της διαφοράς των μέσων τιμών της συγχωνευμένης και πολυφασματικής εικόνας προς τη μέση τιμή της πολυφασματικής εικόνας:

$$RSM\% = \frac{E\{f_k(i,j)\} - E\{m_k(i,j)\}}{E\{m_k(i,j)\}}\%$$

Από τις νέες μεθόδους που αναπτύχθηκαν στη διατριβή, μικρότερη μετατόπιση μέσης τιμής ιστογράμματος παρουσιάζουν οι FDFF, FDFFπαγχρ-PCA_Περ.Β και FDFFπαγχρ-PCA_Περ.Γ. Από τις υπόλοιπες μεθόδους χαμηλότερη μετατόπιση προέκυψε μετά την εφαρμογή των μεθόδων Ά Trous-PCA_Περ.Α και Α΄ Trous-IHS.

8.2.3.(i) Περιοχή Αχιβαδολίμνη



Εικόνα 66: Σχετική μετατόπιση μέσης τιμής ιστογράμματος. Περιοχή Αχιβαδολίμνη. Φασματικά κανάλια: Ιώδες-Πράσινο - Ερυθρό.





Εικόνα 67: Σχετική μετατόπιση μέσης τιμής ιστογράμματος. Περιοχή Αχιβαδολίμνη. Φασματικά κανάλια: Ιώδες-Πράσινο - Εγγύς υπέρυθρο.





Εικόνα 68: Σχετική μετατόπιση μέσης τιμής ιστογράμματος. Περιοχή Αχιβαδολίμνη. Φασματικά κανάλια: Πράσινο – Ερυθρό –Εγγύς υπέρυθρο.

8.2.3.(ii) Περιοχή Πάχαινα



Εικόνα 69: Σχετική μετατόπιση μέσης τιμής ιστογράμματος. Περιοχή Πάχαινα. Φασματικά κανάλια: Ιώδες-Πράσινο - Ερυθρό



Εικόνα 70: Σχετική μετατόπιση μέσης τιμής ιστογράμματος. Περιοχή Πάχαινα. Φασματικά κανάλια Ιώδες–Πράσινο – Εγγύς υπέρυθρο.



Εικόνα 71: Σχετική μετατόπιση μέσης τιμής ιστογράμματος. Περιοχή Πάχαινα. Φασματικά κανάλια: Πράσινο – Ερυθρό –Εγγύς υπέρυθρο.

8.2.4 Τυπική απόκλιση

Αντίστοιχα με τη μετατόπιση μέσης τιμής, η τυπική απόκλιση αποτελεί ακόμα ένα τρόπο περιγραφής του ιστογράμματος μιας εικόνας. Συγκεκριμένα, η τυπική απόκλιση (Standard Deviation – StD) παρέχει πληροφορίες για το εύρος του ιστογράμματος (Vijayaraj, 2004). Συνεπώς, μεταβολές στην τυπική απόκλιση του ιστογράμματος αντικατοπτρίζουν αλλαγές στην κατανομή των τιμών φωτεινότητας των εικονοστοιχείων μετά τη συγχώνευση των εικόνων (Vijayaraj, 2004). Η τυπική απόκλιση ιστογράμματος δίδεται από την τετραγωνική ρίζα του λόγου του αθροίσματος της διαφοράς μεταξύ μιας εικόνας (g(*i*,*j*)) και τη μέση τιμή αυτής ($E{g(i,j)}$), προς το συνολικό αριθμό των εικονοστοιχείων:

$$StD_{k} = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{i,j=1}^{MN} (g_{k}(i,j) - E\{g_{k}^{2}(i,j)\})}$$

Η διαφορά τυπικής απόκλισης μεταξύ των καναλιών της συγχωνευμένης και της πολυφασματικής εικόνας χρησιμοποιήθηκε ως δείκτης της διατήρησης της αρχικής φασματικής πληροφορίας στην συγχωνευμένη εικόνα.

Ο συνδυασμός της σχετικής μετατόπισης μέσης τιμής ιστογράμματος και της διαφοράς στην τυπική απόκλιση αυτού, μεταξύ συγχωνευμένων και αρχικών φασματικών καναλιών, παρέχει πληροφορίες για τη μεταβολή της κατανομής των επιπέδων του γκρι σε κάθε κανάλι.

Οι μέθοδοι Α΄ Trous-IHS, Α΄ Trous-PCA_Περ.Α και σε μικρότερο βαθμό η Α΄ Trous-PCA_Περ.Β παρουσιάζουν τη μικρότερη διαφορά τυπικής απόκλισης μεταξύ των ιστογραμμάτων των αρχικών και συγχωνευμένων καναλιών.

Από τις νέες μεθόδους που αναπτύχθηκαν στη διατριβή, οι FDFFπαγχρ-Å Trous-PCA_Περ.Α και FDFFπαγχρ-Å Trous-PCA_Περ.Γ εμφανίζουν σχετικά μικρές διαφορές τυπικών αποκλίσεων.

8.2.4.(i) Περιοχή Αχιβαδολίμνη



Εικόνα 72: Τυπική απόκλιση. Περιοχή Αχιβαδολίμνη. Φασματικά κανάλια: Ιώδες- Πράσινο - Ερυθρό.



Εικόνα 73: Τυπική απόκλιση. Περιοχή Αχιβαδολίμνη. Φασματικά κανάλια: Ιώδες-Πράσινο - Εγγύς υπέρυθρο.



Εικόνα 74: Τυπική απόκλιση. Περιοχή Αχιβαδολίμνη. Φασματικά κανάλια: Πράσινο – Ερυθρό –Εγγύς υπέρυθρο.

8.2.4.(ii) Περιοχή Πάχαινα



Εικόνα 75: Τυπική απόκλιση. Περιοχή Πάχαινα. Φασματικά κανάλια: Ιώδες-Πράσινο - Ερυθρό



Εικόνα 76: Τυπική απόκλιση.. Περιοχή Πάχαινα. Φασματικά κανάλια Ιώδες-Πράσινο - Εγγύς υπέρυθρο.



Εικόνα 77: Τυπική απόκλιση. Περιοχή Πάχαινα. Φασματικά κανάλια: Πράσινο – Ερυθρό –Εγγύς υπέρυθρο.

8.2.5 Κανονικοποιημένος δείκτης βλάστησης NDVI

Καθότι η παρούσα διατριβή εστιάζει στην παρακολούθηση της βλάστησης, κρίθηκε σκόπιμο να χρησιμοποιηθεί και ένας δείκτης βλάστησης για την αξιολόγηση του ποσοστού της φασματικής πληροφορίας που διατηρήθηκε στις συγχωνευμένες εικόνες. Επιλέχθηκε η χρήση του κανονικοποιημένου δείκτη βλάστησης NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) επειδή αποτελεί έναν από τους πλέον διαδομένους δείκτες, για την παρακολούθηση και το διαχωρισμό της βλάστησης. Ορίζεται από το λόγο:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

όπου τα NIR και R αντιστοιχούν στο εγγύς υπέρυθρο και ερυθρό κανάλι αντίστοιχα (Μερτίκας, 1999). Οι τιμές του NDVI κυμαίνονται στο διάστημα -1 έως 1 (Vijayaraj, 2004). Τιμές κοντά στο 1 υποδεικνύουν πυκνή και υγιή βλάστηση. Γενικά, η υγιής βλάστηση παρουσιάζει υψηλότερες τιμές NDVI από την ασθενή βλάστηση. Τιμές πλησίον του μηδενός ή του -1 υποδεικνύουν περιοχές ακάλυπτες από βλάστηση, όπως γυμνά εδάφη ή υδάτινες μάζες

Υπολογίσθηκε η συσχέτιση του NDVI της πολυφασματικής με το NDVI της συγχωνευμένης εικόνας. Υψηλές τιμές συσχέτισης υποδεικνύουν διατήρηση υψηλού ποσοστού της αρχικής φασματικής πληροφορίας στις συγχωνευμένες εικόνες. Στα διαγράμματα των Εικόνων 78-81 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αυτής της συσχέτισης NDVI, κανονικοποιημένα στο διάστημα τιμών από 0 έως 1.

Υψηλότερη συσχέτιση εμφανίζουν οι Συντελεστές Συσχέτισης NDVI στην περίπτωση των μεθόδων Mallat-IHS, Á Trous-PCA_Περ.Α, PCA_Περ.Γ, Mallat-PCA, και Á Trous-IHS. Από τις νέες μεθόδους που αναπτύχθηκαν στη διατριβή οι μέθοδοι FDFFπαγχρ-PCA_Περ.Γ και FDFFπαγχρ- Á Trous-PCA_Περ.Γ παρουσιάζουν σχετικά υψηλό συντελεστή συσχέτισης NDVI.
8.2.5 (i) Περιοχή Αχιβαδολίμνη



Συνδυασμός φασματικών καναλιών: Ερυθρό / Εγγύς Υπέρυθρο – Πράσινο – Ιώδες

Εικόνα 78: Συντελεστής συσχέτισης του NDVI των αρχικών και συγχωνευμένων εικόνων. Περιοχή Αχιβαδολίμνη. Φασματικά κανάλια: Ερυθρό / Εγγύς υπέρυθρο – Πράσινο – Ιώδες.



Συνδυασμός φασματικών καναλιών: Πράσινο – Ερυθρό –Εγγύς υπέρυθρο

Εικόνα 79: Συντελεστής συσχέτισης του NDVI των αρχικών και συγχωνευμένων εικόνων. Περιοχή Αχιβαδολίμνη. Φασματικά κανάλια: Πράσινο – Ερυθρό –Εγγύς υπέρυθρο.

8.2.5 (ii) Περιοχή Πάχαινα





Εικόνα 80: Συντελεστής συσχέτισης του NDVI των αρχικών και συγχωνευμένων εικόνων. Περιοχή Πάχαινα. Φασματικά κανάλια: Ερυθρό / Εγγύς υπέρυθρο – Πράσινο – Ιώδες.



Συνδυασμός φασματικών καναλιών: Πράσινο – Ερυθρό –Εγγύς υπέρυθρο

Εικόνα 81: Συντελεστής συσχέτισης του NDVI των αρχικών και συγχωνευμένων εικόνων. Περιοχή Πάχαινα. Φασματικά κανάλια: Πράσινο – Ερυθρό –Εγγύς υπέρυθρο.

8.3 Περίληψη κεφαλαίου

Στο παρόν Κεφάλαιο παρουσιάστηκαν οι στατιστικοί εκτιμητές που χρησιμοποιήθηκαν για τη αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των μεθόδων συγχώνευσης που εφαρμόστηκαν στα δεδομένα της διατριβής. Παρατέθηκαν επίσης, για κάθε εκτιμητή χωριστά, κάποιες παρατηρήσεις επί των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την εφαρμογή αυτού. Οι παρατηρήσεις αυτές, σε συνδυασμό με τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την οπτική αξιολόγηση των συγχωνευμένων εικόνων, συγκεντρώνονται στο επόμενο Κεφάλαιο.

9 Συμπεράσματα – Προτάσεις μελλοντικής έρευνας

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής αναπτύχθηκαν 14 νέες μέθοδοι συγχώνευσης εικόνων. Η μέθοδος FDFF στηρίζεται στην εφαρμογή φίλτρων διέλευσης υψηλών και χαμηλών συχνοτήτων στο φάσμα Fourier των αρχικών εικόνων. Οι υπόλοιπες μέθοδοι αποτελούν συνδυασμό της FDFF είτε με το μετασχηματισμό "Á trous", είτε με την Ανάλυση Κυριών Συνιστωσών ή και με τις δυο αυτές μεθόδους ταυτόχρονα. Επιπρόσθετα, αναπτύχθηκαν δυο παραλλαγές της παραδοσιακής μεθόδου συγχώνευσης εικόνων PCA.

Οι μέθοδοι χρησιμοποιήθηκαν για τη συγχώνευση δορυφορικών εικόνων Quickbird. Στις ίδιες εικόνες εφαρμόστηκαν και κάποιες από τις ήδη υπάρχουσες και ευρείας χρήσης μεθόδους συγχώνευσης, με σκοπό τη σύγκριση της ποιότητας των συγχωνευμένων εικόνων που προέκυψαν από τις νέες και από τις προϋπάρχουσες μεθόδους. Η εκτίμηση της χωρικής και φασματικής ποιότητας των εικόνων βασίστηκε στη χρήση στατιστικών δεικτών και σε οπτικές παρατηρήσεις.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο όγδοο Κεφάλαιο, η φασματική πληροφορία της αρχικής πολυφασματικής εικόνας διατηρήθηκε περισσότερο με τις μεθόδους:

- Á Trous-PCA _Περ.Α,
- PCA_Περ.Γ,
- Mallat-IHS,
- Mallat-PCA,
- Á Trous-IHS και
- FDFFπαγχρ. Α΄ Trous-PCA_Περ.Γ.

Χωρικά, όπως προκύπτει από τη χρήση των στατιστικών δεικτών που αναφέρθηκαν στην Ενότητα 8.1 (Εικόνες 41-53, Παράρτημα ΙΙ), καλύτερη διατήρηση της πληροφορίας που περιέχει η παγχρωματική εικόνα επετεύχθη με τις μεθόδους:

- FDFF
- FDFF-Á Trous-PCA_Περ.Γ και
- FDFFπαγχρ-PCA_Περ.Γ,
- FDFFπαγχρ-Á Trous, και
- FDFF $\pi\alpha\gamma\chi\rho$ -Á Trous-PCA_Περ.Γ.

Όπως προέκυψε από οπτική παρατήρηση των συγχωνευμένων εικόνων, πολύ καλή χωρική ανάλυση, χωρίς να εμφανίζουν αλλοίωση των χρωμάτων, παρουσιάζουν οι εικόνες που προέκυψαν από τις μεθόδους:

- FDFF,
- FDFF-Á Trous-PCA _Περ.Β,

- FDFF-Á Trous-PCA_Περ.Γ,
- FDFFπαγχρ-Á Trous-PCA_Περ.B,
- FDFF $\pi\alpha\gamma\chi\rho$ -Á Trous-PCA_Περ.Γ,
- FDFF $\pi\alpha\gamma\chi\rho$ -Å Trous,
- FDFF-PCA_Περ.Β,
- FDFF-PCA_Περ.Γ

Βάσει του συνδυασμού της καλής φασματικής και υψηλής χωρικής απόδοσης, οι μέθοδοι συγχώνευσης εικόνων που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής δύναται να θεωρηθούν καλύτερες από τις υπόλοιπες που δοκιμάστηκαν.

Συγκεκριμένα, οι μέθοδοι FDFF, FDFFπαγχρ-A trous-PCA_Περ.Γ, FDFFπαγχρ-A trous, και FDFF-Á trous-PCA_Περ.Γ υπερτερούν των υπολοίπων μεθόδων που εφαρμόστηκαν, ως προς τη διαφοροποίηση των φυτών χωρικά ή ποιοτικά. Στις εικόνες που προέκυψαν από τις συγκεκριμένες μεθόδους ο χωρικός διαχωρισμός της βλάστησης είναι εμφανής. Επιπρόσθετα η διατήρηση, σε ικανοποιητικό βαθμό, της φασματικής πληροφορίας παρέχει τη δυνατότητα αναγνώρισης τη υγείας και του σταδίου ανάπτυξης των φυτών και δέντρων. Στους συνδυασμούς φασματικών καναλιών Εγγύς υπέρυθρο-Πράσινο-Ιώδες και Εγγύς υπέρυθρο-Ερυθρό -Πράσινο, οι οποίοι είναι οι περισσότερο κατάλληλοι για την παρακολούθηση της βλάστησης καθότι περιλαμβάνουν το Εγγύς υπέρυθρο, η βλάστηση εμφανίζεται με κόκκινο χρώμα. Όσο περισσότερο φωτεινό είναι το κόκκινο χρώμα τόσο μικρότερο το στάδιο ωριμότητας και τόσο καλύτερη η κατάσταση της υγείας της βλάστησης. Στις εικόνες του παραρτήματος ΙΙΙ, όπου απεικονίζεται ο κανονικοποιημένος δείκτης βλάστησης καθότι η ερισών και δέντρων στο χώρο είναι περισσότερο εμφανής, καθότι η βλάστηση απεικονίζεται με λευκό χρώμα.

Οι μέθοδοι που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια της διατριβής εφαρμόστηκαν σε περιοχές με βλάστηση, καλλιεργημένες εκτάσεις και ελάχιστα ακάλυπτα εδάφη. Συνεπώς ενδέχεται να μην έχουν την ίδια απόδοση για διαφορετικού τύπου περιοχές μελέτης, όπως για παράδειγμα σε αστικό περιβάλλον ή σε γυμνά εδάφη. Επομένως συνίσταται, ως προέκταση της παρούσας διατριβής, η εφαρμογή των νέων μεθόδων σε διαφορετικού τύπου περιοχές και ενδεχομένως με εικόνες προερχόμενες από άλλους δορυφόρους. Ωστόσο, λαμβάνοντας υπόψη τη θεωρία στην οποία βασίζονται οι νέες μέθοδοι (διαχωρισμός και μετέπειτα συνδυασμός των υψηλών και χαμηλών συχνοτήτων που περιλαμβάνονται στις αρχικές εικόνες), η απόδοση αυτών αναμένεται να είναι εξίσου καλή και σε περιπτώσεις διαφορετικών εφαρμογών ή δεδομένων.

Η παρούσα έρευνα θα μπορούσε να συνεχιστεί με συγχώνευση των εικόνων Quickbird με υπερφασματικές εικόνες, προκειμένου να προσδιοριστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια η κατάσταση υγείας της βλάστησης και να πραγματοποιηθεί προσδιορισμός του είδους των

φυτών. Επισημαίνεται ότι το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ των λήψεων των πολυφασματικών και υπερφασματικών δεδομένων πρέπει να είναι το δυνατό μικρότερο.

Με την πρόοδο της τεχνολογίας η φασματική και χωρική ανάλυση των εικονοληπτικών ανιχνευτών διαρκώς θα αυξάνεται. Εντούτοις, τουλάχιστον στο σχετικά άμεσο μέλλον, δεν υπάρχει η προοπτική ύπαρξης συστημάτων που θα συνδυάζουν σε μια μοναδική εικόνα υψηλή φασματική και χωρική ανάλυση. Συνεπώς η συγχώνευση εικόνων θα εξακολουθήσει να αποτελεί αναγκαιότητα σε κάποιες εφαρμογές της Τηλεπισκόπισης. Ύστατος στόχος της έρευνας στο χώρο της συγχώνευσης είναι η επίτευξη του ιδανικού συνδυασμού εικόνων, όπου η συγχωνευμένη εικόνα θα διατηρεί πλήρως τις χωρικές και φασματικές πληροφορίες των αρχικών δεδομένων. Όσο υπάρχουν ερευνητές που ενδιαφέρονται και ασχολούνται με το αντικείμενο της συγχώνευσης εικόνων η απόδοση των μεθόδων θα βελτιώνεται και ίσως κάποια στιγμή ο ιδανικός συνδυασμός εικόνων να γίνει πραγματικότητα.

Βιβλιογραφία

Ελληνική

Βασιλοπούλου, Σ. (2002). Η χρήση των δορυφορικών δεδομένων τηλεανίχνευση στη γεωδυναμική μελέτη: Επεξεργασία των δορυφορικών εικόνων Landsat 5, TM και SPOT/PAN της νότιας Αργολίδας. 6° Πανελλήνιο Γεωγραφικό Συνέδριο, τόμος ΙΙ, σελ. 102-109. Θεσσαλονίκη, 3-6 Οκτωβρίου.

Καρτάλης, Κ. και Φείδας, Χ. (2006). Αρχές και Εφαρμογές Δορυφορικής Τηλεπισκόπησης. Β. Γκιούρδας Εκδοτική, Αθήνα.

Καρτέρης, Μ. (1990). Δασική Αεροφωτογραφία. University Studio Press. Θεσσαλονίκη.

Μερτίκας, Σ. (1999). Τηλεπισκόπηση και Ψηφιακή Ανάλυση Εικόνας. Εκδοτικός Όμιλος Ίων, Αθήνα.

Μεταλλευτικό Μουσείο Μήλου (2008). Χλωρίδα και Πανίδα της Μήλου. Ανάκτηση Μάιος 2009, από: <u>http://www.milosminingmuseum.com</u>

Συλλαίος, Ν. (1990). Εφαρμογές Τηλεπισκόπησης στη Γεωργία. Εκδόσεις Γιαχούδη-Γιαπούλη, Θεσσαλονίκη.

Χριστόπουλος, Δ. (2003). Εισαγωγή στην Ανάλυση Δεδομένων. Σημειώσεις μαθήματος «Ανάλυση Δεδομένων». Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων.

Διεθνής

Afary, A.R. and H. Emamy (2003). Satellite image fusion using Wavelets Transform, Ανάκτηση Σεπτέμβριος 2004, από <u>http://www.ncc.org.ir/articles/poster83/A.R.Afary.pdf</u>

Arellano, P. (2003). Missing Information in Remote Sensing: Wavelet approach to detect and remove clouds and their shadows. MSc Thesis, International Institute of Geo-information Science and Earth Observation, Enschede, The Netherlands., Ανάκτηση Φεβρουάριος 2004, $\alpha\pi$ ό

http://www.itc.nl/library/Papers_2004/msc/gfm/arellano.pdf

Bretschneider, T. and Kao, O. (2000). Image fusion in Remote Sensing., Ανάκτηση 26 Οκτωβρίου 2006, από:

http://wwwcs.uni-paderborn.de/cs/ag-kao/en/persons/kao/pdfPapers/osee.pdf

Bruzzone, L., R. Cossu, and G. Vernazza (2002). Combining parametric and non-parametric algorithms for a partially unsupervised classification of multi-temporal remote sensing images. *Information Fusion*, Vol. 3, pp. 289-297.

Canga, E.F. (2002). Image Fusion. MEng. Thesis, University of Bath, U.K.

Carter, D.B., (1998). Analysis of multi-resolution data fusion techniques. MSc thesis, Virginia Polytechnic Institute, State University, Virginia, USA.

Chen, C-M., Hepner, G.F. and Forster, R.R. (2003). Fusion of hyperspectral and radar data using the IHS transformation to enhance urban surface features. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 58, pp. 19-30.

Chibani, Y. and A. Houacine (2002). The joint use of HIS transform and redundant wavelet decomposition for fusing multispectral and panchromatic images. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 23, No. 18, pp. 3821-3833.

Davids, C. and A.N. Tyler (2003). Detecting contamination-induced tree stress within the Chernobyl exclusion zone. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 85, pp 30-38

De Audicana, G.M., R. Garcia, and A. Seco (2002). Fusion of Multispectral and Panchromatic Images using Wavelet Transform. Evaluation of Crop Classification Accuracy, Ανάκτηση Αύγουστος 2003, από

http://www.data-fusion.org/pdf/wkshop/prague02/fusion_gonzalez.pdf

Della Rocca, M.R, M. Fiani, A. Fortunato and P. Pistillo (2004). Using the data fusion technique for producing thematic map. *Proceedings of the XXth ISPRS Congress: Geo-Imagery Bridging Continents, Commission IV*, Vol.XXXV(B), Istanbul, Turkey, 12-23 July.

Digital Globe, Inc. (2006). Quickbird Imagery Products, *Product Guide*, Revision 4.2, Ανάκτηση 7 Μαΐου 2006, από: <u>http://www.digitalglobe.com</u>

Epinat, V., A. Stein, S.M. de Jong, and J. Bouma (2001). A wavelet characterization of high resolution NDVI patterns for precision agriculture. *Journal of Algebraic Geometry*, Vol. 3, No. 2, pp. 121-132.

Francis, X., J. Canisius and H. Turral (2003). Fusion technique to extract detail information from moderate resolution data for global scale image map production. *Proceedings of the 30th International Symposium on Remote Sensing of Environment- Information for Risk Management and Sustainable Development*, Honolulu, Hawaii, 10-14 November.

Ghassemian, H., (2003). A multi-sensor image fusion based on Retina model. Commission IV, Working Group VI/7., Ανάκτηση 2 Μαρτίου 2004, από: http://www.iuw.uni-vechta.de/personal/geoinf/jochen/papers/ 10.pdf

Gomez, R.B, A. Jazaeru, and M. Kafatos (2001). Wavelet-based hyperspectral and multispectral image fusion, Ανάκτηση Σεπτέμβριος 2003, από http://esip.gmu.edu/~rgomez/fall01/FusionPaper.pdf

Gonzalez, R.C., and R.E., Woods (1992). *Digital Image Processing*. Addison-Wesley Publishing Company.

Gonzalez, R.C., R.E., Woods and S.L., Eddins (2004). *Digital Image Processing using MATLAB*.: Pearson Prentice Hall, New Jersey.

Gonzalez, R.C., and R.E., Woods (2008). *Digital Image Processing*. Pearson Prentice Hall, New Jersey, 3rd Edition.

Gonzalez-Audicana, M., X., Saleta, J.L., Catalan, R.G., and R., Garcia, 2004. Fusion of multispectral and panchromatic images using improved IHS and PCA mergers based on wavelet decomposition. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42, 1291-1299.

Gonzalez-Audicana, M., X., Otazu, O., Fors and A., Seco, 2005. Comparison between Mallat's and the 'à trous' discrete wavelet transform for the fusion of multispectral and panchromatic images. *International Journal of Remote Sensing*, 26, 595-614.

Gonzalo, C. and M. Lillo-Saavedra (2004). Customized fusion of satellite images based on a new à trous algorithm. *Proceedings of SPIE Conferences: Image and Signal Processing for Remote Sensing*. Bellingham, WA. Vol. 5573, pp. 444-451.

Gungor, O. and J. Shan (2004). Evaluation of satellite image fusion using wavelet transform, *Proceedings of the XXth ISPRS Congress: Geo-Imagery Bridging Continents, Commission VII*, Vol.XXXV(B), Istanbul, Turkey, 12-23 July.

Hak, C.K., J.K., Kuk, H.S., Song and N.I., Cho, 2007. An IHS fusion algorithm based on the correlation of panchromatic and intensity images. *Proceedings of the 2007 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems*, Xiamen, China, 28 November-1 December, pp 686-689.

Hill, P., N. Canagarajah, and D. Bull (2002). Image fusion using Complex Wavelets, Ανάκτηση Αύγουστος 2003, από <u>http://www.bmva.ac.uk/bmvc/2002/papers/88/full_88.pdf</u>

Hong, G. and Y. Zhang (2004). The effects of different types of wavelets on image fusion, *Proceedings of the XXth ISPRS Congress: Geo-Imagery Bridging Continents, Commission IV,* Istanbul, Turkey, 12-23 July.

King, R.L. and J. Wang (2001). A wavelet based algorithm for pan sharpening Landsat 7 imagery., Ανάκτηση Μάιος 2002, από

http://www.erc.msstate.edu/~veera/ImageQualityMetrics/Literature/A%20wavelet%2 0based%20algorithm%20for%20Pan%20Sharpening%20Landsat%207%20imagery.pdf

Kokaly, R.F, D.G. Despain, R.N. Clark and E. Livo (2003). Mapping vegetation in Yellowstone National Park using spectral feature analysis of AVIRIS data. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 84, pp. 437-456.

Kokally, R.F. and R.N. Clark (1999). Spectroscopic determination of Leaf Biochemistry Using Band-Depth Analysis of Absorption Features and Stepwise Linear Regression. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 67, pp. 267-287.

Lewis, J.J., R.J. O'Callaghan, S.G. Nikolov, D.R. Bull and C.N. Canagarajah (2004). Region-Based Image Fusion Using Complex Wavelets., Ανάκτηση Μάρτιος 2005, από http://www.fusion2004.foi.se/papers/IFO4-0555.pdf

Li, H., B.S. Manjunath and S.K. Mitra (1995). Multisensor image usion using the Wavelet Transform. *Graphical Models and Image Processing*, Vol. 57, No. 3, pp. 235-245.

Li, S., J.T. Kwok and Y. Wang (2002). Using the discrete wavelet frame transform to merge Landsat TM and SPOT panchromatic images. *Information Fusion*, Vol. 3, pp. 17-23.

Ling, Y., Ehlers, M., Usery, E.L and M., Madden, 2007. FFT-enhanced IHS transform for fusing high-resolution satellite images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 61, 381-392.

Liu, G, Z. Jing, S. Sun (2005). Image fusion based on an expectation maximization algorithm. *Optical Engineering*, Vol. 44(7), pp. 077001-1 – 077001-11.

Marcelino, E.V., L.M.G. Fonseca, F.N. Ventura and A.N.C.S. Rosa (2003). Evaluation of HIS, PCA and Wavelet Transform fusion techniques for the identification off Landslide scars using satellite data. *Anais XI SBSR*, Belo Horizonte, Brasil, 05-10 April 2003, INPE, pp. 487-494, Ανάκτηση Μάιος 2005, από

http://www.cic.unb.br/docentes/nuno/artigos/04_346_SBSR_2003.pdf

Meenakshisundaram, V. (2005). Quality Assessment of Ikonos and Quickbird Fused Images for Urban Mapping. MSc Thesis, University of Calgary, Canada.

NASA. (2007).Remote sensing tutorial, Ανάκτηση 10 Μαρτίου 2008, από: http://rst.gsfc.nasa.gov

Núñez, J., X., Otazu, O., Fors, A., Prades, V., Pala and R., Arbiol (1999). Multiresolutionbased Image Fusion with Additive Wavelet Decomposition. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 37, pp. 1204-1211.

Otazu, X., M., Gonzalez-Audicana, O., Fors and J., Núñez (2005). Introduction of sensor spectral response into image fusion methods. Application to wavelet-based methods. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 43, pp. 2376-2385.

Otazu, X., M. and O. Pujol, 2006. Wavelet based approach to cluster analysis. Application on low dimensional data sets. Pattern Recognition Letters, 27, 1590-1605.

Pajares, G. and J.M. de la Cruz (2004). A wavelet-based image fusion tutorial. *Pattern Recognition*, Vol. 37, pp. 1855-1872.

Petrovic, V.S. (2001). Multisensor pixel-level image fusion. PhD Thesis, University of Manchester, U.K.

Piella, G. (2003). A general framework for multiresolution image fusion: from pixels to regions. *Information Fusion*, Vol. 4, pp.259-280.

Pohl, C. (1999). Tools and methods for fusion of images of different spatial resolution. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 32, part 7-4-3 W6, Valladolid, Spain, 3-4 June.

Pohl, C. and Van Genderen, J.L. (1998). Multisensor image fusion in remote sensing: concepts, methods and applications. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 19, pp. 823-854.

Pradhan, P. (2005). Multiresolution based, multisensor, multispectral image fusion. PhD thesis, Mississippi State University.

Ptáček, J., I., Šindelářová and A., Procházka (2004). Digital image artifacts restoration. Ανάκτηση 26 Οκτωβρίου 2006, από:

http://dsp.vscht.cz/konference_matlab/matlab04/ptacek.pdf

Qing, X., X. Shuai, T. Bing, L.Jiansheng and G. Zexum (2004). Complex wavelets and its application to image fusion. *Proceedings of the XXth ISPRS Congress: Geo-Imagery Bridging Continents, Commission III*, Vol. XXXV(B), Istanbul, Turkey, 12-23 July.

Research Systems (2001). ENVI Tutorials®.

Rogan, J., J. Franklin and Dar A. Roberts (2002). A comparison of methods for monitoring multitemporal vegetation change using Thematic Mapper imagery. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 80, pp. 143-156.

Sanjeevi, S., K. Vani and K. Lakshmi (2001). Comparison of conventional and wavelet transform techniques for fusion of IRS-1C LISS-III and PAN images. *Presented at the 22nd Asian Conference on Remote Sensing*, 5-9 November, Singapore.

Samadzadegan, F. (2003). Fusion Techniques in Remote Sensing. ISPRS Commission IV, Joint Workshop: Challenges in Geospatial Analysis Integration and Visualisation II, Γερμανία, 8-9 Σεπτεμβρίου.

Schmidt, K.S. and A.K. Skidmore (2003). Spectral discrimination of vegetation types in a coastal wetland. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 85, pp. 92-108.

Schowengerdt, A. (1997). Remote Sensing models and methods for image processing. Second Edition. Academic Press.

Siegal, B. S. and A. R. Gillespie (1980). *Remote Sensing in Geology*. John Willey & Sons, New York.

Sims, D.A. and J.A. Gamon (2002). Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance actoss a wide range of species, leaf structures and developmental stages. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 81, pp. 337-354.

Stathaki Tania (2008). Image Fusion. Algorithms and Applications. Academic Press - Elsevier

Ventura, F.N. and L.M.G. Fonseca, A.N.C.S. Rosa (2002). Remotely sensed image fusion using the Wavelet Transform. *Proceedings of the International Symposium on Remote Sensing of Environment*, Buenos Aires, Ανάκτηση Δεκέμβριος 2004, από http://www.dpi.inpe.br/~leila/publications/RSIFUWT-ISPSE2002.pdf

Vijayaraij, V. (2004). A quantitative Analysis of Pansharened Images. MSc thesis, Mississippi State University, USA.

Wald, L. (2002). DATA FUSION. Definitions and Architectures. Fusion of images of different spatial resolutions. Εκδόσεις: Les Presses de l'Ecole des Mines, Paris.

Zhang, Y. (2002). Problems in the fusion of commercial high-resolution satellite as well as LANDSAT 7 images and initial solutions. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing (IAPRS)*, Vol. 34, Part 4 "Geospatial Theory, Processing and Applications" Ottawa, Canada, July 2002.

Zhang, Y. (2004). Understanding Image Fusion. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, June 2004, pp. 657-661.

Zhou, J., D.L., Civco and J.A., Silander (1998). A wavelet transform method to merge Landsat TM and SPOT panchromatic data. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 19, pp. 743-757.