



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΑΚΤΟΓΡΑΜΜΩΝ
ΑΠΟ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ
ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΜΕ ΕΜΦΑΣΗ
ΣΕ ΠΡΟΗΓΜΕΝΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΟΜΑΛΟΠΟΙΗΣΗΣ
ΚΑΙ ΤΟΝ ΤΕΛΕΣΤΗ CANNY**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΕΙΡΗΝΗ ΤΕΛΩΝΗ**

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Δ. ΑΡΓΙΑΛΑΣ

Αθήνα, Ιούλιος 2011

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΑΚΤΟΓΡΑΜΜΩΝ
ΑΠΟ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ
ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΜΕ ΕΜΦΑΣΗ
ΣΕ ΠΡΟΗΓΜΕΝΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΟΜΑΛΟΠΟΙΗΣΗΣ
ΚΑΙ ΤΟΝ ΤΕΛΕΣΤΗ CANNY**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΕΙΡΗΝΗ ΤΕΛΩΝΗ**

Στη Δημητρούλα...

ετ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Έπειτα από σχεδόν δύο χρόνια «ψηφιακής» αναζήτησης, με την παρούσα Διπλωματική Εργασία ολοκληρώνεται μια αξέχαστη φοιτητική περίοδος στη Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα Καθηγητή μου, κύριο Δημήτρη Αργιαλά, για τις πολύτιμες συμβουλές, την υπομονή και την πραγματικά αμέριστη συμπαράστασή του σε όλα τα επίπεδα. Από το 2007, όταν παρακολούθησα το εισαγωγικό μάθημα Φωτοερμηνεία – Τηλεπισκόπηση, μέχρι σήμερα, γνώρισα έναν εξαιρετικό Καθηγητή κι έναν ακόμα πιο εξαιρετικό άνθρωπο. Σας ευχαριστώ θερμά για τη συνεργασία μας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω πολύ το Λέκτορα Κωνσταντίνο Καράντζαλο για τις κατευθύνσεις και τη βοήθειά του – ιδιαίτερα την «ψηφιακή». Σε ευχαριστώ για όλα τα υπέροχα πράγματα που με δίδαξες.

Ήταν πάντα ευχάριστο να συνεργάζομαι με όλα τα μέλη του Εργαστηρίου Τηλεπισκόπησης και τους ευχαριστώ πολύ για τη βοήθειά τους κατά τη διάρκεια εκπόνησης της Διπλωματικής μου Εργασίας. Ιδιαίτερα, ευχαριστώ την Επίκουρο Καθηγήτρια κυρία Βασιλεία Καραθανάση για τις υποδείξεις της στη Μικροκυματική Τηλεπισκόπηση, τον κύριο Χρήστο Ιωσηφίδη, κύριο «υπαίτιο» αυτής της εργασίας καθώς με δική του προτροπή ξεκίνησε η συναρπαστική και έντονη μελέτη της εξαγωγής ακτογραμμών, το Δρ. Πολυχρόνη Κολοκούση γιατί ήταν πάντα «εκεί», το Dr. Mohammed Dabboor και τον Υποψήφιο Διδάκτορα Αργυρό Αργυρίδη για τη φιλία μας όλα αυτά τα χρόνια και τις επιστημονικές – και όχι μόνο – υποδείξεις τους.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου Τασούλα και Παναγιώτη, την αδερφή μου Πέλη, τη Διονυσία, το Στέργιο και όλους τους υπόλοιπους ... για την παρουσία και τη στήριξή τους.

Τελώνη Ειρήνη,

Αθήνα, Ιούλιος 2011

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	1
ABSTRACT	5
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	11
1 Βιβλιογραφική ανασκόπηση τεχνικών ανίχνευσης ακτογραμμής από τηλεπισκοπικά δεδομένα	11
1.1 Ανασκόπηση τεχνικών ανίχνευσης ακτογραμμής από ηλεκτρο-οπτικά δεδομένα	12
1.2 Ανασκόπηση τεχνικών ανίχνευσης ακτογραμμής από LIDAR δεδομένα	26
1.3 Ανασκόπηση τεχνικών ανίχνευσης ακτογραμμής από video δεδομένα.....	29
1.4 Ανασκόπηση τεχνικών ανίχνευσης ακτογραμμής από radar δεδομένα.....	30
1.5 Συμπεράσματα	42
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	51
2 Τηλεπισκοπικά συστήματα για την ανίχνευση χαρακτηριστικών στο παράκτιο περιβάλλον	51
2.1 Ανίχνευση χαρακτηριστικών σε παγχρωματικές και πολυφασματικές απεικονίσεις πολύ υψηλής ανάλυσης	53
2.1.1 Δορυφορικά συστήματα απεικόνισης πολύ υψηλής ανάλυσης.....	55
2.2 Ανίχνευση χαρακτηριστικών σε υπερφασματικές απεικονίσεις.....	70
2.2.1 Δορυφορικές απεικονίσεις ASTER.....	71
2.3 Ανίχνευση χαρακτηριστικών σε απεικονίσεις radar	74
2.3.1 Δορυφορικά συστήματα SAR απεικονίσεων.....	76
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	85
3 Διερεύνηση και ανάπτυξη αλγορίθμου για την αυτόματη ανίχνευση ακτογραμμής ..	85
3.1 Θεωρητικό υπόβαθρο	86
3.1.1 Ανασκόπηση τεχνικών ιστροπικής και ανιστροπικής διάχυσης	89
3.1.2 Ανασκόπηση τεχνικών μορφολογικής εξομάλυνσης	98
3.1.3 Ανασκόπηση τεχνικών ανίχνευσης ακμών και άλλες τεχνικές επεξεργασίας	117
3.1.4 Ανασκόπηση εργαλείων μορφολογικής ανακατασκευής	125
3.2 Περιγραφή μεθοδολογίας	127
3.2.1 Παρουσίαση εφαρμογών	128
3.2.2 Προ-επεξεργασία δεδομένων και επιλογή της βέλτιστης τεχνικής	138
3.2.2.1 1 ^η Εφαρμογή (ASF, PM, ALM, ML, PM&ML, ALM&ML)	140
3.2.2.2 2 ^η Εφαρμογή (ASF, PM, ALM, ML, PM&ML, ALM&ML).....	154
3.2.2.3 3 ^η Εφαρμογή (ASF, PM, ALM, ML, PM&ML, ALM&ML).....	166

3.2.2.4	4 ^H Εφαρμογή (ASF, PM, ALM, ML, PM&ML, ALM&ML).....	177
3.2.2.5	5 ^H Εφαρμογή (ASF, PM, ALM, ML, PM&ML, ALM&ML).....	186
3.2.2.6	6 ^H Εφαρμογή (ASF, PM, ALM, ML, PM&ML, ALM&ML).....	195
3.2.2.7	7 ^H Εφαρμογή (ASF, PM, ALM, ML, PM&ML, ALM&ML).....	204
3.2.2.8	8 ^H Εφαρμογή (ASF, PM, ALM, ML, PM&ML, ALM&ML).....	213
3.2.2.9	9 ^H Εφαρμογή (ASF, PM, ALM, ML, PM&ML, ALM&ML).....	223
3.2.3	Επεξεργασία δεδομένων	232
3.2.4	Μετα-επεξεργασία δεδομένων	238
3.2.5	Κριτήρια αξιολόγησης των εξαγόμενων αποτελεσμάτων.....	239
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4		243
4	Εφαρμογές και αξιολόγηση	243
4.1	1 ^η Εφαρμογή – Περιοχή: ακτή Ηρακλείου Κρήτης (QUICKBIRD).....	244
4.2	2 ^η Εφαρμογή – Περιοχή: ακτή Ηρακλείου Κρήτης (QUICKBIRD).....	258
4.3	3 ^η Εφαρμογή – Περιοχή: Ηράκλειο Κρήτης (ASTER).....	273
4.4	4 ^η Εφαρμογή – Περιοχή: λιμένας Ηρακλείου Κρήτης (QUICKBIRD).....	291
4.5	5 ^η Εφαρμογή – Περιοχή: λιμένας Ηρακλείου Κρήτης (QUICKBIRD).....	304
4.6	6 ^η Εφαρμογή – Περιοχή: Oman (WORLDVIEW-2)	320
4.7	7 ^η Εφαρμογή – Περιοχή: Oman (WORLDVIEW-2)	329
4.8	8 ^η Εφαρμογή – Περιοχή: Gibraltar (TERRASAR-X)	341
4.9	9 ^η Εφαρμογή – Περιοχή: Gibraltar (TERRASAR-X)	353
4.10	Συμπεράσματα.....	367
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5		379
5	Συμπεράσματα – Προοπτικές	379
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ		385
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ		389

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1: Τρισδιάστατη μοντελοποίηση της ακτογραμμής και ανίχνευση σε επίπεδο subpixel (Ruiz et al., 2007).....	14
Εικόνα 1.2: Η γραφική παράσταση της γκαουσιανής bimodal καμπύλης (Liu and Jezek, 2004).....	18
Εικόνα 1.3: Εικονογράφηση μιας καμπύλης περιγράμματος η οποία περιγράφεται με συνάρτηση αναλυτικής και γενικής μορφής (Li et al., 2009).....	23
Εικόνα 1.4: Το σύννεφο σημείων LIDAR προβεβλημένο στην ορθοαπεικόνιση(Lee at al., 2009).....	28
Εικόνα 1.5: (α) Εικόνα SAR εισόδου. (β) Η εικόνα έπειτα από την εφαρμογή φίλτρου Lee και ανισοτροπικής διάχυσης. (γ) Κατάτμηση με τοπικά προσαρμοζόμενη κατωφλίωση, (δ) Απομάκρυνση μικρών θαλάσσιων αντικειμένων που αποτελούν θόρυβο. (ε) Απομάκρυνση μικρών χερσαίων αντικειμένων που αποτελούν θόρυβο. (στ) Εξαγωγή ακτογραμμής (vector). (Liu and Jezek, 2004).....	36
Εικόνα 1.6: Κατάτμηση με επέκταση περιοχών (region-growing segmentation). (α) Επιλέγεται το αρχικό εικονοστοιχείο (seed pixel) και τα γειτονικά εικονοστοιχεία συγχωνεύονται εάν ικανοποιούν ένα κριτήριο ομοιογένειας. (β) Η περιοχή συνεχίζει να επεκτείνεται με συγχώνευση γειτονικών εικονοστοιχείων έως ότου. (γ) Συναντήσει εικονοστοιχεία που δεν ικανοποιούν το κριτήριο ομοιογένειας. (δ) Ο αλγόριθμος τελειώνει όταν η περιοχή δεν επεκτείνεται άλλο. (White and El Asmar, 1999).....	37
Εικόνα 1.7: Εικονογράφηση της θεωρίας των επιπεδοσυνόλων	38
Εικόνα 1.8: (α) Εικόνα RADARSAT ScanSAR. (β) Αρχικό περίγραμμα. (γ) Μεσαίο επίπεδο ανίχνευσης ακτογραμμής. (δ) Τελικό επίπεδο ανίχνευσης ακτογραμμής. (Chong et al., 2008).	40
Εικόνα 1.9: (α) Αρχικό περίγραμμα στην εικόνα μειωμένης διακριτικής ικανότητας. (β) Ανίχνευση ακτογραμμής στην εικόνα μειωμένης διακριτικής ικανότητας. (γ) Προβολή περιγράμματος από την εικόνα μειωμένης διακριτικής ικανότητας. (δ) Τελικό επίπεδο ανίχνευσης ακτογραμμής. (Chong et al., 2008).	41
Εικόνα 2.1: Ο υπερφασματικός κύβος. Πηγή: http://rst.gsfc.nasa.gov/Sect13/HyMap_Zack_3D_cube.jpg	71
Εικόνα 3.1: Ψηφιακή εικόνα.	88
Εικόνα 3.2: Πρώτη σειρά (α) Αρχική εικόνα (β) Συνέλιξη με φίλτρο Gauss, τυπικής απόκλισης $\sigma=1.6$, για 5 επαναλήψεις (γ) 10 επαναλήψεις (δ) 20 επαναλήψεις. Δεύτερη σειρά (α) Αρχική εικόνα (β) Συνέλιξη με φίλτρο Gauss, για τυπική απόκλιση $\sigma=1.6$ (γ) $\sigma=4.8$ (δ) $\sigma=16$	94
Εικόνα 3.3: Πρώτη σειρά (α) Αρχική εικόνα (β) Ανισοτροπική διάχυση ALM (γ) Ανισοτροπική διάχυση PM (δ) Συνέλιξη της αρχικής εικόνας με φίλτρο Gauss, με τυπική απόκλιση $\sigma=1.6$. Δεύτερη σειρά (α) Ανίχνευση ακμών στην αρχική εικόνα (β) Ανίχνευση ακμών στην ομαλοποιημένη εικόνα με ALM διάχυση (γ) Ανίχνευση ακμών στην ομαλοποιημένη εικόνα με PM διάχυση (δ) Ανίχνευση ακμών στην ομαλοποιημένη εικόνα με γκαουσιανή συνέλιξη.	94
Εικόνα 3.4: (α) Ανίχνευση αντικειμένου της εικόνας cameraman.tif χωρίς προ-επεξεργασία, (β) Ανίχνευση του ίδιου αντικειμένου έπειτα από περιορισμένο φιλτράρισμα ALM (10 επαναλήψεις).....	95

Εικόνα 3.5: Πρώτη σειρά (α) Αρχική εικόνα (β) Ανίχνευση ακμών με τον τελεστή Canny έπειτα από φιλτράρισμα ALM 20 επαναλήψεων (γ) Ανίχνευση ακμών με τον τελεστή Canny έπειτα από φιλτράρισμα ALM 300 επαναλήψεων. Δεύτερη σειρά (α) Αρχική εικόνα (β) Ανίχνευση ακμών με τον τελεστή Canny έπειτα από φιλτράρισμα PM 20 επαναλήψεων (γ) Ανίχνευση ακμών με τον τελεστή Canny έπειτα από φιλτράρισμα PM 300 επαναλήψεων..	97
Εικόνα 3.6: (α) Αρχική εικόνα (από τη βιβλιοθήκη του Matlab, circles.png), (β) Διαστολή αρχικής εικόνας με δομικό στοιχείο δίσκο ακτίνας 4 εικονοστοιχείων.	99
Εικόνα 3.7: (α) Αρχική εικόνα (από τη βιβλιοθήκη του Matlab, circles.png), (β) Διάβρωση αρχικής εικόνας με δομικό στοιχείο δίσκο ακτίνας 4 εικονοστοιχείων.	100
Εικόνα 3.8: (α) Αρχική εικόνα (από τη βιβλιοθήκη του Matlab, snowflakes.png), (β) Διαστολή αρχικής εικόνας με δομικό στοιχείο δίσκο ακτίνας 4 εικονοστοιχείων.	101
Εικόνα 3.9: (α) Αρχική εικόνα (από τη βιβλιοθήκη του Matlab, snowflakes.png),.....	101
Εικόνα 3.10: (α) Αρχική εικόνα (από τη βιβλιοθήκη του Matlab, circles.png), (β) Άνοιγμα αρχικής εικόνας με δομικό στοιχείο δίσκο ακτίνας 15 εικονοστοιχείων.	103
Εικόνα 3.11: (α) Αρχική εικόνα (από τη βιβλιοθήκη του Matlab, circles.png), (β) Κλείσιμο αρχικής εικόνας με δομικό στοιχείο δίσκο ακτίνας 15 εικονοστοιχείων.	103
Εικόνα 3.12: Δυαδική ανακατασκευή της μάσκας I από τη μάσκα J (Vincent L., 1993).	106
Εικόνα 3.13: Γεωδαιτική απόσταση $d_G(x, y)$ εντός του συνόλου A (Vincent L., 1993)...	106
Εικόνα 3.14: Αποσύνθεση grayscale εικόνας με χρήση κατωφλίων (threshold decomposition) (Vincent L., 1993).....	107
Εικόνα 3.15: Grayscale ανακατασκευή της μάσκας f από τη μάσκα g (Vincent L., 1993). ...	107
Εικόνα 3.16: (α) Αρχική εικόνα (από τη βιβλιοθήκη του Matlab, cameraman.tif), (β) Διάβρωση αρχικής εικόνας με δομικό στοιχείο δίσκο ακτίνας 4 εικονοστοιχείων, (γ) Τελική εικόνα έπειτα από το μορφολογικό άνοιγμα με ανακατασκευή.	108
Εικόνα 3.17: (α) Αρχική εικόνα (από τη βιβλιοθήκη του Matlab, cameraman.tif), (β) Διαστολή αρχικής εικόνας με δομικό στοιχείο δίσκο ακτίνας 4 εικονοστοιχείων, (γ) Τελική εικόνα έπειτα από το μορφολογικό κλείσιμο με ανακατασκευή.....	108
Εικόνα 3.18: ASF με δομικό στοιχείο δίσκο ακτίνας 3 εικονοστοιχείων (α) Αρχική εικόνα (από τη βιβλιοθήκη του Matlab, cameraman.tif), (β) Άνοιγμα με ανακατασκευή της αρχικής εικόνας, (γ) Τελική εικόνα έπειτα από μορφολογικό κλείσιμο με ανακατασκευή στην εικόνα (β).	112
Εικόνα 3.19: Πρώτη σειρά (α) Αρχική εικόνα (cameraman.tif), (β) Leveling 1, (γ) Leveling 2. Δεύτερη σειρά (α) Leveling 3, (β) Leveling 4, (γ) Leveling 5.....	115
Εικόνα 3.20: (α) Απεικόνιση QUICKBIRD στο φυσικό έγχρωμο σύνθετο, (β) Απεικόνιση QUICKBIRD στο εγγύς υπέρυθρο κανάλι.....	128
Εικόνα 3.21: (α) 1 ^η Εφαρμογή, τμήμα της αρχικής απεικόνισης QUICKBIRD στο φυσικό έγχρωμο σύνθετο, (β) 1 ^η Εφαρμογή, τμήμα της αρχικής απεικόνισης QUICKBIRD στο εγγύς υπέρυθρο κανάλι.	129
Εικόνα 3.22: (α) Απεικόνιση QUICKBIRD στο φυσικό έγχρωμο σύνθετο, (β) Απεικόνιση QUICKBIRD στο εγγύς υπέρυθρο κανάλι.....	129
Εικόνα 3.23: (α) 2 ^η Εφαρμογή, τμήμα της αρχικής απεικόνισης QUICKBIRD στο φυσικό έγχρωμο σύνθετο, (β) 2 ^η Εφαρμογή, τμήμα της αρχικής απεικόνισης QUICKBIRD στο εγγύς υπέρυθρο κανάλι.	130
Εικόνα 3.24: (α) 3 ^η Εφαρμογή, απεικόνιση ASTER σε ψευδέγχρωμο σύνθετο RGB-321, (β) 3 ^η Εφαρμογή, απεικόνιση ASTER στο εγγύς υπέρυθρο κανάλι.	131

Εικόνα 3.25: (α) Απεικόνιση QUICKBIRD στο φυσικό έγχρωμο σύνθετο, (β) Απεικόνιση QUICKBIRD στο εγγύς υπέρυθρο κανάλι.....	132
Εικόνα 3.26: (α) 4 ^η Εφαρμογή, τμήμα της αρχικής απεικόνισης QUICKBIRD στο φυσικό έγχρωμο σύνθετο, (β) 4 ^η Εφαρμογή, τμήμα της αρχικής απεικόνισης QUICKBIRD στο εγγύς υπέρυθρο κανάλι.	132
Εικόνα 3.27: (α) 5 ^η Εφαρμογή, τμήμα της αρχικής απεικόνισης QUICKBIRD στο φυσικό έγχρωμο σύνθετο, (β) 5 ^η Εφαρμογή, τμήμα της αρχικής απεικόνισης QUICKBIRD στο εγγύς υπέρυθρο κανάλι.	133
Εικόνα 3.28: Απεικόνιση WORLDVIEW-2 στο φυσικό έγχρωμο σύνθετο.....	133
Εικόνα 3.29: Απεικόνιση WORLDVIEW-2 στο (α) μπλε, (β) πράσινο, (γ) κόκκινο κανάλι....	134
Εικόνα 3.30: (α) 6 ^η Εφαρμογή, τμήμα της αρχικής απεικόνισης WORLDVIEW-2 στο φυσικό έγχρωμο σύνθετο, (β) 6 ^η Εφαρμογή, τμήμα της αρχικής απεικόνισης WORLDVIEW-2 στο κόκκινο κανάλι.	135
Εικόνα 3.31: (α) 7 ^η Εφαρμογή, τμήμα της αρχικής απεικόνισης WORLDVIEW-2 στο φυσικό έγχρωμο σύνθετο, (β) 7 ^η Εφαρμογή, τμήμα της αρχικής απεικόνισης WORLDVIEW-2 στο κόκκινο κανάλι.	135
Εικόνα 3.32: 8 ^η Εφαρμογή-απορριφθείσα, απεικόνιση WORLDVIEW-2 στο φυσικό έγχρωμο σύνθετο.	136
Εικόνα 3.33: Απεικόνιση TERRASAR-X.	137
Εικόνα 3.34: 9 ^η Εφαρμογή, τμήμα της αρχικής απεικόνισης TERRASAR-X.....	137
Εικόνα 3.35: 10 ^η Εφαρμογή, τμήμα της αρχικής απεικόνισης TERRASAR-X.....	138
Εικόνα 3.36: (α) 1 ^η Εφαρμογή, απεικόνιση QUICKBIRD στο φυσικό έγχρωμο σύνθετο, (β) 1 ^η Εφαρμογή, απεικόνιση QUICKBIRD στο εγγύς υπέρυθρο κανάλι.	140
Εικόνα 3.37: (α) 1 ^η Εφαρμογή, ASF 1 επανάληψης, (β) 1 ^η Εφαρμογή, ASF 6 επαναλήψεων, (γ) 1 ^η Εφαρμογή, ASF 21 επαναλήψεων.	141
Εικόνα 3.38: 1 ^η Εφαρμογή, ASF 21 επαναλήψεων. Παρατηρείται η αδυναμία διατήρησης βασικών ακμών με ταυτόχρονη εμφάνιση πολλών ακμών στη θαλάσσια περιοχή.	142
Εικόνα 3.39: 1 ^η Εφαρμογή, σύγκριση ανίχνευσης ακμών με τον τελεστή Canny έπειτα από φιλτράρισμα 11, 16 και 21 επαναλήψεων (κόκκινο, πράσινο και μπλε χρώμα, αντίστοιχα). Παρατηρείται μετατόπιση των περιγραμμάτων.....	142
Εικόνα 3.40: 1 ^η Εφαρμογή, ASF 26 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.	143
Εικόνα 3.41: 1 ^η Εφαρμογή, ανιστροπική διάχυση PM (α) 1 επανάληψης, (β) 16 επαναλήψεων, (γ) 26 επαναλήψεων, (δ) 36 επαναλήψεων, (ε) 46 επαναλήψεων, (στ) 56 επαναλήψεων.	144
Εικόνα 3.42: (α) και (γ) 1 ^η Εφαρμογή, ανιστροπική διάχυση PM 1 επανάληψης, (β) και (δ) 1 ^η Εφαρμογή, ανιστροπική διάχυση PM 46 επαναλήψεων. Παράδειγμα ακαταλληλότητας της τεχνικής έπειτα από μικρό αριθμό επαναλήψεων.	145
Εικόνα 3.43: 1 ^η Εφαρμογή, PM 11 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.	146
Εικόνα 3.44: (α) 1 ^η Εφαρμογή, ανιστροπική διάχυση ALM 1 επανάληψης, (β) 1 ^η Εφαρμογή, ανιστροπική διάχυση ALM 200 επαναλήψεων.....	146
Εικόνα 3.45: (α) 1 ^η Εφαρμογή, ανιστροπική διάχυση ALM 1 επανάληψης, (β) 1 ^η Εφαρμογή, ανιστροπική διάχυση ALM 200 επαναλήψεων. Παράδειγμα σύγκλισης του αλγορίθμου.	147

Εικόνα 3.46: 1 ^η Εφαρμογή, ALM 200 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.....	148
Εικόνα 3.47: (α) 1 ^η Εφαρμογή, ML 1 επανάληψης, (β) 1 ^η Εφαρμογή, ML 6 επαναλήψεων, (γ) 1 ^η Εφαρμογή, ML 26 επαναλήψεων.	148
Εικόνα 3.48: 1 ^η Εφαρμογή, σύγκριση ανίχνευσης ακμών με τον τελεστή Canny έπειτα από φιλτράρισμα 1 και 16 επαναλήψεων (κόκκινο και πράσινο χρώμα, αντίστοιχα). Παρατηρείται μετατόπιση των περιγραμμάτων.....	149
Εικόνα 3.49: (α) 1 ^η Εφαρμογή, ML 1 επανάληψης, (β) 1 ^η Εφαρμογή, ML 6 επαναλήψεων. Παράδειγμα της έντονης εξάρτησης της μεθόδου από τους γκαουσιανούς σηματοδευτές.	149
Εικόνα 3.50: 1 ^η Εφαρμογή, ML 6 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.....	150
Εικόνα 3.51: (α) 1 ^η Εφαρμογή, PM 20 επαναλήψεων, (β) 1 ^η Εφαρμογή, PM 20 επαναλήψεων και ML 10 επαναλήψεων.	151
Εικόνα 3.52: 1 ^η Εφαρμογή, PM 20 επαναλήψεων και ML 10 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.....	152
Εικόνα 3.53: (α) 1 ^η Εφαρμογή, ALM 100 επαναλήψεων, (β) 1 ^η Εφαρμογή, ALM 100 επαναλήψεων και ML 5 επαναλήψεων.	152
Εικόνα 3.54: 1 ^η Εφαρμογή, ALM 60 επαναλήψεων και ML 5 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.....	153
Εικόνα 3.55: (α) 2 ^η Εφαρμογή, απεικόνιση QUICKBIRD στο φυσικό έγχρωμο σύνθετο, (β) 2 ^η Εφαρμογή, απεικόνιση QUICKBIRD στο εγγύς υπέρυθρο κανάλι.	154
Εικόνα 3.56: (α) 2 ^η Εφαρμογή, ASF 4 επαναλήψεων, (β) 2 ^η Εφαρμογή, ASF 36 επαναλήψεων.	155
Εικόνα 3.57: 2 ^η Εφαρμογή, ASF 1 επανάληψης. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.....	156
Εικόνα 3.58: 2 ^η Εφαρμογή, ανισοτροπική διάχυση PM (α) 1 επανάληψης, (β) 21 επαναλήψεων, (γ) 41 επαναλήψεων, (δ) 61 επαναλήψεων.	157
Εικόνα 3.59: (α) 2 ^η Εφαρμογή, ανισοτροπική διάχυση PM 1 επανάληψης, (β) 2 ^η Εφαρμογή, ανισοτροπική διάχυση PM 61 επαναλήψεων. Παράδειγμα ακαταλληλότητας της τεχνικής έπειτα από μικρό αριθμό επαναλήψεων.....	157
Εικόνα 3.60: 2 ^η Εφαρμογή, PM 11 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.....	158
Εικόνα 3.61: (α) 2 ^η Εφαρμογή, ανισοτροπική διάχυση ALM 1 επανάληψης, (β) 2 ^η Εφαρμογή, ανισοτροπική διάχυση ALM 200 επαναλήψεων. Παράδειγμα σύγκλισης του αλγορίθμου.....	159
Εικόνα 3.62: (α) 2 ^η Εφαρμογή, ανισοτροπική διάχυση ALM 1 επανάληψης, (β) 2 ^η Εφαρμογή, ανισοτροπική διάχυση ALM 200 επαναλήψεων. Παράδειγμα σύγκλισης του αλγορίθμου.....	159
Εικόνα 3.63: 2 ^η Εφαρμογή, ALM 200 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.....	160
Εικόνα 3.64: (α) 2 ^η Εφαρμογή, ML 1 επανάληψης, (β) 2 ^η Εφαρμογή, ML 11 επαναλήψεων, (γ) 2 ^η Εφαρμογή, ML 21 επαναλήψεων, (δ) 2 ^η Εφαρμογή, ML 36 επαναλήψεων.	161
Εικόνα 3.65: 2 ^η Εφαρμογή, σύγκριση ανίχνευσης ακμών με τον τελεστή Canny έπειτα από φιλτράρισμα 11 και 36 επαναλήψεων (κόκκινο και πράσινο χρώμα, αντίστοιχα). Παρατηρείται μετατόπιση των περιγραμμάτων.....	162

Εικόνα 3.66: 2 ^η Εφαρμογή, ML 11 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.....	163
Εικόνα 3.67: (α) 2 ^η Εφαρμογή, PM 50 επαναλήψεων, (β) 2 ^η Εφαρμογή, PM 50 επαναλήψεων και ML 10 επαναλήψεων.	163
Εικόνα 3.68: 2 ^η Εφαρμογή, PM 50 επαναλήψεων και ML 5 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.	164
Εικόνα 3.69: (α) 2 ^η Εφαρμογή, ALM 60 επαναλήψεων, (β) 2 ^η Εφαρμογή, ALM 60 επαναλήψεων και ML 5 επαναλήψεων.	165
Εικόνα 3.70: 2 ^η Εφαρμογή, ALM 60 επαναλήψεων και ML 5 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.	166
Εικόνα 3.71: (α) 3 ^η Εφαρμογή, απεικόνιση ASTER σε ψευδέγχρωμο σύνθετο RGB-123, (β) 3 ^η Εφαρμογή, απεικόνιση ASTER στο εγγύς υπέρυθρο κανάλι.	167
Εικόνα 3.72: (α) 3 ^η Εφαρμογή, ASF 1 επανάληψης, (β) 3 ^η Εφαρμογή, ASF 11 επαναλήψεων, (γ) 3 ^η Εφαρμογή, ASF 26 επαναλήψεων.	168
Εικόνα 3.73: 3 ^η Εφαρμογή, ASF 11 επαναλήψεων. (α) Αρχική εικόνα και ανίχνευση ακμών σε τμήμα της (β) με τον τελεστή Canny, (γ) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.	169
Εικόνα 3.74: 3 ^η Εφαρμογή, ανισοτροπική διάχυση PM (α) 1 επανάληψης, (β) 21 επαναλήψεων. Παράδειγμα μη σύγκλισης αλγορίθμου.....	170
Εικόνα 3.75: 3 ^η Εφαρμογή. (α) Αρχική εικόνα, PM 1 επανάληψης, (β) PM 1 επανάληψης σε τμήμα της αρχικής εικόνας, (γ) PM 11 επαναλήψεων σε τμήμα της αρχικής εικόνας. Παράδειγμα μετατόπισης περιγραμμάτων έπειτα από μικρό αριθμό επαναλήψεων.	170
Εικόνα 3.76: 3 ^η Εφαρμογή, PM 11 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.....	171
Εικόνα 3.77: 3 ^η Εφαρμογή, ανισοτροπική διάχυση ALM (α)1 επανάληψης, (β) 50 επαναλήψεων, (γ) 100 επαναλήψεων σε τμήμα της αρχικής εικόνας. Παράδειγμα σύγκλισης του αλγορίθμου.....	171
Εικόνα 3.78: 3 ^η Εφαρμογή, ALM 26 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.....	172
Εικόνα 3.79: 3 ^η Εφαρμογή. (α) Αρχική εικόνα, (β) ML 1 επανάληψης σε τμήμα της αρχικής εικόνας, (β) ML 35 επαναλήψεων σε τμήμα της αρχικής εικόνας.	173
Εικόνα 3.80: 3 ^η Εφαρμογή, σύγκριση ανίχνευσης ακμών με τον τελεστή Canny έπειτα από φιλτράρισμα 1 και 16 επαναλήψεων (κόκκινο και πράσινο χρώμα, αντίστοιχα). Παρατηρείται μετατόπιση των περιγραμμάτων.....	173
Εικόνα 3.81: 3 ^η Εφαρμογή, ML 11 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.....	174
Εικόνα 3.82: (α) 3 ^η Εφαρμογή, PM 10 επαναλήψεων, (β) 3 ^η Εφαρμογή, PM 10 επαναλήψεων και ML 5 επαναλήψεων σε τμήμα της αρχικής εικόνας.	175
Εικόνα 3.83: 3 ^η Εφαρμογή, PM 10 επαναλήψεων και ML 5 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.	175
Εικόνα 3.84: (α) 3 ^η Εφαρμογή, ALM 50 επαναλήψεων, (β) 3 ^η Εφαρμογή, ALM 50 επαναλήψεων και ML 5 επαναλήψεων.	176

Εικόνα 3.85: 3 ^η Εφαρμογή, ALM 50 επαναλήψεων και ML 5 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.	177
Εικόνα 3.86: (α) 4 ^η Εφαρμογή, απεικόνιση QUICKBIRD στο φυσικό έγχρωμο σύνθετο, (β) 4 ^η Εφαρμογή, απεικόνιση QUICKBIRD στο εγγύς υπέρυθρο κανάλι.	177
Εικόνα 3.87: (α) 4 ^η Εφαρμογή, ASF 1 επανάληψης, (β) 4 ^η Εφαρμογή, ASF 4 επαναλήψεων, (γ) 4 ^η Εφαρμογή, ASF 21 επαναλήψεων.	178
Εικόνα 3.88: 4 ^η Εφαρμογή, ASF 4 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.....	178
Εικόνα 3.89: 4 ^η Εφαρμογή, ανισοτροπική διάχυση PM (α) 1 επανάληψης, (β) 26 επαναλήψεων. Παράδειγμα μη σύγκλισης αλγορίθμου.....	179
Εικόνα 3.90: 4 ^η Εφαρμογή, PM 11 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.....	180
Εικόνα 3.91: 4 ^η Εφαρμογή, ανισοτροπική διάχυση ALM (α) 1 επανάληψης, (β) 100 επαναλήψεων, (γ) 200 επαναλήψεων, σε τμήμα της αρχικής εικόνας. Παράδειγμα σύγκλισης του αλγορίθμου.	180
Εικόνα 3.92: 4 ^η Εφαρμογή, ALM 200 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.....	181
Εικόνα 3.93: 4 ^η Εφαρμογή, σύγκριση ανίχνευσης ακμών με τον τελεστή Canny έπειτα από φιλτράρισμα 6 και 11 επαναλήψεων (κόκκινο και πράσινο χρώμα, αντίστοιχα). Παρατηρείται μετατόπιση των περιγραμμάτων.....	182
Εικόνα 3.94: 4 ^η Εφαρμογή, ML 11 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.....	183
Εικόνα 3.95: (α) 4 ^η Εφαρμογή, PM 16 επαναλήψεων, (β) 4 ^η Εφαρμογή, PM 16 επαναλήψεων και ML 5 επαναλήψεων.	183
Εικόνα 3.96: 4 ^η Εφαρμογή, PM 15 επαναλήψεων και ML 5 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.	184
Εικόνα 3.97: (α) 4 ^η Εφαρμογή, ALM 200 επαναλήψεων, (β) 4 ^η Εφαρμογή, ALM 200 επαναλήψεων και ML 5 επαναλήψεων.	185
Εικόνα 3.98: 4 ^η Εφαρμογή, ALM 100 επαναλήψεων και ML 5 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.	185
Εικόνα 3.99: (α) 5 ^η Εφαρμογή, απεικόνιση QUICKBIRD στο φυσικό έγχρωμο σύνθετο, (β) 5 ^η Εφαρμογή, απεικόνιση QUICKBIRD στο εγγύς υπέρυθρο κανάλι.....	186
Εικόνα 3.100: (α) 5 ^η Εφαρμογή, ASF 1 επανάληψης, (β) 5 ^η Εφαρμογή, ASF 21 επαναλήψεων.	187
Εικόνα 3.101: 5 ^η Εφαρμογή, ASF 4 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.....	187
Εικόνα 3.102: (α) 5 ^η Εφαρμογή, PM 1 επανάληψης, (β) 5 ^η Εφαρμογή, PM 26 επαναλήψεων. Παράδειγμα μη σύγκλισης αλγορίθμου.	188
Εικόνα 3.103: 5 ^η Εφαρμογή, PM 11 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.....	189
Εικόνα 3.104: 5 ^η Εφαρμογή, ανισοτροπική διάχυση ALM (α) 1 επανάληψης, (β) 100 επαναλήψεων, (γ) 200 επαναλήψεων, σε τμήμα της αρχικής εικόνας. Παράδειγμα σύγκλισης του αλγορίθμου.	190

Εικόνα 3.105: 5 ^η Εφαρμογή, ανισοτροπική διάχυση ALM (α) 1 επανάληψης, (β) 200 επαναλήψεων με το μορφολογικό Laplace τελεστή, σε τμήμα της αρχικής εικόνας. Παράδειγμα σύγκλισης του αλγορίθμου.....	190
Εικόνα 3.106: 5 ^η Εφαρμογή, ML (α) 1 επανάληψης, (β) 21 επαναλήψεων.....	191
Εικόνα 3.107: 5 ^η Εφαρμογή, σύγκριση ανίχνευσης ακμών με τον τελεστή Canny έπειτα από φιλτράρισμα 1 και 11 επαναλήψεων (κόκκινο και πράσινο χρώμα, αντίστοιχα). Παρατηρείται μετατόπιση των περιγραμμάτων.....	191
Εικόνα 3.108: 5 ^η Εφαρμογή, ML 11 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.....	192
Εικόνα 3.109: (α) 5 ^η Εφαρμογή, PM 1 επανάληψης, (β) 5 ^η Εφαρμογή, PM 1 επανάληψης και ML 5 επαναλήψεων.....	193
Εικόνα 3.110: 5 ^η Εφαρμογή, PM 5 επαναλήψεων και ML 5 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.	193
Εικόνα 3.111: (α) 5 ^η Εφαρμογή, ALM 5 επαναλήψεων, (β) 5 ^η Εφαρμογή, ALM 5 επαναλήψεων και ML 5 επαναλήψεων.	194
Εικόνα 3.112: 5 ^η Εφαρμογή, ALM 5 επαναλήψεων και ML 5 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.	195
Εικόνα 3.113: (α) 6 ^η Εφαρμογή, απεικόνιση WORLDVIEW-2 στο φυσικό έγχρωμο σύνθετο, (β) 6 ^η Εφαρμογή, απεικόνιση WORLDVIEW-2 στο κόκκινο κανάλι.	195
Εικόνα 3.114: (α) 6 ^η Εφαρμογή, ASF 3 επαναλήψεων, (β) 6 ^η Εφαρμογή, ASF 26 επαναλήψεων.	196
Εικόνα 3.115: 6 ^η Εφαρμογή, ASF 4 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.....	196
Εικόνα 3.116: (α) 6 ^η Εφαρμογή, PM 1 επανάληψης, (β) 6 ^η Εφαρμογή, PM 100 επαναλήψεων. Παράδειγμα μη σύγκλισης αλγορίθμου.	197
Εικόνα 3.117: 6 ^η Εφαρμογή, PM 11 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.....	197
Εικόνα 3.118: 6 ^η Εφαρμογή, ανισοτροπική διάχυση ALM (α) 1 επανάληψης, (β) 100 επαναλήψεων, (γ) 300 επαναλήψεων. Παράδειγμα σύγκλισης του αλγορίθμου.....	198
Εικόνα 3.119: 6 ^η Εφαρμογή, ALM 11 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.....	199
Εικόνα 3.120: 6 ^η Εφαρμογή, ML (α) 6 επαναλήψεων, (β) 21 επαναλήψεων.	199
Εικόνα 3.121: 6 ^η Εφαρμογή, σύγκριση ανίχνευσης ακμών με τον τελεστή Canny έπειτα από φιλτράρισμα 1 και 21 επαναλήψεων (κόκκινο και πράσινο χρώμα, αντίστοιχα). Παρατηρείται μετατόπιση των περιγραμμάτων.....	200
Εικόνα 3.122: 6 ^η Εφαρμογή, ML 11 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.....	201
Εικόνα 3.123: (α) 6 ^η Εφαρμογή, PM 30 επαναλήψεων, (β) 6 ^η Εφαρμογή, PM 30 επαναλήψεων και ML 5 επαναλήψεων.	201
Εικόνα 3.124: 6 ^η Εφαρμογή, PM 10 επαναλήψεων και ML 5 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.	202
Εικόνα 3.125: (α) 6 ^η Εφαρμογή, ALM 300 επαναλήψεων, (β) 6 ^η Εφαρμογή, ALM 300 επαναλήψεων και ML 5 επαναλήψεων.	203

Εικόνα 3.126: 6 ^η Εφαρμογή, ALM 20 επαναλήψεων και ML 5 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.	203
Εικόνα 3.127: (α) 7 ^η Εφαρμογή, απεικόνιση WORLDVIEW-2 στο φυσικό έγχρωμο σύνθετο, (β) 7 ^η Εφαρμογή, απεικόνιση WORLDVIEW-2 στο κόκκινο κανάλι.	204
Εικόνα 3.128: (α) 7 ^η Εφαρμογή, ASF 4 επαναλήψεων, (β) 7 ^η Εφαρμογή, ASF 50 επαναλήψεων.	205
Εικόνα 3.129: 7 ^η Εφαρμογή, ASF 4 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.....	205
Εικόνα 3.130: (α) 7 ^η Εφαρμογή, PM 1 επανάληψης, (β) 7 ^η Εφαρμογή, PM 300 επαναλήψεων. Παράδειγμα μη σύγκλισης αλγορίθμου.	206
Εικόνα 3.131: 7 ^η Εφαρμογή, PM 11 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.....	206
Εικόνα 3.132: 7 ^η Εφαρμογή, ανισοτροπική διάχυση ALM (α) 1 επανάληψης, (β) 100 επαναλήψεων, (γ) 200 επαναλήψεων. Παράδειγμα σύγκλισης του αλγορίθμου.....	207
Εικόνα 3.133: 7 ^η Εφαρμογή, ALM 11 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.....	208
Εικόνα 3.134: 7 ^η Εφαρμογή, ML (α) 1 επανάληψης, (β) 21 επαναλήψεων.....	209
Εικόνα 3.135: 7 ^η Εφαρμογή, σύγκριση ανίχνευσης ακμών με τον τελεστή Canny έπειτα από φιλτράρισμα 1 και 21 επαναλήψεων (κόκκινο και πράσινο χρώμα, αντίστοιχα). Παρατηρείται μετατόπιση των περιγραμμάτων.....	209
Εικόνα 3.136: 7 ^η Εφαρμογή, ML 11 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.....	210
Εικόνα 3.137: (α) 7 ^η Εφαρμογή, PM 100 επαναλήψεων, (β) 7 ^η Εφαρμογή, PM 100 επαναλήψεων και ML 5 επαναλήψεων.	211
Εικόνα 3.138: 7 ^η Εφαρμογή, PM 10 επαναλήψεων και ML 5 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.	211
Εικόνα 3.139: (α) 7 ^η Εφαρμογή, ALM 200 επαναλήψεων, (β) 7 ^η Εφαρμογή, ALM 200 επαναλήψεων και ML 5 επαναλήψεων.	212
Εικόνα 3.140: 7 ^η Εφαρμογή, ALM 20 επαναλήψεων και ML 5 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.	213
Εικόνα 3.141: 8 ^η Εφαρμογή, απεικόνιση TERRASAR-X.	213
Εικόνα 3.142: (α) 8 ^η Εφαρμογή, ASF 2 επαναλήψεων, (β) 8 ^η Εφαρμογή, ASF 40 επαναλήψεων.	215
Εικόνα 3.143: 8 ^η Εφαρμογή, ASF 2 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.....	216
Εικόνα 3.144: (α) 8 ^η Εφαρμογή, PM 1 επανάληψης, (β) 8 ^η Εφαρμογή, PM 100 επαναλήψεων. Παράδειγμα μη σύγκλισης αλγορίθμου.	216
Εικόνα 3.145: 8 ^η Εφαρμογή, PM 11 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.....	217
Εικόνα 3.146: 8 ^η Εφαρμογή, ανισοτροπική διάχυση ALM (α) 1 επανάληψης, (β) 100 επαναλήψεων, (γ) 300 επαναλήψεων, σε τμήμα της αρχικής εικόνας.....	217

Εικόνα 3.147: 8 ^η Εφαρμογή, ALM 11 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.....	218
Εικόνα 3.148: 8 ^η Εφαρμογή, ML (a) 1 επανάληψης, (β) 50 επαναλήψεων.....	219
Εικόνα 3.149: 8 ^η Εφαρμογή, σύγκριση ανίχνευσης ακμών με τον τελεστή Canny έπειτα από φιλτράρισμα 1 και 50 επαναλήψεων (κόκκινο και πράσινο χρώμα, αντίστοιχα). Παρατηρείται μετατόπιση των περιγραμμάτων.....	219
Εικόνα 3.150: 8 ^η Εφαρμογή, ML 16 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.....	220
Εικόνα 3.151: (α) 8 ^η Εφαρμογή, PM 6 επαναλήψεων, (β) 8 ^η Εφαρμογή, PM 6 επαναλήψεων και ML 5 επαναλήψεων.	220
Εικόνα 3.152: 8 ^η Εφαρμογή, PM 15 επαναλήψεων και ML 5 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.	221
Εικόνα 3.153: (α) 8 ^η Εφαρμογή, ALM 100 επαναλήψεων, (β) 8 ^η Εφαρμογή, ALM 100 επαναλήψεων και ML 10 επαναλήψεων.	222
Εικόνα 3.154: 8 ^η Εφαρμογή, ALM 20 επαναλήψεων και ML 5 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.	222
Εικόνα 3.155: 9 ^η Εφαρμογή, απεικόνιση TERRASAR-X.	223
Εικόνα 3.156: (α) 9 ^η Εφαρμογή, ASF 3 επαναλήψεων, (β) 9 ^η Εφαρμογή, ASF 31 επαναλήψεων.	223
Εικόνα 3.157: 9 ^η Εφαρμογή, ASF 11 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.....	224
Εικόνα 3.158: (α) 9 ^η Εφαρμογή, PM 1 επανάληψης, (β) 9 ^η Εφαρμογή, PM 41 επαναλήψεων. Παράδειγμα μη σύγκλισης αλγορίθμου.	225
Εικόνα 3.159: 9 ^η Εφαρμογή, PM 11 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.....	225
Εικόνα 3.160: 9 ^η Εφαρμογή, ανισοτροπική διάχυση ALM (α) 1 επανάληψης, (β) 100 επαναλήψεων, (γ) 300 επαναλήψεων, σε τμήμα της αρχικής εικόνας.....	226
Εικόνα 3.161: 9 ^η Εφαρμογή, ALM 100 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.	227
Εικόνα 3.162: 9 ^η Εφαρμογή, ML (a) 6 επαναλήψεων, (β) 46 επαναλήψεων.	227
Εικόνα 3.163: 9 ^η Εφαρμογή, (α) αρχική εικόνα, (β) σύγκριση ανίχνευσης ακμών με τον τελεστή Canny έπειτα από φιλτράρισμα 1 και 46 επαναλήψεων (κόκκινο και πράσινο χρώμα, αντίστοιχα). Παρατηρείται μετατόπιση των περιγραμμάτων.	228
Εικόνα 3.164: 9 ^η Εφαρμογή, ML 16 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.....	229
Εικόνα 3.165: (α) 9 ^η Εφαρμογή, PM 50 επαναλήψεων, (β) 9 ^η Εφαρμογή, PM 50 επαναλήψεων και ML 5 επαναλήψεων.	230
Εικόνα 3.166: 9 ^η Εφαρμογή, PM 20 επαναλήψεων και ML 5 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.	230
Εικόνα 3.167: (α) 9 ^η Εφαρμογή, ALM 300 επαναλήψεων, (β) 9 ^η Εφαρμογή, ALM 300 επαναλήψεων και ML 5 επαναλήψεων.	231
Εικόνα 3.168: 9 ^η Εφαρμογή, ALM 50 επαναλήψεων και ML 5 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.	231
Εικόνα 3.169: 1 ^η Εφαρμογή, (α) απεικόνιση QUICKBIRD στο εγγύς υπέρυθρο κανάλι, (β) το ιστόγραμμα συχνοτήτων της απεικόνισης.....	232

Εικόνα 3.170: 1 ^η Εφαρμογή, (α) διαχωρισμός χερσαίας-υδάτινης επιφάνειας έπειτα από κατωφλίωση (δυαδική εικόνα), (β) υπέρθεση ακτογραμμής στην αρχική απεικόνιση έπειτα από κατωφλίωση.....	233
Εικόνα 3.171: 1 ^η Εφαρμογή, (α) απεικόνιση QUICKBIRD στο εγγύς υπέρυθρο κανάλι, (β) συσταδοποίηση Κ-μέσου σε δύο κλάσεις.....	234
Εικόνα 3.172: 1 ^η Εφαρμογή, (α) συσταδοποίηση Κ-μέσου σε τέσσερις κλάσεις, (β) διαχωρισμός χερσαίας-υδάτινης επιφάνειας σε δύο κλάσεις, (γ) υπέρθεση ακτογραμμής στην αρχική απεικόνιση έπειτα από συσταδοποίηση Κ-μέσου.	235
Εικόνα 3.173: 9 ^η Εφαρμογή, (α) απεικόνιση TERRASAR-X, (β) ανάλυση υψής με μέτρηση της εντροπίας, (γ) κατωφλίωση τεσσάρων επιπέδων στην εικόνα υψής.....	236
Εικόνα 3.174: 9 ^η Εφαρμογή, (α) διαχωρισμός χερσαίας-υδάτινης επιφάνειας, (β) υπέρθεση ακτογραμμής στην αρχική απεικόνιση έπειτα από μέτρηση της εντροπίας.....	237
Εικόνα 3.175: 1 ^η Εφαρμογή, (α) απεικόνιση QUICKBIRD στο εγγύς υπέρυθρο κανάλι, (β) ανίχνευση ακμών με τον τελεστή Canny έπειτα από ALM 200 επαναλήψεων, (γ) συσταδοποίηση Κ-μέσου σε τέσσερις κλάσεις, (δ) υπέρθεση ακτογραμμής στην αρχική απεικόνιση έπειτα από συσταδοποίηση Κ-μέσου, (ε) εύρος ζώνης 8 εικονοστοιχείων στην ακτογραμμή που προκύπτει από τη συσταδοποίηση, (στ) διατήρηση των ακμών της (β) εντός του εύρους ζώνης με αποτέλεσμα την αφαίρεση πολλών ανεπιθύμητων ακμών. ...	238
Εικόνα 3.176: 1 ^η Εφαρμογή, (α) υπέρθεση των ακμών εντός του εύρους ζώνης (εικόνα 4.175(στ)) στην αρχική απεικόνιση, (β)τελική θέση ακτογραμμής.	239
Εικόνα 4.1: 1 ^η Εφαρμογή, (α) απεικόνιση QUICKBIRD στο φυσικό έγχρωμο σύνθετο, (β) ανισοτροπική διάχυση ALM 200 επαναλήψεων και ανίχνευση ακμών με τον Canny.....	245
Εικόνα 4.2: 1 ^η Εφαρμογή, (α) απεικόνιση QUICKBIRD στο φυσικό έγχρωμο σύνθετο, (β) ανισοτροπική διάχυση ALM 100 επαναλήψεων, μορφολογική εξομάλυνση ML 5 επαναλήψεων και ανίχνευση ακμών με τον Canny.....	246
Εικόνα 4.3: 1 ^η Εφαρμογή, (α) απεικόνιση QUICKBIRD στο εγγύς υπέρυθρο κανάλι, (β) το ιστόγραμμα συχνότητων της απεικόνισης.....	247
Εικόνα 4.4: 1 ^η Εφαρμογή, (α) διαχωρισμός χερσαίας-υδάτινης επιφάνειας έπειτα από κατωφλίωση (δυαδική εικόνα), (β) αφαίρεση μικρών αντικειμένων της χερσαίας και της υδάτινης επιφάνειας, (γ) υπέρθεση ακτογραμμής στην αρχική απεικόνιση έπειτα από κατωφλίωση, (δ) εύρος ζώνης 8 εικονοστοιχείων στην ακτογραμμή που προκύπτει από την κατωφλίωση.....	248
Εικόνα 4.5: 1 ^η Εφαρμογή, υπέρθεση των ακμών εντός του εύρους ζώνης (εικόνα 4.4(δ)) στην αρχική απεικόνιση και τελική θέση ακτογραμμής, αντίστοιχα, έπειτα από προ-επεξεργασία με (α), (γ) ALM και (β), (δ) ALM συνδυαστικά με ML.....	249
Εικόνα 4.6: 1 ^η Εφαρμογή, (α) συσταδοποίηση Κ-μέσου σε τέσσερις κλάσεις, (β) διαχωρισμός χερσαίας-υδάτινης επιφάνειας σε δύο κλάσεις, (γ) αφαίρεση μικρών αντικειμένων της χερσαίας και της υδάτινης επιφάνειας, (γ) υπέρθεση ακτογραμμής στην αρχική απεικόνιση έπειτα από συσταδοποίηση Κ-μέσου, (ε) εύρος ζώνης 8 εικονοστοιχείων στην ακτογραμμή που προκύπτει από τη συσταδοποίηση.	252
Εικόνα 4.7: 1 ^η Εφαρμογή, υπέρθεση των ακμών εντός του εύρους ζώνης (εικόνα 4.6(ε)) στην αρχική απεικόνιση και τελική θέση ακτογραμμής, αντίστοιχα, έπειτα από προ-επεξεργασία με (α), (γ) ALM και (β), (δ) ALM συνδυαστικά με ML.....	253
Εικόνα 4.8: 1 ^η Εφαρμογή, (α) απεικόνιση QUICKBIRD στο εγγύς υπέρυθρο κανάλι, (β) ανάλυση υψής με μέτρηση της εντροπίας, (γ) κατωφλίωση επτά επιπέδων στην εικόνα υψής, (δ) υπέρθεση ακτογραμμής στην αρχική απεικόνιση έπειτα από μέτρηση της εντροπίας.	256

Εικόνα 4.9: 2 ^η Εφαρμογή, (α) απεικόνιση QUICKBIRD στο φυσικό έγχρωμο σύνθετο, (β) ανισοτροπική διάχυση ALM 200 επαναλήψεων και ανίχνευση ακμών με τον Canny.....	259
Εικόνα 4.10: 1 ^η Εφαρμογή, (α) απεικόνιση QUICKBIRD στο φυσικό έγχρωμο σύνθετο, (β) ανισοτροπική διάχυση ALM 60 επαναλήψεων, μορφολογική εξομάλυνση ML 5 επαναλήψεων και ανίχνευση ακμών με τον Canny.....	259
Εικόνα 4.11: 2 ^η Εφαρμογή, (α) απεικόνιση QUICKBIRD στο εγγύς υπέρυθρο κανάλι, (β) το ιστόγραμμα συχνότητων της απεικόνισης.....	260
Εικόνα 4.12: 2 ^η Εφαρμογή, (α) διαχωρισμός χερσαίας-υδάτινης επιφάνειας έπειτα από κατωφλίωση (δυναμική εικόνα), (β) αφαίρεση μικρών αντικειμένων της χερσαίας και της υδάτινης επιφάνειας, (γ) υπέρθεση ακτογραμμής στην αρχική απεικόνιση έπειτα από κατωφλίωση, (δ) εύρος ζώνης 4 εικονοστοιχείων στην ακτογραμμή που προκύπτει από την κατωφλίωση.....	261
Εικόνα 4.13: 2 ^η Εφαρμογή, υπέρθεση των ακμών εντός του εύρους ζώνης (εικόνα 4.12(δ)) στην αρχική απεικόνιση και τελική θέση ακτογραμμής, αντίστοιχα, έπειτα από προεπεξεργασία με (α), (γ) ALM και (β), (δ) ALM συνδυαστικά με ML.....	262
Εικόνα 4.14: 2 ^η Εφαρμογή, (α) συσταδοποίηση Κ-μέσου σε έξι κλάσεις, (β) διαχωρισμός χερσαίας-υδάτινης επιφάνειας σε δύο κλάσεις, (γ) αφαίρεση μικρών αντικειμένων της χερσαίας και της υδάτινης επιφάνειας, (γ) υπέρθεση ακτογραμμής στην αρχική απεικόνιση έπειτα από συσταδοποίηση Κ-μέσου, (ε) εύρος ζώνης 8 εικονοστοιχείων στην ακτογραμμή που προκύπτει από τη συσταδοποίηση.....	265
Εικόνα 4.15: 2 ^η Εφαρμογή, υπέρθεση των ακμών εντός του εύρους ζώνης (εικόνα 4.14(ε)) στην αρχική απεικόνιση και τελική θέση ακτογραμμής, αντίστοιχα, έπειτα από προεπεξεργασία με (α), (γ) ALM και (β), (δ) ALM συνδυαστικά με ML.....	266
Εικόνα 4.16: 2 ^η Εφαρμογή, (α) απεικόνιση QUICKBIRD στο εγγύς υπέρυθρο κανάλι, (β) ανάλυση υφής με μέτρηση της εντροπίας, (γ) κατωφλίωση τεσσάρων επιπέδων στην εικόνα υφής, (δ) υπέρθεση ακτογραμμής στην αρχική απεικόνιση έπειτα από μέτρηση της εντροπίας, (ε) εύρος ζώνης 8 εικονοστοιχείων στην ακτογραμμή που προκύπτει από την εντροπία.....	269
Εικόνα 4.17: 2 ^η Εφαρμογή, υπέρθεση των ακμών εντός του εύρους ζώνης (εικόνα 4.16(ε)) στην αρχική απεικόνιση και τελική θέση ακτογραμμής, αντίστοιχα, έπειτα από προεπεξεργασία με (α), (γ) ALM και (β), (δ) ALM συνδυαστικά με ML.....	270
Εικόνα 4.18: 3 ^η Εφαρμογή, (α) απεικόνιση ASTER σε ψευδέγχρωμο σύνθετο RGB-321,(β) ανισοτροπική διάχυση ALM 50 επαναλήψεων και ανίχνευση ακμών με τον Canny.....	274
Εικόνα 4.19: 3 ^η Εφαρμογή, (α) απεικόνιση ASTER σε ψευδέγχρωμο σύνθετο RGB-321, (β) ανισοτροπική διάχυση ALM 50 επαναλήψεων, μορφολογική εξομάλυνση ML 5 επαναλήψεων και ανίχνευση ακμών με τον Canny.....	275
Εικόνα 4.20: 3 ^η Εφαρμογή, (α) απεικόνιση ASTER στο εγγύς υπέρυθρο κανάλι, (β) το ιστόγραμμα συχνότητων της απεικόνισης.....	276
Εικόνα 4.21: 3 ^η Εφαρμογή, (α) διαχωρισμός χερσαίας-υδάτινης επιφάνειας έπειτα από κατωφλίωση (δυναμική εικόνα), (β) αφαίρεση μικρών αντικειμένων της χερσαίας και της υδάτινης επιφάνειας, (γ) υπέρθεση ακτογραμμής στην αρχική απεικόνιση έπειτα από κατωφλίωση, (δ) εύρος ζώνης 5 εικονοστοιχείων στην ακτογραμμή που προκύπτει από την κατωφλίωση.....	278
Εικόνα 4.22: 3 ^η Εφαρμογή, υπέρθεση των ακμών εντός του εύρους ζώνης (εικόνα 4.21(δ)) στην αρχική απεικόνιση και τελική θέση ακτογραμμής, αντίστοιχα, έπειτα από προεπεξεργασία με (α), (γ) ALM και (β), (δ) ALM συνδυαστικά με ML.....	280

Εικόνα 4.23: 3 ^η Εφαρμογή, (α) συσταδοποίηση Κ-μέσου σε τέσσερις κλάσεις, (β) υπέρθεση ακτογραμμής στην αρχική απεικόνιση έπειτα από συσταδοποίηση Κ-μέσου.	283
Εικόνα 4.24: 3 ^η Εφαρμογή, υπέρθεση των ακμών εντός του εύρους ζώνης στην αρχική απεικόνιση και τελική θέση ακτογραμμής, αντίστοιχα, έπειτα από προ-επεξεργασία με (α), (γ) ALM και (β), (δ) ALM συνδυαστικά με ML.	285
Εικόνα 4.25: 3 ^η Εφαρμογή, (α) απεικόνιση ASTER στο εγγύς υπέρυθρο κανάλι, (β) ανάλυση υψής με μέτρηση της εντροπίας, (γ) κατωφλίωση τεσσάρων επιπέδων στην εικόνα υψής, (δ) υπέρθεση ακτογραμμής στην αρχική απεικόνιση έπειτα από μέτρηση της εντροπίας.	288
Εικόνα 4.26: 3 ^η Εφαρμογή, τελική θέση ακτογραμμής έπειτα από προ-επεξεργασία με ALM και μέτρηση της εντροπίας.	289
Εικόνα 4.27: 4 ^η Εφαρμογή, (α) απεικόνιση QUICKBIRD στο φυσικό έγχρωμο σύνθετο, (β) ανισοτροπική διάχυση ALM 200 επαναλήψεων και ανίχνευση ακμών με τον Canny.	292
Εικόνα 4.28: 4 ^η Εφαρμογή, (α) απεικόνιση QUICKBIRD στο φυσικό έγχρωμο σύνθετο, (β) ανισοτροπική διάχυση ALM 200 επαναλήψεων, μορφολογική εξομάλυνση ML 5 επαναλήψεων και ανίχνευση ακμών με τον Canny.	293
Εικόνα 4.29: 4 ^η Εφαρμογή, (α) απεικόνιση QUICKBIRD στο εγγύς υπέρυθρο κανάλι, (β) το ιστόγραμμα συχνοτήτων της απεικόνισης.	294
Εικόνα 4.30: 4 ^η Εφαρμογή, (α) διαχωρισμός χερσαίας-υδάτινης επιφάνειας έπειτα από κατωφλίωση (δυναμική εικόνα), (β) αφαίρεση μικρών αντικειμένων της χερσαίας και της υδάτινης επιφάνειας, (γ) υπέρθεση ακτογραμμής στην αρχική απεικόνιση έπειτα από κατωφλίωση, (δ) εύρος ζώνης 6 εικονοστοιχείων στην ακτογραμμή που προκύπτει από την κατωφλίωση.	295
Εικόνα 4.31: 4 ^η Εφαρμογή, υπέρθεση των ακμών εντός του εύρους ζώνης (εικόνα 4.30(δ)) στην αρχική απεικόνιση και τελική θέση ακτογραμμής, αντίστοιχα, έπειτα από προ-επεξεργασία με (α), (γ) ALM και (β), (δ) ALM συνδυαστικά με ML.	296
Εικόνα 4.32: 4 ^η Εφαρμογή, (α) συσταδοποίηση Κ-μέσου σε τρεις κλάσεις, (β) διαχωρισμός χερσαίας-υδάτινης επιφάνειας σε δύο κλάσεις, (γ) αφαίρεση μικρών αντικειμένων της χερσαίας και της υδάτινης επιφάνειας, (γ) υπέρθεση ακτογραμμής στην αρχική απεικόνιση έπειτα από συσταδοποίηση Κ-μέσου, (ε) εύρος ζώνης 7 εικονοστοιχείων στην ακτογραμμή που προκύπτει από τη συσταδοποίηση.	299
Εικόνα 4.33: 4 ^η Εφαρμογή, υπέρθεση των ακμών εντός του εύρους ζώνης (εικόνα 4.32(ε)) στην αρχική απεικόνιση και τελική θέση ακτογραμμής, αντίστοιχα, έπειτα από προ-επεξεργασία με (α), (γ) ALM και (β), (δ) ALM συνδυαστικά με ML.	300
Εικόνα 4.34: 4 ^η Εφαρμογή, (α) απεικόνιση QUICKBIRD στο εγγύς υπέρυθρο κανάλι, (β) ανάλυση υψής με μέτρηση της εντροπίας, (γ) κατωφλίωση επτά επιπέδων στην εικόνα υψής, (δ) υπέρθεση ακτογραμμής στην αρχική απεικόνιση έπειτα από μέτρηση της εντροπίας.	303
Εικόνα 4.35: 5 ^η Εφαρμογή, (α) απεικόνιση QUICKBIRD στο φυσικό έγχρωμο σύνθετο, (β) ανισοτροπική διάχυση ALM 200 επαναλήψεων και ανίχνευση ακμών με τον Canny.	305
Εικόνα 4.36: 5 ^η Εφαρμογή, (α) απεικόνιση QUICKBIRD στο φυσικό έγχρωμο σύνθετο, (β) ανισοτροπική διάχυση ALM 200 επαναλήψεων και ανίχνευση ακμών με το μορφολογικό Laplace τελεστή.	306
Εικόνα 4.37: 5 ^η Εφαρμογή, (α) απεικόνιση QUICKBIRD στο εγγύς υπέρυθρο κανάλι, (β) το ιστόγραμμα συχνοτήτων της απεικόνισης.	307
Εικόνα 4.38: 5 ^η Εφαρμογή, (α) διαχωρισμός χερσαίας-υδάτινης επιφάνειας έπειτα από κατωφλίωση (δυναμική εικόνα), (β) αφαίρεση μικρών αντικειμένων της χερσαίας και της υδάτινης επιφάνειας, (γ) υπέρθεση ακτογραμμής στην αρχική απεικόνιση έπειτα από	

κατωφλίωση, (δ) εύρος ζώνης 15 εικονοστοιχείων στην ακτογραμμή που προκύπτει από την κατωφλίωση.	308
Εικόνα 4.39: 5 ^η Εφαρμογή, υπέρθεση των ακμών εντός του εύρους ζώνης (εικόνα 4.38(δ)) στην αρχική απεικόνιση και τελική θέση ακτογραμμής, αντίστοιχα, έπειτα από προ-επεξεργασία με ALM και ανίχνευση ακμών με τον (α), (γ) Canny και (β), (δ) μορφολογικό Laplace τελεστή.	309
Εικόνα 4.40: 5 ^η Εφαρμογή, (α) συσταδοποίηση Κ-μέσου σε τέσσερις κλάσεις, (β) διαχωρισμός χερσαίας-υδάτινης επιφάνειας σε δύο κλάσεις, (γ) αφαίρεση μικρών αντικειμένων της χερσαίας και της υδάτινης επιφάνειας, (γ) υπέρθεση ακτογραμμής στην αρχική απεικόνιση έπειτα από συσταδοποίηση Κ-μέσου, (ε) εύρος ζώνης 20 εικονοστοιχείων στην ακτογραμμή που προκύπτει από τη συσταδοποίηση.	312
Εικόνα 4.41: 5 ^η Εφαρμογή, υπέρθεση των ακμών εντός του εύρους ζώνης (εικόνα 4.40(ε)) στην αρχική απεικόνιση και τελική θέση ακτογραμμής, αντίστοιχα, έπειτα από προ-επεξεργασία με ALM και ανίχνευση ακμών με τον (α), (γ) Canny και (β), (δ) μορφολογικό Laplace τελεστή.	313
Εικόνα 4.42: 5 ^η Εφαρμογή, (α) απεικόνιση QUICKBIRD στο εγγύς υπέρυθρο κανάλι, (β) ανάλυση υφής με μέτρηση της εντροπίας, (γ) κατωφλίωση έξι επιπέδων στην εικόνα υφής, (δ) υπέρθεση ακτογραμμής στην αρχική απεικόνιση έπειτα από μέτρηση της εντροπίας.	316
Εικόνα 4.43: 5 ^η Εφαρμογή, υπέρθεση των ακμών εντός του εύρους ζώνης στην αρχική απεικόνιση και τελική θέση ακτογραμμής, αντίστοιχα, έπειτα από προ-επεξεργασία με ALM και ανίχνευση ακμών με τον (α), (γ) Canny και (β), (δ) μορφολογικό Laplace τελεστή.	317
Εικόνα 4.44: 6 ^η Εφαρμογή, (α) απεικόνιση WORLDVIEW-2 στο φυσικό έγχρωμο σύνθετο, (β) ανισοτροπική διάχυση ALM 300 επαναλήψεων και ανίχνευση ακμών με τον Canny. ..	321
Εικόνα 4.45: 6 ^η Εφαρμογή, (α) απεικόνιση WORLDVIEW-2 στο φυσικό έγχρωμο σύνθετο, (β) ανισοτροπική διάχυση ALM 300 επαναλήψεων, μορφολογική εξομάλυνση ML 5 επαναλήψεων και ανίχνευση ακμών με τον Canny.	322
Εικόνα 4.46: 6 ^η Εφαρμογή, (α) συσταδοποίηση Κ-μέσου σε δυο κλάσεις, (β) αφαίρεση μικρών αντικειμένων της χερσαίας και της υδάτινης επιφάνειας, (γ) υπέρθεση ακτογραμμής στην αρχική απεικόνιση έπειτα από συσταδοποίηση Κ-μέσου, (δ) εύρος ζώνης 4 εικονοστοιχείων στην ακτογραμμή που προκύπτει από τη συσταδοποίηση.	323
Εικόνα 4.47: 6 ^η Εφαρμογή, υπέρθεση των ακμών εντός του εύρους ζώνης (εικόνα 4.46(δ)) στην αρχική απεικόνιση και τελική θέση ακτογραμμής, αντίστοιχα, έπειτα από προ-επεξεργασία με (α), (γ) ALM και (β), (δ) ALM συνδυαστικά με ML.	324
Εικόνα 4.48: 6 ^η Εφαρμογή, (α) απεικόνιση WORLDVIEW-2 στο κόκκινο κανάλι, (β) ανάλυση υφής με μέτρηση της εντροπίας, (γ) κατωφλίωση οκτώ επιπέδων στην εικόνα υφής, (δ) υπέρθεση ακτογραμμής στην αρχική απεικόνιση έπειτα από μέτρηση της εντροπίας.	327
Εικόνα 4.49: 7 ^η Εφαρμογή, (α) απεικόνιση WORLDVIEW-2 στο φυσικό έγχρωμο σύνθετο, (β) ανισοτροπική διάχυση ALM 1 επανάληψης και ανίχνευση ακμών με τον Canny.	330
Εικόνα 4.50: 7 ^η Εφαρμογή, (α) απεικόνιση WORLDVIEW-2 στο φυσικό έγχρωμο σύνθετο, (β) ανισοτροπική διάχυση ALM 200 επαναλήψεων, μορφολογική εξομάλυνση ML 5 επαναλήψεων και ανίχνευση ακμών με τον Canny.	330
Εικόνα 4.51: 7 ^η Εφαρμογή, (α) συσταδοποίηση Κ-μέσου σε δυο κλάσεις, (β) αφαίρεση μικρών αντικειμένων της χερσαίας και της υδάτινης επιφάνειας, (γ) υπέρθεση ακτογραμμής στην αρχική απεικόνιση έπειτα από συσταδοποίηση Κ-μέσου, (δ) εύρος ζώνης 3 εικονοστοιχείων στην ακτογραμμή που προκύπτει από τη συσταδοποίηση.	332

Εικόνα 4.52: 7 ^η Εφαρμογή, υπέρθεση των ακμών εντός του εύρους ζώνης (εικόνα 4.51(δ)) στην αρχική απεικόνιση και τελική θέση ακτογραμμής, αντίστοιχα, έπειτα από προεπεξεργασία με (α), (γ) ALM και (β), (δ) ALM συνδυαστικά με ML.....	333
Εικόνα 4.53: 7 ^η Εφαρμογή, (α) απεικόνιση WORLDVIEW-2 στο κόκκινο κανάλι, (β) ανάλυση υψής με μέτρηση της εντροπίας, (γ) κατωφλίωση πέντε επιπέδων στην εικόνα υψής, (δ) υπέρθεση ακτογραμμής στην αρχική απεικόνιση έπειτα από μέτρηση της εντροπίας, (ε) εύρος ζώνης 8 εικονοστοιχείων στην ακτογραμμή που προκύπτει από την εντροπία.....	336
Εικόνα 4.54: 7 ^η Εφαρμογή, υπέρθεση των ακμών εντός του εύρους ζώνης (εικόνα 4.53(ε)) στην αρχική απεικόνιση και τελική θέση ακτογραμμής, αντίστοιχα, έπειτα από προεπεξεργασία με (α), (γ) ALM και (β), (δ) ALM συνδυαστικά με ML.....	337
Εικόνα 4.55: 8 ^η Εφαρμογή, (α) απεικόνιση TERRASAR-X, (β) ανισοτροπική διάχυση ALM 100 επαναλήψεων και ανίχνευση ακμών με τον Canny.....	342
Εικόνα 4.56: 8 ^η Εφαρμογή, (α) απεικόνιση TERRASAR-X, (β) ανισοτροπική διάχυση ALM 100 επαναλήψεων, μορφολογική εξομάλυνση ML 10 επαναλήψεων και ανίχνευση ακμών με τον Canny.....	343
Εικόνα 4.57: 8 ^η Εφαρμογή, (α) συσταδοποίηση Κ-μέσου σε έξι κλάσεις, (β) διαχωρισμός χερσαίας-υδάτινης επιφάνειας σε δύο κλάσεις, (γ) αφαίρεση μικρών αντικειμένων της χερσαίας και της υδάτινης επιφάνειας, (γ) υπέρθεση ακτογραμμής στην αρχική απεικόνιση έπειτα από συσταδοποίηση Κ-μέσου, (ε) εύρος ζώνης 7 εικονοστοιχείων στην ακτογραμμή που προκύπτει από τη συσταδοποίηση.....	344
Εικόνα 4.58: 8 ^η Εφαρμογή, υπέρθεση των ακμών εντός του εύρους ζώνης (εικόνα 4.57(ε)) στην αρχική απεικόνιση και τελική θέση ακτογραμμής, αντίστοιχα, έπειτα από προεπεξεργασία με (α), (γ) ALM και (β), (δ) ALM συνδυαστικά με ML.....	345
Εικόνα 4.59: 8 ^η Εφαρμογή, (α) απεικόνιση TERRASAR-X, (β) ανάλυση υψής με μέτρηση της εντροπίας, (γ) κατωφλίωση τεσσάρων επιπέδων στην εικόνα υψής, (δ) υπέρθεση ακτογραμμής στην αρχική απεικόνιση έπειτα από μέτρηση της εντροπίας, (ε) εύρος ζώνης 15 εικονοστοιχείων στην ακτογραμμή που προκύπτει από την εντροπία.....	349
Εικόνα 4.60: 8 ^η Εφαρμογή, υπέρθεση των ακμών εντός του εύρους ζώνης (εικόνα 4.59(ε)) στην αρχική απεικόνιση και τελική θέση ακτογραμμής, αντίστοιχα, έπειτα από προεπεξεργασία με (α), (γ) ALM και (β), (δ) ALM συνδυαστικά με ML.....	350
Εικόνα 4.61: 9 ^η Εφαρμογή, (α) απεικόνιση TERRASAR-X, (β) ανισοτροπική διάχυση ALM 300 επαναλήψεων και ανίχνευση ακμών με τον Canny.....	354
Εικόνα 4.62: 9 ^η Εφαρμογή, (α) απεικόνιση TERRASAR-X, (β) ανισοτροπική διάχυση ALM 300 επαναλήψεων, μορφολογική εξομάλυνση ML 5 επαναλήψεων και ανίχνευση ακμών με τον Canny.....	355
Εικόνα 4.63: 9 ^η Εφαρμογή, (α) συσταδοποίηση Κ-μέσου σε τρεις κλάσεις, (β) διαχωρισμός χερσαίας-υδάτινης επιφάνειας σε δύο κλάσεις, (γ) αφαίρεση μικρών αντικειμένων της χερσαίας και της υδάτινης επιφάνειας, (γ) υπέρθεση ακτογραμμής στην αρχική απεικόνιση έπειτα από συσταδοποίηση Κ-μέσου, (ε) εύρος ζώνης 19 εικονοστοιχείων στην ακτογραμμή που προκύπτει από τη συσταδοποίηση.....	357
Εικόνα 4.64: 9 ^η Εφαρμογή, υπέρθεση των ακμών εντός του εύρους ζώνης (εικόνα 4.63(ε)) στην αρχική απεικόνιση και τελική θέση ακτογραμμής, αντίστοιχα, έπειτα από προεπεξεργασία με (α), (γ) ALM και (β), (δ) ALM συνδυαστικά με ML.....	358
Εικόνα 4.65: 9 ^η Εφαρμογή, (α) απεικόνιση TERRASAR-X, (β) ανάλυση υψής με μέτρηση της εντροπίας, (γ) κατωφλίωση τεσσάρων επιπέδων στην εικόνα υψής, (δ) υπέρθεση ακτογραμμής στην αρχική απεικόνιση έπειτα από μέτρηση της εντροπίας, (ε) εύρος ζώνης 14 εικονοστοιχείων στην ακτογραμμή που προκύπτει από την εντροπία.....	361

Εικόνα 4.66: 9^η Εφαρμογή, υπέρθεση των ακμών εντός του εύρους ζώνης (εικόνα 4.65(ε)) στην αρχική απεικόνιση και τελική θέση ακτογραμμής, αντίστοιχα, έπειτα από προεπεξεργασία με (α), (γ) ALM και (β), (δ) ALM συνδυαστικά με ML 363

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1: Συμβολή των μικρών τυχαία κατανεμημένων σκεδαστών οι οποίοι συνθέτουν τη μοναδιαία επιφάνεια του στόχου, στο σήμα επιστροφής (συνιστώσες I και Q) του radar (Καραθανάση, 2001).	31
Σχήμα 2.1: Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Πηγή: http://www.gis.unbc.ca/courses/geog205/lectures/rsdata/spectrum.gif	51
Σχήμα 2.2: Τα 8 κανάλια του Worldview-2 και τα αντίστοιχα μήκη κύματος.	67
Σχήμα 3.1: Η επιλογή της συνάρτησης g που οδηγεί στην ενίσχυση των ακμών (Perona and Malik, 1990).	92
Σχήμα 3.2: Διατομές κατά μήκος τμήματος του άξονα x εικόνας QUICKBIRD, για διάφορους τύπους περιορισμένων φιλτραρισμάτων διάχυσης.	96
Σχήμα 3.3: Διατομές κατά μήκος τμήματος του άξονα x εικόνας QUICKBIRD, για διάφορους τύπους ισχυρών φιλτραρισμάτων διάχυσης.	96
Σχήμα 3.4: Διατομές κατά μήκος τμήματος του άξονα x της εικόνας cameraman.tif, για διάφορους τύπους μορφολογικών τελεστών και φίλτρων.	104
Σχήμα 3.5: Διατομές κατά μήκος τμήματος του άξονα y της εικόνας cameraman.tif, για διάφορους τύπους μορφολογικών τελεστών και φίλτρων.	105
Σχήμα 3.6: Διατομές κατά μήκος τμήματος του άξονα x εικόνας QUICKBIRD, για την εφαρμογή ανοίγματος με ανακατασκευή.	109
Σχήμα 3.7: Διατομές κατά μήκος τμήματος του άξονα x εικόνας QUICKBIRD, για την εφαρμογή κλεισίματος με ανακατασκευή.	109
Σχήμα 3.8: Διατομές κατά μήκος τμήματος του άξονα x εικόνας QUICKBIRD, για διάφορους τύπους μορφολογικών φίλτρων.	111
Σχήμα 3.9: Απεικόνιση της λειτουργίας των levelings στις ζώνες αλλαγής των τιμών φωτεινότητας της εικόνας (Meyer and Maragos, 1999).	113
Σχήμα 3.10: Διατομές κατά μήκος τμήματος του άξονα x εικόνας QUICKBIRD, για διάφορους τύπους μορφολογικών φίλτρων.	116
Σχήμα 3.11: Μονοδιάστατο μοντέλο ακμής τύπου ράμπας.	118
Σχήμα 3.12: (α) Ιδανική ακμή (β) Ακμή σε grayscale εικόνες (Καράντζαλος Κ., 2000).	118
Σχήμα 3.13: Πρώτη και δεύτερη παράγωγος ακμής τύπου ράμπας.	119
Σχήμα 3.14: Αρχικοποίηση K-μέσου (Χαλκίδη και Βαζιργιάννης, 2005).	122
Σχήμα 3.15: Η φασματική υπογραφή ποικίλων ειδών φυσικών επιφανειών. Πηγή: FAO... ..	134
Σχήμα 3.16: Διατομές κατά μήκος τμήματος του άξονα x εικόνας QUICKBIRD (1 ^η Εφαρμογή), για προηγμένες τεχνικές ομαλοποίησης.	139
Σχήμα 3.17: Διατομές κατά μήκος τμήματος του άξονα x εικόνας QUICKBIRD (2 ^η Εφαρμογή), για προηγμένες τεχνικές ομαλοποίησης.	140
Σχήμα 4.1: Διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε, με σκοπό τη διερεύνηση ανίχνευσης ακτογραμμής από τηλεπισκοπικά δεδομένα με προηγμένες τεχνικές ομαλοποίησης.	243
Σχήμα 4.2: 1 ^η Εφαρμογή, διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε, με σκοπό τη διερεύνηση ανίχνευσης ακτογραμμής με προηγμένες τεχνικές ομαλοποίησης και τον τελεστή Canny.	244

Σχήμα 4.3: 2 ^η Εφαρμογή, διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε, με σκοπό τη διερεύνηση ανίχνευσης ακτογραμμής με προηγμένες τεχνικές ομαλοποίησης και τον τελεστή Canny.	258
Σχήμα 4.4: 3 ^η Εφαρμογή, διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε, με σκοπό τη διερεύνηση ανίχνευσης ακτογραμμής με προηγμένες τεχνικές ομαλοποίησης και τον τελεστή Canny.	273
Σχήμα 4.5: 4 ^η Εφαρμογή, διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε, με σκοπό τη διερεύνηση ανίχνευσης ακτογραμμής με προηγμένες τεχνικές ομαλοποίησης και τον τελεστή Canny.	291
Σχήμα 4.6: 5 ^η Εφαρμογή, διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε, με σκοπό τη διερεύνηση ανίχνευσης ακτογραμμής με προηγμένες τεχνικές ομαλοποίησης και τον τελεστή Canny.	304
Σχήμα 4.7: 6 ^η Εφαρμογή, διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε, με σκοπό τη διερεύνηση ανίχνευσης ακτογραμμής με προηγμένες τεχνικές ομαλοποίησης και τον τελεστή Canny.	320
Σχήμα 4.8: 7 ^η Εφαρμογή, διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε, με σκοπό τη διερεύνηση ανίχνευσης ακτογραμμής με προηγμένες τεχνικές ομαλοποίησης και τον τελεστή Canny.	329
Σχήμα 4.9: 8 ^η Εφαρμογή, διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε, με σκοπό τη διερεύνηση ανίχνευσης ακτογραμμής με προηγμένες τεχνικές ομαλοποίησης και τον τελεστή Canny.	341
Σχήμα 4.10: 9 ^η Εφαρμογή, διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε, με σκοπό τη διερεύνηση ανίχνευσης ακτογραμμής με προηγμένες τεχνικές ομαλοποίησης και τον τελεστή Canny.	353
Σχήμα 5.1: Διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε, με σκοπό τη διερεύνηση ανίχνευσης ακτογραμμής από τηλεπισκοπικά δεδομένα με προηγμένες τεχνικές ομαλοποίησης.	382

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1: Φασματικά κανάλια και εφαρμογές τους .	54
Πίνακας 2.2: Χαρακτηριστικά της τροχιάς του δορυφορικού συστήματος IKONOS.	56
Πίνακας 2.3: Χαρακτηριστικά του αισθητήρα του δορυφορικού συστήματος IKONOS.	57
Πίνακας 2.4: Κόστος απόκτησης δεδομένων IKONOS ανά τύπο δεδομένων. Πηγή: Eurimage, Ιούλιος 2010.	58
Πίνακας 2.5: Χαρακτηριστικά της τροχιάς του δορυφορικού συστήματος QUICKBIRD.	60
Πίνακας 2.6: Χαρακτηριστικά του αισθητήρα του δορυφορικού συστήματος QUICKBIRD.	60
Πίνακας 2.7: Κόστος απόκτησης δεδομένων QUICKBIRD ανά τύπο δεδομένων. Πηγή: Eurimage, Ιούλιος 2010.	62
Πίνακας 2.8: Χαρακτηριστικά της τροχιάς του δορυφορικού συστήματος GEOEYE -1.	64
Πίνακας 2.9: Χαρακτηριστικά του αισθητήρα του δορυφορικού συστήματος GEOEYE -1.	64
Πίνακας 2.10: Κόστος απόκτησης δεδομένων GEOEYE-1 ανά τύπο δεδομένων. Πηγή: Eurimage, Ιούλιος 2010.	65
Πίνακας 2.11: Χαρακτηριστικά της τροχιάς του δορυφορικού συστήματος WORLDVIEW -2.	67
Πίνακας 2.12: Χαρακτηριστικά του αισθητήρα του δορυφορικού συστήματος WORLDVIEW-2.	68
Πίνακας 2.13: Κόστος απόκτησης δεδομένων WORLDVIEW-2 ανά τύπο δεδομένων. Πηγή: Eurimage, Ιούλιος 2010.	69
Πίνακας 2.14: Συγκριτικά οικονομικά στοιχεία απόκτησης δορυφορικών δεδομένων ανά τύπο δεδομένων.	70
Πίνακας 2.15: Χαρακτηριστικά της τροχιάς του δορυφορικού συστήματος TERRA.	72
Πίνακας 2.16: Χαρακτηριστικά του αισθητήρα ASTER του δορυφορικού συστήματος TERRA.	73
Πίνακας 2.17: Κόστος απόκτησης δεδομένων ASTER ανά τύπο δεδομένων. Πηγή: Eurimage, Ιούλιος 2010.	74
Πίνακας 2.18: Συχνότητες καναλιών radar τηλεπισκοπικών δεκτών (Καραθανάση Β., Ραδιομετρία – Μικροκυματική Τηλεπισκόπηση, 2001).	75
Πίνακας 2.19: Χαρακτηριστικά της τροχιάς του δορυφορικού συστήματος RADARSAT-1.	76
Πίνακας 2.20: Χαρακτηριστικά της κεραίας συνθετικού ανοίγματος του RADARSAT-1.	77
Πίνακας 2.21: Χαρακτηριστικά λήψης ανά λειτουργία απεικόνισης του RADARSAT-1.	77
Πίνακας 2.22: Κόστος απόκτησης δεδομένων RADARSAT-1 ανά τύπο δεδομένων. Πηγή: MDA Geospatial Services.	78
Πίνακας 2.23: Χαρακτηριστικά της τροχιάς του δορυφορικού συστήματος ERS-1.	79
Πίνακας 2.24: Χαρακτηριστικά των αισθητήρων του ERS-1.	79
Πίνακας 2.25: Κόστος απόκτησης δεδομένων ERS-1/2. Πηγή: Eurimage, Ιούλιος 2010.	81
Πίνακας 2.26: Χαρακτηριστικά του δορυφορικού συστήματος TerraSAR-X.	82
Πίνακας 2.27: Χαρακτηριστικά λήψης ανά λειτουργία απεικόνισης του TerraSAR-X.	82
Πίνακας 2.28: Κόστος απόκτησης δεδομένων TerraSAR-X ανά τύπο δεδομένων. Πηγή: Spotimage, Ιανουάριος 2008.	83

Πίνακας 2.29: Συγκριτικά οικονομικά στοιχεία απόκτησης δορυφορικών δεδομένων radar ανά τύπο δεδομένων.	84
Πίνακας 4.1: 1 ^η Εφαρμογή, αξιολόγηση ανίχνευσης ακτογραμμής με: κατωφλίωση, Canny και την υλοποιημένη μεθοδολογία, για τις δυο μεθόδους προ-επεξεργασίας.	250
Πίνακας 4.2: 1 ^η Εφαρμογή, αξιολόγηση ανίχνευσης ακτογραμμής με: συσταδοποίηση Κ-μέσου, Canny και την υλοποιημένη μεθοδολογία, για τις δυο μεθόδους προ-επεξεργασίας.	254
Πίνακας 4.3: 2 ^η Εφαρμογή, αξιολόγηση ανίχνευσης ακτογραμμής με: κατωφλίωση, Canny και την υλοποιημένη μεθοδολογία, για τις δυο μεθόδους προ-επεξεργασίας.	263
Πίνακας 4.4: 2 ^η Εφαρμογή, αξιολόγηση ανίχνευσης ακτογραμμής με: συσταδοποίηση Κ-μέσου, Canny και την υλοποιημένη μεθοδολογία, για τις δυο μεθόδους προ-επεξεργασίας.	267
Πίνακας 4.5: 2 ^η Εφαρμογή, αξιολόγηση ανίχνευσης ακτογραμμής με: μέτρηση εντροπίας, Canny και την υλοποιημένη μεθοδολογία, για τις δυο μεθόδους προ-επεξεργασίας.	271
Πίνακας 4.6: 3 ^η Εφαρμογή, αξιολόγηση ανίχνευσης ακτογραμμής με: κατωφλίωση, Canny και την υλοποιημένη μεθοδολογία, για τις δυο μεθόδους προ-επεξεργασίας.	281
Πίνακας 4.7: 3 ^η Εφαρμογή, αξιολόγηση ανίχνευσης ακτογραμμής με: συσταδοποίηση Κ-μέσου, Canny και την υλοποιημένη μεθοδολογία, για τις δυο μεθόδους προ-επεξεργασίας.	286
Πίνακας 4.8: 3 ^η Εφαρμογή, αξιολόγηση ανίχνευσης ακτογραμμής με: μέτρηση εντροπίας, Canny και την υλοποιημένη μεθοδολογία, έπειτα από προ-επεξεργασία με ALM.	290
Πίνακας 4.9: 4 ^η Εφαρμογή, αξιολόγηση ανίχνευσης ακτογραμμής με: κατωφλίωση, Canny και την υλοποιημένη μεθοδολογία, για τις δυο μεθόδους προ-επεξεργασίας.	297
Πίνακας 4.10: 4 ^η Εφαρμογή, αξιολόγηση ανίχνευσης ακτογραμμής με: συσταδοποίηση Κ-μέσου, Canny και την υλοποιημένη μεθοδολογία, για τις δυο μεθόδους προ-επεξεργασίας.	301
Πίνακας 4.11: 5 ^η Εφαρμογή, αξιολόγηση ανίχνευσης ακτογραμμής με: κατωφλίωση, ανίχνευση ακμών με τον Canny και το μορφολογικό Laplace τελεστή και την υλοποιημένη μεθοδολογία.	310
Πίνακας 4.12: 5 ^η Εφαρμογή, αξιολόγηση ανίχνευσης ακτογραμμής με: συσταδοποίηση Κ-μέσου, ανίχνευση ακμών με τον Canny και το μορφολογικό Laplace τελεστή και την υλοποιημένη μεθοδολογία.	314
Πίνακας 4.13: 5 ^η Εφαρμογή, αξιολόγηση ανίχνευσης ακτογραμμής με: μέτρηση εντροπίας, ανίχνευση ακμών με τον Canny και το μορφολογικό Laplace τελεστή και την υλοποιημένη μεθοδολογία.	318
Πίνακας 4.14: 6 ^η Εφαρμογή, αξιολόγηση ανίχνευσης ακτογραμμής με: συσταδοποίηση Κ-μέσου, Canny και την υλοποιημένη μεθοδολογία, για τις δυο μεθόδους προ-επεξεργασίας.	325
Πίνακας 4.15: 6 ^η Εφαρμογή, αξιολόγηση ανίχνευσης ακτογραμμής με μέτρηση εντροπίας.	327
Πίνακας 4.16: 7 ^η Εφαρμογή, αξιολόγηση ανίχνευσης ακτογραμμής με: συσταδοποίηση Κ-μέσου, Canny και την υλοποιημένη μεθοδολογία, για τις δυο μεθόδους προ-επεξεργασίας.	334
Πίνακας 4.17: 7 ^η Εφαρμογή, αξιολόγηση ανίχνευσης ακτογραμμής με: μέτρηση εντροπίας, Canny και την υλοποιημένη μεθοδολογία, για τις δυο μεθόδους προ-επεξεργασίας.	338

Πίνακας 4.18: 8 ^η Εφαρμογή, αξιολόγηση ανίχνευσης ακτογραμμής με: συσταδοποίηση Κ-μέσου, Canny και την υλοποιημένη μεθοδολογία, για τις δυο μεθόδους προ-επεξεργασίας.	347
Πίνακας 4.19: 8 ^η Εφαρμογή, αξιολόγηση ανίχνευσης ακτογραμμής με: μέτρηση εντροπίας, Canny και την υλοποιημένη μεθοδολογία, για τις δυο μεθόδους προ-επεξεργασίας.	351
Πίνακας 4.20: 9 ^η Εφαρμογή, αξιολόγηση ανίχνευσης ακτογραμμής με: συσταδοποίηση Κ-μέσου, Canny και την υλοποιημένη μεθοδολογία, για τις δυο μεθόδους προ-επεξεργασίας.	359
Πίνακας 4.21: 9 ^η Εφαρμογή, αξιολόγηση ανίχνευσης ακτογραμμής με: μέτρηση εντροπίας, Canny και την υλοποιημένη μεθοδολογία, για τις δυο μεθόδους προ-επεξεργασίας.	364
Πίνακας 4.22: Συγκριτικά στοιχεία ανίχνευσης ακμών για τις δυο μεθόδους προ-επεξεργασίας έπειτα από ανίχνευσή τους με τον τελεστή Canny, επί του συνόλου των εφαρμογών.....	369
Πίνακας 4.23: Μέσες, μέγιστες και ελάχιστες τιμές πληρότητας, ορθότητας και ολικής ποιότητας των ακμών για τις δύο μεθόδους προ-επεξεργασίας, έπειτα από ανίχνευσή τους με τον τελεστή Canny (ανά εύρος ζώνης), επί του συνόλου των εφαρμογών.	370
Πίνακας 4.24: Συγκριτικά στοιχεία ανίχνευσης ακτογραμμής για τις δυο μεθόδους προ-επεξεργασίας, έπειτα από εφαρμογή των υλοποιημένων αλγορίθμων κατωφλίωσης και συσταδοποίησης Κ-μέσου, επί του συνόλου των εφαρμογών.	370
Πίνακας 4.25: Μέσες, μέγιστες και ελάχιστες τιμές πληρότητας, ορθότητας και ολικής ποιότητας της εξαγόμενης ακτογραμμής, όπως ανιχνεύεται (α) με χρήση μόνον κατωφλίωσης, και (β) κατά την υλοποιημένη μεθοδολογία κατωφλίωσης για τις δύο μεθόδους προ-επεξεργασίας (ανά εύρος ζώνης), επί του συνόλου των εφαρμογών.	373
Πίνακας 4.26: Μέσες, μέγιστες και ελάχιστες τιμές πληρότητας, ορθότητας και ολικής ποιότητας της εξαγόμενης ακτογραμμής, όπως ανιχνεύεται (α) με χρήση μόνον συσταδοποίησης Κ-μέσου, και (β) κατά την υλοποιημένη μεθοδολογία συσταδοποίησης για τις δύο μεθόδους προ-επεξεργασίας (ανά εύρος ζώνης), επί του συνόλου των εφαρμογών.	374

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το θέμα της ανίχνευσης της θέσης της ακτογραμμής έχει απασχολήσει σε μεγάλο βαθμό την επιστημονική κοινότητα τα τελευταία χρόνια. Η χαρτογράφηση και η ανίχνευση αλλαγών στη θέση της ακτογραμμής είναι μεγάλης σημασίας για την ασφαλή ναυσιπλοΐα, την προστασία του περιβάλλοντος, την αιφόρο ανάπτυξη και διαχείριση πόρων στο παράκτιο περιβάλλον και το σχεδιασμό αυτού. Η γνώση της θέσης της ακτογραμμής είναι η βάση για την απόδοση χερσαίων και υδάτινων πόρων, αλλά και για τη διεξαγωγή μετρήσεων σε αυτούς (Liu και Jezek, 2004). Επομένως, είναι θεμελιώδης η εργασία ανίχνευσής της σε διάφορες χρονικές περιόδους, καθώς ο εντοπισμός της σε μια δεδομένη χρονική στιγμή δεν δίνει αξιόπιστα δεδομένα για την καθιέρωση μακροπρόθεσμων τάσεων, λόγω υψηλής μεταβλητότητας. Ως εκ τούτου είναι σημαντική η δημιουργία μιας μεγάλης βάσης δεδομένων.

Περιοχές που χαρακτηρίζονται από ταχύτατη ανάπτυξη, καθιστούν δύσκολη την ανίχνευση των περισσότερων αλλαγών της ακτογραμμής με τις παραδοσιακές μεθόδους. Τα δορυφορικά συστήματα, τα οποία παρέχουν ψηφιακές εικόνες σε υπέρυθρα κανάλια όπου διαχωρίζεται καλά το έδαφος από το νερό, αλλά και οι τεχνικές επεξεργασίας εικόνων, παρέχουν μια πιθανή λύση σε κάποια από τα προβλήματα δημιουργίας και ενημέρωσης των χαρτών.

Οι δυνατότητες των τηλεπισκοπικών συστημάτων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παροχή επίκαιρων χωρικών δεδομένων στα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS), να διευκολύνουν την ανίχνευση και την παρακολούθηση της κίνησης της ακτογραμμής. Η Τηλεπισκόπηση παίζει σημαντικό ρόλο, από οικονομικής άποψης, για την απόκτηση χωρικών δεδομένων, εφόσον οι οπτικές εικόνες είναι απλές στην ερμηνεία τους και εύκολα διαθέσιμες. Επιπλέον, η απορρόφηση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στο υπέρυθρο μέρος του φάσματος από το νερό και η ισχυρή αντανάκλασή της από τη βλάστηση και το έδαφος, καθιστούν αυτές τις εικόνες ιδανικό συνδυασμό για τη χαρτογράφηση χερσαίων και υδάτινων σωμάτων. Τα χαρακτηριστικά αυτά του νερού, της βλάστησης και του εδάφους, καθιστούν ευρεία τη χρήση εικόνων με κανάλια στο ορατό και υπέρυθρο μέρος του φάσματος στη χαρτογράφηση της ακτογραμμής.

Η εξέλιξη των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών σε συνδυασμό με τη διαθεσιμότητα περισσότερων δεδομένων ακριβείας σε ψηφιακή μορφή, επιτρέπουν την ανάπτυξη αυτοματοποιημένων συστημάτων με σκοπό την εξαγωγή στοιχείων, όπως οι ακτογραμμές. Παράλληλα, εφόσον τεράστιος όγκος δεδομένων μπορεί πλέον να ληφθεί σε πραγματικό χρόνο και είναι σκόπιμο να διαχειρίζεται συστηματικά και σε σύντομο χρονικό διάστημα, είναι απαραίτητη η έρευνα και η υλοποίηση ημι-αυτόματων και αυτόματων διαδικασιών επεξεργασίας και εξαγωγής γεωπληροφορίας για την παρακολούθηση του παγκόσμιου περιβάλλοντος.

Προς αυτήν την απαίτηση και βάσει των τάσεων που διαμορφώνονται από τη μελέτη της βιβλιογραφίας και τις δυνατότητες των δορυφορικών συστημάτων, διερευνήθηκε και αναπτύχθηκε αλγόριθμος για την αυτόματη ανίχνευση της

ακτογραμμής από τηλεπισκοπικά δεδομένα. Η δομή του αλγορίθμου περιλαμβάνει τρία στάδια επεξεργασίας: την προ-επεξεργασία, την επεξεργασία και τη μετα-επεξεργασία της εκάστοτε απεικόνισης.

Η προ-επεξεργασία των δεδομένων γίνεται με χρήση φιλτραρισμάτων με σκοπό: **(α)** την ενίσχυση των στοιχείων ενδιαφέροντος (συγκεκριμένα την ενίσχυση της αντίθεσης των τιμών φωτεινότητας γειτονικών χαρακτηριστικών), **(β)** την ομαλοποίηση και απλοποίηση της εικόνας, **(γ)** την απαλοιφή του θορύβου, **(δ)** την απαλοιφή χαρακτηριστικών σε συγκεκριμένες κλίμακες και τη διατήρηση χαρακτηριστικών σε συγκεκριμένες επιθυμητές κλίμακες. Τελικός στόχος της προ-επεξεργασίας είναι αφενός η βελτίωση της εμφάνισης και της φωτοερμηνείας της εικόνας, και αφετέρου η βελτίωση της ανιχνευσιμότητας των επιθυμητών χαρακτηριστικών της. Η βελτίωση της ανιχνευσιμότητας των επιθυμητών χαρακτηριστικών έγκειται στη διευκόλυνση των τεχνικών επεξεργασίας να τα «ανιχνεύσουν».

Η επεξεργασία των δεδομένων αφορά στην εξαγωγή των χαρακτηριστικών ή περιοχών ενδιαφέροντος, κι εν προκειμένω στην ανίχνευση των ακμών (edge detection). Η διαδικασία αυτή αφορά στον προσδιορισμό των ορίων μεταξύ γειτονικών περιοχών ή αντικειμένων, με βάση τη μεταβολή των τιμών φωτεινότητας των εικονοστοιχείων. Οι τελεστές που χρησιμοποιούνται για το σκοπό αυτό, και ονομάζονται τελεστές ανίχνευσης ακμών, αποτελούν γραμμικούς και μορφολογικούς φορμαλισμούς της πρώτης και της δεύτερης παραγωγού. Στο πλαίσιο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας εφαρμόστηκαν ο τελεστής Canny και ο μορφολογικός Laplace τελεστής. Ωστόσο, επειδή είναι ευαίσθητοι σε όλες τις εναλλαγές των τιμών φωτεινότητας στο πεδίο της εικόνας, οδηγούν και στην ανίχνευση μη επιθυμητών ή μη πραγματικών ακμών, πρόβλημα τα οποίο αντιμετωπίστηκε με μέτρηση της εντροπίας, συσταδοποίηση K-μέσου (K-means clustering) και κατωφλίωση στο υπέρυθρο κανάλι.

Οι μέθοδοι ανίχνευσης ακμών, αν και αποτελούν μια απλή διαδικασία εν συγκρίσει για παράδειγμα με τις μεθόδους κατάτμησης, υποφέρουν από το γεγονός ότι τα εικονοστοιχεία των ακμών που παράγονται από τους τελεστές είναι αρκετά ασυνεχή και σπάνια χαρακτηρίζουν εντελώς μια ακτογραμμή. Σε αυτό συμβάλλουν αρνητικά η παρουσία εναπομείναντος θορύβου και η σύνθετη υφή. Η αποκατάσταση αυτού του προβλήματος υπολογιστικά είναι μια απαιτητική διαδικασία ακόμα και σε μια χονδροειδή προσέγγιση. Το στάδιο αυτό είναι η μετα-επεξεργασία της εικόνας, κατά το οποίο αποκαθίσταται η συνεκτικότητα των ανιχνευμένων χαρακτηριστικών με χρήση μορφολογικών εργαλείων και είναι απαραίτητο για τη διαμόρφωση μιας συνεχούς καμπύλης. Τέλος, στάδιο της μετα-επεξεργασίας αποτελεί η ποιοτική αλλά και ποσοτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, με χρήση κριτηρίων πληρότητας, ορθότητας και ολικής ποιότητας.

Βασικό στόχο της εφαρμογής αποτέλεσε η ανάπτυξη μιας μεθοδολογίας κατά το δυνατόν ενιαίας για δεδομένα ιδίων χαρακτηριστικών, εν προκειμένω για απεικονίσεις υψηλής χωρικής ανάλυσης. Παράλληλα, διερευνήθηκε η δυνατότητα επέκτασής της σε απεικονίσεις μεσαίας διακριτικής ικανότητας καθώς και σε απεικονίσεις SAR. Το πεδίο εφαρμογών περιελάμβανε έξι απεικονίσεις QUICKBIRD

(4) και WORLDVIEW-2 (2) υψηλής χωρικής διακριτικής ικανότητας (0,7 και 0,5 m, αντίστοιχα), μία απεικόνιση ASTER μεσαίας χωρικής διακριτικής ικανότητας (15 m) και δύο απεικονίσεις TERRASAR-X υψηλής χωρικής διακριτικής ικανότητας (3 m).

Συνολικά, η παρούσα Διπλωματική Εργασία καταδεικνύει ότι είναι δυνατή η εξαγωγή της θέσης της ακτογραμμής με σημαντική ακρίβεια, δεδομένου ότι εφαρμόστηκαν τεχνικές που δεν «εκμεταλλεύονται» τις χωρικές συσχετίσεις εκάστου εικονοστοιχείου με το περιβάλλον του, κι επομένως η όποια εργασία ή μελέτη παρουσιάζει έντονες και αντικειμενικές δυσκολίες. Το συμπέρασμα αυτό αντικατοπτρίζεται και στις κλίμακες χαρτογραφήσεων οι οποίες καλύπτονται. Τα αποτελέσματα του υλοποιημένου αλγορίθμου στις περιπτώσεις διερεύνησης της εφαρμογής του σε ASTER και SAR δεδομένα, ήταν ενθαρρυντικά. Τέλος, παρουσιάζονται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

ABSTRACT

Coastline detection is a task that has greatly concerned the scientific community in recent years. Coastline mapping and change detection are essential for safe navigation, environmental protection, resource management and sustainable coastal development and planning. Knowledge of coastline is the basis for measuring and characterizing land and water resources (Liu and Jezek, 2004). For that reason, coastline extraction in various times is a fundamental work, for its location in a given moment is a low reliable data in order to establish long term trends, since its variability is high. Therefore, the creation of a large database is crucial.

Areas characterised by enormous development, make it difficult to detect most of the coastline changes in time by traditional measurements. Remote sensing satellites that provide digital imagery in infrared spectral bands where the land-water interface is well defined and image processing techniques provide a possible solution to some of the problems of generating and updating the coastline maps.

The capabilities of remote sensing systems can be exploited to provide timely spatial data for coastal geographical information systems (GIS), enabling detection and monitoring of coastline movement. Remote sensing plays an important role for spatial data acquisition from economical perspective, since optical images are simple to interpret and easily obtainable. Furthermore, absorption of infrared wavelength region by water and its strong reflectance by vegetation and soil make such images an ideal combination for mapping the spatial distribution of land and water. These characteristics of water, vegetation and soil make the use of the images that contain visible and infrared bands widely used for coastline mapping.

The development of geographical information systems in combination with availability of more and more accurate data in digital format, allow for the development of automated systems in order to extract certain elements, such as coastlines. At the same time, since a large amount of data can be available in real time and it is important to be managed systematically and in a short time, research and realization of semi-automatic and automatic procedures of processing and extraction of geoinformation are essential for environmental monitoring.

On this demand and according to the trends of the literature and remote sensing satellites' capabilities, an algorithm for the automatic detection of coastline from remote sensing data was investigated and developed. The algorithm structure consists of three processing steps: pre-processing, processing and post-processing of each image.

Data pre-processing uses a number of filtering types with the following objectives: (a) enhancement of elements of interest (in particular enhancement of contrast of neighboring pixels' intensity), (b) smoothing and simplification of the image, (c) noise removal, (d) elements' removal in certain scales whereas preservation of others in certain desirable scales. Final goal of pre-processing is, on one hand, the improvement of the image and its interpretation and, on the other hand, the

improvement of the detection of its elements of interest, which lies in the “facility” of processing techniques to detect them.

Data processing lies in the extraction of elements or regions of interest and in this case in edge detection. This procedure refers to boundary detection of neighboring regions or objects, due to their pixels’ intensity contrast. Detectors used for that cause, called edge detectors, are linear and morphological formalisms of first and second derivative. In the framework of this diploma thesis the Canny and morphological Laplace detectors were applied. However, since they are sensitive in all intensity contrasts in the image field, non desirable or non real edges are detected, a problem that was dealt with the measure of entropy, K-means clustering and thresholding in infrared band.

Although edge detectors are simple procedures in contrast, for example, to segmentation techniques, they “suffer” from the fact that edge pixels are quite discontinuous and rarely characterize a coastline completely. Remained noise and complex texture contribute to this, as well. Restoration of this problem is a demanding procedure to estimate, even in a coarse approximation. This step is about post-processing of the image, in which connectivity of detected elements is restored, using morphological tools, and it is very important for the development of a continuous curve. Finally, parts of post-processing procedure are quantitative and qualitative evaluation of the results using completeness, correctness and quality criteria.

Main goal of the application was the development of a single methodology for data with same features, in this case for high resolution imagery. At the same time, the possibility of its extension in medium resolution as well as SAR imagery was investigated. The applications’ field included six high resolution QUICKBIRD (4) and WORLDVIEW-2 (2) imagery (0,7 and 0,5 m, respectively), one medium resolution ASTER image (15 m) and two high resolution TERRASAR-X imagery (3 m).

Generally, the present Diploma Thesis shows that a precise coastline extraction is possible, granted that techniques that do not take advantage of spatial correlations between each pixel and its environment were applied and therefore any work or research has intense and objective difficulties. This conclusion is reflected on the mapping scales achieved, as well. The results of the applied algorithm in the case of ASTER and SAR data were encouraging. Finally, suggestions for further research are given.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το θέμα της ανίχνευσης της θέσης της ακτογραμμής έχει απασχολήσει σε μεγάλο βαθμό την επιστημονική κοινότητα τα τελευταία χρόνια. Η χαρτογράφηση και η ανίχνευση αλλαγών στη θέση της ακτογραμμής είναι μεγάλης σημασίας για την ασφαλή ναυσιπλοΐα, την προστασία του περιβάλλοντος, την αειφόρο ανάπτυξη και διαχείριση πόρων στο παράκτιο περιβάλλον και το σχεδιασμό αυτού. Η γνώση της θέσης της ακτογραμμής είναι η βάση για την απόδοση χερσαίων και υδάτινων πόρων, αλλά και για τη διεξαγωγή μετρήσεων σε αυτούς (Liu και Jezek, 2004).

Οι δυνατότητες των τηλεπισκοπικών συστημάτων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παροχή επίκαιρων χωρικών δεδομένων στα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS), να διευκολύνουν την ανίχνευση και την παρακολούθηση της κίνησης της ακτογραμμής. Η εξέλιξη των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών σε συνδυασμό με τη διαθεσιμότητα περισσότερων δεδομένων ακριβείας σε ψηφιακή μορφή, επιτρέπουν την ανάπτυξη αυτοματοποιημένων συστημάτων με σκοπό την εξαγωγή στοιχείων, όπως οι ακτογραμμές. Παράλληλα, εφόσον τεράστιος όγκος δεδομένων μπορεί πλέον να ληφθεί σε πραγματικό χρόνο και είναι σκόπιμο να διαχειρίζεται συστηματικά και σε σύντομο χρονικό διάστημα, είναι απαραίτητη η έρευνα και η υλοποίηση ημι-αυτόματων και αυτόματων διαδικασιών επεξεργασίας και εξαγωγής γεωπληροφορίας για την παρακολούθηση του παγκόσμιου περιβάλλοντος.

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία έχει υλοποιηθεί πλήθος τεχνικών προς αυτήν την απαίτηση. Οι τεχνικές αυτές υπάγονται κυρίως στους τομείς της Επεξεργασίας Εικόνας και της Όρασης Υπολογιστών και δείχνουν ολοένα και περισσότερο την ανάγκη και την τάση ανάπτυξης αυτοματισμών στον τομέα όχι μόνο της Τηλεπισκόπησης, αλλά και της Φωτογραμμετρίας και της Χαρτογραφίας. Παρατηρήθηκε ότι σε ποσοστό περίπου 80% γίνεται χρήση ανεξάρτητων τεχνικών επεξεργασίας εικόνας βάσει αλγορίθμων, εν αντιθέσει με τις ήδη υπάρχουσες, όπως φωτοερμηνεία και έτοιμα πακέτα λογισμικού. Έντονη είναι η χρήση κατάτμησης, σε ποσοστό μεγαλύτερο του 45%. Η μεγάλη μελέτη της κατάτμησης έγκειται στη χρησιμότητά της να μειώνει τον πλεονασμό πληροφορίας στο χώρο της εικόνας – ή το χωρο-χρονικό πλεονασμό (spatio-temporal redundancy) στην περίπτωση των video – κι επομένως στη μείωση του υπολογιστικού χρόνου επεξεργασίας.

Η αυτόματη εξαγωγή της ακτογραμμής από ψηφιακά δεδομένα, αφορά στο πρόβλημα της ανίχνευσης ορίων των πεδίων της Όρασης Υπολογιστών και Επεξεργασίας Εικόνας, στα οποία η **ανίχνευση ακμών** είναι συνήθης προσέγγιση της ανίχνευσης ορίων (άλλη προσέγγιση είναι η κατάτμηση). Ο αλγόριθμος του Canny (1986) είναι γνωστός ως ο βέλτιστος ανιχνευτής ακμών, γι' αυτό κρίθηκε σκόπιμο να μελετηθεί η εφαρμογή του. Η σημασία του έγκειται στα κριτήρια τα οποία τέθηκαν από τον Αυστραλό επιστήμονα, με πιο σημαντικό το τρίτο κριτήριο περί μοναδικότητας μιας ακμής. Ωστόσο, στοιχεία όπως ύπαρξη θορύβου, σύνθετη υφή και μη επιθυμητά χαρακτηριστικά σε συγκεκριμένες κλίμακες καθιστούν πιο απαιτητική την ανίχνευση ακτογραμμών σε μια εικόνα.

Η βελτίωση της ανιχνευσιμότητας των επιθυμητών χαρακτηριστικών μιας απεικόνισης και η οποία έγκειται στη διευκόλυνση των τεχνικών επεξεργασίας να τα «ανιχνεύσουν», επιτυγχάνεται με χρήση ποικίλων φιλτραρισμάτων. Η διαδικασία αυτή αφορά στην προ-επεξεργασία των δεδομένων κι είναι απαραίτητη για την ομαλοποίηση μιας εικόνας με παράλληλη ενίσχυση των στοιχείων ενδιαφέροντος. Η διαδικασία εξαγωγής της ακτογραμμής, ανάμεσα σε ένα πλήθος ακμών που ανιχνεύονται σε μια εικόνα, διευκολύνεται με χρήση κατάλληλων τεχνικών επεξεργασίας, οι οποίες στοχεύουν στο διαχωρισμό της υδάτινης από τη χερσαία επιφάνεια. Ωστόσο, επειδή όλες οι μέθοδοι ανίχνευσης ακμών υποφέρουν από το γεγονός ότι τα εικονοστοιχεία των ακμών που παράγονται από τους τελεστές είναι αρκετά ασυνεχή και σπάνια χαρακτηρίζουν εντελώς μια ακτογραμμή, είναι απαραίτητη η μετα-επεξεργασία της εικόνας, κατά την οποία αποκαθίσταται η συνεκτικότητα των ανιχνευμένων χαρακτηριστικών.

Στο πλαίσιο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας με τίτλο «**Διερεύνηση Ανίχνευσης Ακτογραμμών από Τηλεπισκοπικά Δεδομένα και Ανάπτυξη Μεθοδολογίας με έμφαση σε Προηγμένες Τεχνικές Ομαλοποίησης και τον Τελεστή Canny**» παρουσιάζεται μια πλήρης μελέτη βασισμένη στις υπάρχουσες τάσεις. Βασικοί πυλώνες της εργασίας είναι (α) η μελέτη της βιβλιογραφίας, αναδεικνύοντας τις κατευθύνσεις της επιστημονικής κοινότητας, (β) οι δυνατότητες των διατιθέμενων τηλεπισκοπικών συστημάτων, και (γ) η διερεύνηση και ανάπτυξη αλγορίθμου για την αυτόματη ανίχνευση της ακτογραμμής, με γνώμονα τα παραπάνω.

Βασικό **στόχο** της εφαρμογής αποτελεί η ανάπτυξη μιας μεθοδολογίας κατά το δυνατόν ενιαίας για δεδομένα ιδίων χαρακτηριστικών, εν προκειμένω για απεικονίσεις υψηλής χωρικής ανάλυσης. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε ένα ευρύ πεδίο εφαρμογών. Παράλληλα, η μεθοδολογία στοχεύει και στη διερεύνηση επέκτασής της σε απεικονίσεις μεσαίας διακριτικής ικανότητας καθώς και σε απεικονίσεις SAR. Επιπλέον στόχοι είναι οι εξής:

- Μελέτη εφαρμογής των τελεστών ανίχνευσης ακμών.
- Μελέτη ποικίλων τεχνικών προ-επεξεργασίας, επεξεργασίας και μετα-επεξεργασίας.
- Εφαρμογή της μεθόδου σε απεικονίσεις ποικίλων απαιτήσεων καθώς και σε απεικονίσεις που έχουν ληφθεί από το Internet.
- Κλίμακες χαρτογραφήσεων οι οποίες καλύπτονται από το τελικό εξαγόμενο προϊόν.
- Αξιολόγηση των παραπάνω.
- Προοπτικές της μεθοδολογίας.

Όσον αφορά στη **διάρθρωση** της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, στο **Κεφάλαιο 1** παρουσιάζεται πλήρης βιβλιογραφική ανασκόπηση των τεχνικών ανίχνευσης της ακτογραμμής από δορυφορικά δεδομένα (παγχρωματικά και πολυφασματικά

μεσαίας και υψηλής χωρικής διακριτικής ικανότητας, LIDAR, SAR), χάρτες (βαθυμετρικοί, τοπογραφικοί και ναυτικοί), αεροφωτογραφίες, DEM, video και άλλα δεδομένα, κατά την τελευταία πενταετία. Οι μέθοδοι που παρουσιάζονται περιλαμβάνουν κυρίως ανεξάρτητες τεχνικές επεξεργασίας εικόνας βάσει αλγορίθμων κι επιπλέον, ήδη υπάρχουσες τεχνικές, όπως φωτοερμηνεία και έτοιμα πακέτα λογισμικού.

Στο **Κεφάλαιο 2** παρουσιάζονται σημαντικά δορυφορικά συστήματα τα οποία παρέχουν καθημερινά απεικονίσεις του πλανήτη, με όλα τους τα χαρακτηριστικά, καθώς και τα οικονομικά στοιχεία που αφορούν στην αγορά τους. Παράλληλα, αναλύεται η ανίχνευση χαρακτηριστικών σε παγχρωματικές, πολυφασματικές, υπερφασματικές και radar απεικονίσεις.

Στο **Κεφάλαιο 3** διερευνάται και αναπτύσσεται αλγόριθμος για την αυτόματη ανίχνευση ακτογραμμών, με έμφαση στην εφαρμογή του σε δεδομένα υψηλής ανάλυσης. Ιδιαίτερο βάρος κατέχει η παρουσίαση του θεωρητικού υποβάθρου των τεχνικών που χρησιμοποιήθηκαν στο πλαίσιο της μεθοδολογίας, η οποία περιλαμβάνει τα στάδια της προ-επεξεργασίας, της επεξεργασίας και της μετα-επεξεργασίας. Ως εκ τούτου, της παρουσίασης της μεθοδολογίας προηγείται η ανασκόπηση τεχνικών ισοτροπικής και ανισοτροπικής διάχυσης, μορφολογικής εξομάλυνσης (προ-επεξεργασία), ανίχνευσης ακμών και άλλων τεχνικών επεξεργασίας, καθώς και εργαλείων μορφολογικής ανακατασκευής (μετα-επεξεργασία). Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι διατιθέμενες απεικονίσεις και η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε. Τέλος, παρατίθενται τα κριτήρια αξιολόγησης των εξαγόμενων αποτελεσμάτων.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν και αξιολόγηση αυτών παρουσιάζονται ανά εφαρμογή στο **Κεφάλαιο 4**.

Στο **Κεφάλαιο 5** παρατίθενται τα συμπεράσματα τα οποία διαμορφώθηκαν από τη μελέτη της βιβλιογραφίας, τα διατιθέμενα τηλεπισκοπικά συστήματα και τη διερεύνηση και ανάπτυξη αλγορίθμου για την αυτόματη ανίχνευση της ακτογραμμής, ενώ παρουσιάζονται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

Τέλος, στο **Παράρτημα** επισυνάπτονται οι ακτογραμμές αναφοράς, βάσει των οποίων πραγματοποιήθηκε η αξιολόγηση των εξαγόμενων ακτογραμμών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1 Βιβλιογραφική ανασκόπηση τεχνικών ανίχνευσης ακτογραμμής από τηλεπισκοπικά δεδομένα

Σύμφωνα με τους ευρωπαϊκούς κανονισμούς, ως **ακτογραμμή** ορίζεται «η γραμμή που διαχωρίζει μια χερσαία επιφάνεια από έναν ωκεανό ή μια θάλασσα», και αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά γραμμικά χαρακτηριστικά της γήινης επιφάνειας. Αναφέρεται σε μια χωρικά **συνεχή** γραμμή επαφής μεταξύ της στεριάς και της υδάτινης επιφάνειας (Boak και Turner, 2005). Ο ορισμός αυτός χρησιμοποιείται για το χαρακτηρισμό της ακτογραμμής στις ευρωπαϊκές χώρες από το πρόγραμμα EUROSION. Βάσει του Corine Land Cover κάθε επιφάνεια που δεν αναγνωρίζεται ως «στεριά» μπορεί να θεωρηθεί «θάλασσα ή ωκεανός».

Η αλλαγή της θέσης της ακτογραμμής εξαιτίας διαβρώσεων και εναπόθεσης υλικών είναι ένα μείζων ζήτημα της διαχείρισης παράκτιων περιοχών. Η έντονη δυναμική ορισμένων ακτογραμμών εγκυμονεί κινδύνους όσον αφορά στην ανθρώπινη χρήση και ανάπτυξη κι επομένως απαιτούνται ταχείες τεχνικές για την αναβάθμιση των χαρτών των περιοχών αυτών. Η εργασία ανίχνευσής της σε διάφορες χρονικές περιόδους είναι θεμελιώδης και ποικίλες μέθοδοι έχουν χρησιμοποιηθεί για το σκοπό αυτό.

Μέχρι σήμερα έχουν, κυρίως, αναπτυχθεί χειρονακτικές τεχνικές εξαγωγής της ακτογραμμής, οι οποίες κατά κύριο λόγο βασίζονται σε μετρήσεις πεδίου με ή χωρίς το συνδυασμό τεχνικών φωτοερμηνείας. Τα τελευταία κυρίως χρόνια έχουν αναπτυχθεί τεχνικές για την ημι-αυτόματη και αυτόματη ανίχνευση ακτογραμμών από εναέρια και δορυφορικά δεδομένα με σκοπό την εξαγωγή του μετώπου της ακτογραμμής τη δεδομένη στιγμή της λήψης των δεδομένων και τη μέτρηση δεικτών απαραίτητων για τον προσδιορισμό της ακτογραμμής (Boak και Turner, 2005).

Οι μελέτες που αφορούν στην εξέλιξη της ακτογραμμής και που διεξήχθησαν σε διάφορες ακτές, δείχνουν ότι ο εντοπισμός της σε μια δεδομένη χρονική στιγμή δεν δίνει αξιόπιστα δεδομένα για την καθιέρωση μακροπρόθεσμων τάσεων, λόγω υψηλής μεταβλητότητας. Αυτό οφείλεται τόσο στις αλλαγές στο σχήμα της παραλίας όσο και στον εντοπισμό της επιφάνειας της θάλασσας. Αναλύοντας τα αποτελέσματα αυτά, ένα κοινό συμπέρασμα είναι ότι η ανίχνευση των αλλαγών χρησιμοποιώντας ένα περιορισμένο σύνολο αεροφωτογραφιών πρέπει να γίνεται με ιδιαίτερη προσοχή. Επομένως, είναι σημαντική η δημιουργία μιας μεγάλης βάσης δεδομένων.

1.1 Ανασκόπηση τεχνικών ανίχνευσης ακτογραμμής από ηλεκτροοπτικά δεδομένα

Οι δυνατότητες των τηλεπισκοπικών συστημάτων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παροχή επίκαιρων χωρικών δεδομένων στα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS), να διευκολύνουν την ανίχνευση και την παρακολούθηση της κίνησης της ακτογραμμής. Εικόνες μεσαίας (30 έως 5 m) και πολύ υψηλής (4 έως 1 m) ανάλυσης μπορούν να αξιοποιηθούν για να παρέχουν χωρική πληροφορία, η οποία μπορεί πολύ εύκολα να ενταχθεί σε αυτά. Οι δορυφορικές απεικονίσεις πολύ υψηλής ανάλυσης δημιουργούν μια νέα εποχή στην παρατήρηση της γήινης επιφάνειας και στην αυτόματη ανίχνευση της παράκτιας ζώνης.

Η Τηλεπισκόπηση παίζει σημαντικό ρόλο, από οικονομικής άποψης, για την απόκτηση χωρικών δεδομένων, εφόσον οι οπτικές εικόνες είναι απλές στην ερμηνεία τους και εύκολα διαθέσιμες. Περιοχές που χαρακτηρίζονται από ταχύτατη ανάπτυξη, καθιστούν δύσκολη την ανίχνευση των περισσότερων αλλαγών της ακτογραμμής με τις παραδοσιακές μεθόδους. Επιπλέον, η απορρόφηση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στο υπέρυθρο μέρος του φάσματος από το νερό και η ισχυρή αντανάκλασή της από τη βλάστηση και το έδαφος, καθιστούν αυτές τις εικόνες ιδανικό συνδυασμό για τη χαρτογράφηση χερσαίων και υδάτινων σωμάτων. Τα χαρακτηριστικά αυτά του νερού, της βλάστησης και του εδάφους, καθιστούν ευρεία τη χρήση εικόνων με κανάλια στο ορατό και υπέρυθρο μέρος του φάσματος στην χαρτογράφηση της ακτογραμμής.

Η χρήση αεροφωτογραφιών για το σκοπό αυτό είναι ασύμφορη τόσο από οικονομικής πλευράς όσο και ως προς την επεξεργασία τους. Η συλλογή, διόρθωση, ανάλυση και μεταφορά της πληροφορίας από τις αεροφωτογραφίες σε χάρτες απαιτούν χρόνο και δεν είναι οικονομικές. Επιπλέον, η χρήση ασπρόμαυρων εικόνων δημιουργεί προβλήματα, όπως το ότι η αντίθεση στο φασματικό εύρος των παγχρωματικών εικόνων ανάμεσα στο νερό – ιδιαίτερα όταν αυτό είναι θολό – και το έδαφος είναι η ελάχιστη και η ερμηνεία της ακτογραμμής είναι δύσκολη. Άλλοι περιορισμοί είναι η έλλειψη επίκαιρων δεδομένων και γεωμετρικής ακρίβειας, εκτός αν έχει προηγηθεί ορθοαναγωγή, η επιβάρυνση του εξοπλισμού, η έλλειψη εξειδικευμένου προσωπικού. Επομένως, τα δορυφορικά συστήματα, τα οποία παρέχουν ψηφιακές εικόνες σε υπέρυθρα κανάλια όπου διαχωρίζεται καλά το έδαφος από το νερό, αλλά και οι τεχνικές επεξεργασίας εικόνες, παρέχουν μια πιθανή λύση σε κάποια από τα προβλήματα δημιουργίας και ενημέρωσης των χαρτών.

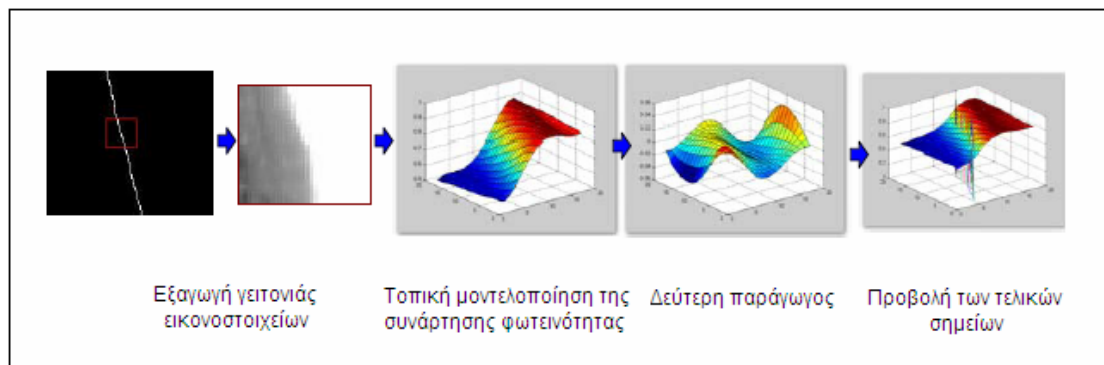
Βάσει των παραπάνω, η μεθοδολογία των **Alesheikh et al. (2007)** αφορά στη δημιουργία ψευδέγχρωμου σύνθετου, λόγων και κατωφλίωσης του ιστογράμματος στο υπέρυθρο κανάλι. Ομοίως, οι **Van και Binh (2008)** χρησιμοποιούν λόγους και τελικά επιτυγχάνουν την εξαγωγή της ακτογραμμής σε περιβάλλον GIS. Η μεθοδολογία που αναπτύσσουν οι **Li και Damen (2010)** για την ανίχνευση της ακτογραμμής, με σκοπό την περιβαλλοντική διαχείριση, αναπτύσσεται προς την ίδια κατεύθυνση σε τρία στάδια. Ποικίλα και διαχρονικά πολυφασματικά Landsat δεδομένα, μία απεικόνιση SPOT, παλιρροιακά δεδομένα και τοπογραφικοί χάρτες

μεσαίας κλίμακας συλλέχθηκαν για την ανάλυση. Η προ-επεξεργασία των εικόνων περιλαμβάνει ραδιομετρικές διορθώσεις, γεωαναφορά όλων των δεδομένων, δημιουργία ψευδέγχρωμων σύνθετων και μωσαϊκών. Προτιμήθηκε το έγχρωμο σύνθετο RGB-742 για τη χαρτογράφηση. Όσον αφορά στην επεξεργασία των δεδομένων, με τη βοήθεια της φωτοερμηνείας και της ψηφιακής ανάλυσης επιτυγχάνεται η εξαγωγή της ακτογραμμής. Καθώς η ανακλαστικότητα του νερού στο εγγύς υπέρυθρο είναι κατά πολύ χαμηλότερη από τη στεριά, είναι δυνατό με ταυτόχρονη ενίσχυση της αντίθεσης να οριστεί η ακτογραμμή. Η διαδικασία αυτή (binary slicing) έχει αποδειχτεί πιο αποτελεσματική από τη δημιουργία ενός ψευδέγχρωμου σύνθετου. Επειδή και οι δύο αυτές διαδικασίες δεν είναι κατάλληλες για απεικονίσεις με νεφοκάλυψη, η εφαρμογή μιας επιβλεπόμενης ταξινόμησης με το κατάλληλο λογισμικό μπορεί να λύσει το πρόβλημα αυτό. Έπειτα από την ανίχνευσή της, οι ακτογραμμές εισάγονται στο ArcGIS για την ανίχνευση των αλλαγών της στο πέρασμα των ετών.

Οι **White και El Asmar (1999)**, χρησιμοποιώντας δεδομένα του θεματικού χαρτογράφου Landsat, μελέτησαν τη δυνατότητα ανίχνευσης των αλλαγών της ακτογραμμής σε διάφορες χρονικές περιόδους με εικόνες σχετικά μέτριας χωρικής ανάλυσης. Στόχος τους είναι να προσδιορίσουν εάν μπορούν να ανιχνευτούν οι σχετικά βραχυπρόθεσμες αλλαγές με δεδομένα σχετικά μέτριας χωρικής ανάλυσης, εφόσον ο οικονομικός παράγοντας επιβάλλει πολλές φορές τη χρήση τους. Έπειτα από τη γεωαναφορά των εικόνων, ο διαχωρισμός στεριάς/ θάλασσας (αυτόματη κατάτμηση) επιτυγχάνεται εύκολα με χρήση του καναλιού 7 (μέσο υπέρυθρο) του Landsat TM, λόγω του ότι το νερό απορροφά όλη την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και εμφανίζεται μαύρο στην εικόνα. Για μια ακριβή ανίχνευση, η αλλαγή στη θέση της ακτογραμμής πρέπει να είναι τουλάχιστον 30 m εάν χρησιμοποιηθούν δεδομένα Landsat. Η τεχνική που αναπτύσσουν παράγει διανυσματικά αρχεία τα οποία μπορούν να επεξεργαστούν με εργαλεία των GIS για την εκτίμηση των βραχυπρόθεσμων αλλαγών. Οι **Yamano et al. (2006)** εξετάζουν τη δυνατότητα πέντε υπερύθρων καναλιών, δεδομένων IKONOS (κανάλι 4), Terra ASTER (κανάλια 3 και 4) και Landsat ETM+ (κανάλια 4 και 5), να ανιχνεύσουν την ακτογραμμή κοραλλιογενών ύφαλων. Για το σκοπό αυτό ελέγχουν τα κανάλια εξετάζοντας την ανακλαστικότητα της στεριάς (βλάστηση και παραλία) και της θάλασσας, δίνοντας βάση στα κανάλια που η διαφορά αυτή είναι μεγάλη. Επιλέχθηκαν τα συγκεκριμένα κανάλια αφενός λόγω της υψηλής ανακλαστικότητας της ξηράς σε αυτά – καθιστώντας επιτυχή τον διαχωρισμό της με κατωφλίωση από τη θάλασσα – αφετέρου λόγω των υψηλών λόγων σήματος/ θορύβου και της καλύτερης γεωμετρικής διακριτικής τους ικανότητας σε σχέση με τα θερμικά κανάλια. Έπειτα από τη γεωαναφορά και την κανονικοποίηση των εικόνων, οι Yamano et al. (2006), χρησιμοποιώντας κατάτμηση του ιστογράμματος (density slicing), ορίζουν το κατώφλι για το διαχωρισμό ξηράς/ θάλασσας. Τελικά, η ακτογραμμή εξάγεται χρησιμοποιώντας το ArcView GIS 3.2. Η δυνατότητα εξαγωγής ακτογραμμών εκτιμάται ποσοτικά υπολογίζοντας τα σφάλματα μεταξύ των ανιχνευμένων και των αληθών ακτογραμμών. Οι Yamano et al. (2006) βρήκαν ότι τα σφάλματα αυτά συνδέονται γραμμικά με τις χωρικές αναλύσεις των υπερύθρων αισθητήρων. Επιπλέον, τονίζουν ότι δεδομένα υψηλότερης χωρικής ανάλυσης

δίνουν πιο ακριβή αποτελέσματα, αν και πάντα πρέπει να συμπεριλαμβάνεται ο παράγοντας του κόστους.

Προς την ίδια κατεύθυνση χρήσης δεδομένων μεσαίας ανάλυσης, η μεθοδολογία των **Ruiz et al. (2007)** αφορά σε μια αυτοματοποιημένη διαδικασία εξαγωγής της ακτογραμμής με τεχνικές επεξεργασίας εικόνας. Παράλληλα, στόχος είναι η αξιολόγηση των πολυφασματικών δορυφορικών εικόνων μεσαίας ανάλυσης, ως εναλλακτική σε δεδομένα πολύ υψηλής ανάλυσης. Με χρήση της δεύτερης κύριας συνιστώσας και τη μετατροπή της σε δυαδική εικόνα (με χρήση κατωφλίωσης) επιτυγχάνεται μια πρώτη προσέγγιση της θέσης της ακτογραμμής. Κατά μήκος της γραμμής, η οποία αναπαριστά μια μη ομαλή σύνδεση μεταξύ στεριάς και θάλασσας, αναλύεται μια ευρύτερη γειτονιά εικονοστοιχείων. Αυτό επιτυγχάνεται με μια συνεχή πολυωνυμιακή συνάρτηση πέμπτης τάξης η οποία προσαρμόζεται τοπικά στη γειτονιά κάθε εικονοστοιχείου της εικόνας. Με τον εντοπισμό των εικονοστοιχείων εκείνων που εμφανίζουν τη μέγιστη καμπυλότητα (υπολογισμός δεύτερης παραγώγου) ορίζεται η τελική θέση της ακτογραμμής (εικόνα 1.1). Αυτή συγκρίνεται με μια ακτογραμμή αναφοράς που έχει εξαχθεί από την εφαρμογή αυτόματης ταξινόμησης στην εικόνα.



Εικόνα 1.1: Τρισδιάστατη μοντελοποίηση της ακτογραμμής και ανίχνευση σε επίπεδο subpixel (Ruiz et al., 2007).

Τα αποτελέσματα των Ruiz et al. (2007) δείχνουν ότι η αυτόματη ανίχνευση της ακτογραμμής εξαρτάται τόσο από τη χωρική ανάλυση της εικόνας όσο και από τις μετεωρολογικές συνθήκες κατά τη χρονική στιγμή της λήψης (κύματα κτλ.). Παρατηρείται αύξηση του μέσου σφάλματος καθώς μειώνεται η χωρική ανάλυση των δεδομένων, ενώ με μικρό μέγεθος εικονοστοιχείου εμφανίζεται συστηματικό σφάλμα θέσης – προς τη θάλασσα – το οποίο βελτιώνεται με επανάληψη του αλγορίθμου. Τα αποτελέσματα της μεθοδολογίας δείχνουν ότι η χρήση απεικονίσεων μεσαίας ανάλυσης (20-30 m/pixel) παρέχουν επαρκή ακρίβεια θέσης (περίπου 4m) για συγκεκριμένες εφαρμογές στο παράκτιο περιβάλλον. Παράλληλα, παρέχουν δύο σημαντικά πλεονεκτήματα: 1) διαχρονικότητα (δεδομένα Landsat υπάρχουν από το 1980) και 2) είναι χαμηλότερου κόστους από τα δεδομένα υψηλής ανάλυσης. Παρόλα αυτά, ο αλγόριθμος χρήζει επανεξέτασης, ιδιαίτερα για τη βελτίωση των συστηματικών σφαλμάτων προς τη θάλασσα.

Η αυτόματη εξαγωγή της ακτογραμμής από ψηφιακά δεδομένα, αφορά στο πρόβλημα της *ανίχνευσης ορίων* των πεδίων της Όρασης Υπολογιστών και Επεξεργασίας Εικόνας, στα οποία η ανίχνευση ακμών και η κατάτμηση εικόνας είναι δύο συνήθεις προσεγγίσεις στην ανίχνευση ορίων. Αυτές οι δύο προσεγγίσεις βασίζονται σε δύο θεμελιώδεις παρατηρήσεις (Gonzalez και Woods 1992, Pitas 2000): (1) *ασυνέχεια*: οι τιμές φωτεινότητας του γκρι της εικόνας στις οριογραμμές ή κοντά σε αυτές μεταβάλλονται απότομα, και (2) *ομοιότητα*: οι οριογραμμές εντοπίζονται ανάμεσα σε δύο σχετικά ομοιογενείς περιοχές, η καθεμιά από τις οποίες έχει διαφορετικές μέσες τιμές φωτεινότητας. Τεχνικά, οι μέθοδοι ανίχνευσης ακμών δίνουν έμφαση στην πρώτη ιδιότητα και εντοπίζουν την ουσιώδη ασυνέχεια στις τιμές φωτεινότητας χρησιμοποιώντας λειτουργίες χωρικής διαφοροποίησης ή πρότυπα ακμών. Εννοιολογικά, η κατάτμηση βασίζεται στη δεύτερη ιδιότητα. Συνήθεις αλγόριθμοι κατάτμησης περιλαμβάνουν κατωφλίωση, συγχώνευση και διαχωρισμό περιοχών.

Οι **Karantzalos et al. (2002)** επιτυγχάνουν την ανίχνευση και εξαγωγή των ακμών δεδομένων μεσαίας διακριτικής ικανότητας σε τρία στάδια. Αρχικά, λαμβάνουν χώρα οι προ-επεξεργασίες για την ενίσχυση και ομαλοποίηση των εικόνων (αφαίρεση θορύβου, ενίσχυση αντίθεσης, απλοποίηση). Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε μια ποικιλία μετασχηματισμών, όπως ισοδυναμοποίηση ιστογράμματος, γκαουσιανά φίλτραρίσματα, φίλτρα μεσαίας τιμής, προσαρμοζόμενα φίλτρα και μορφολογικοί τελεστές. Έπειτα, ακολουθεί η ανίχνευση ακμών είτε με τον τελεστή Canny (1986) είτε με το μορφολογικό φορμαλισμό της δεύτερης παραγωγού. Τέλος, πραγματοποιείται η αποκατάσταση της συνεκτικότητας των ανιχνευμένων ακμών με τη χρήση μορφολογικών μετασχηματισμών. Όλοι οι τελεστές ανίχνευσης ακμών, όντας ευαίσθητοι σε όλες τις εναλλαγές των τιμών φωτεινότητας στο πεδίο της εικόνας, παράλληλα με την ανίχνευση των ορίων επιθυμητών αντικειμένων, οδηγούν και στην ανίχνευση μη-πραγματικών και μη-επιθυμητών ακμών. Μαζί με τις ανιχνευμένες ακτογραμμές, το αποτέλεσμα επηρεάστηκε αρνητικά από ακμές που περιέγραφαν τα όρια και άλλων μη επιθυμητών περιοχών στο έδαφος (ποτάμια, όρια καλλιεργειών, κ.ά.).

Για το λόγο αυτό και για την κατηγοριοποίηση των ανιχνευμένων ακμών σε ακμές που περιγράφουν την ακτογραμμή και ακμές που περιγράφουν άλλα χαρακτηριστικά, χρησιμοποιήθηκε η μετρούμενη στις εικόνες εναλλαγή στην υφή μεταξύ των θαλάσσιων περιοχών και του εδάφους, σε εικόνες μεσαίας και παγχρωματικές πολύ υψηλής διακριτικής ικανότητας. Η ανάλυση της υφής έγινε με την εφαρμογή δισδιάστατων φίλτρων Gabor (Daugman, 1985), τα οποία χαρακτηρίζονται ως βέλτιστα στο χώρο και τη συχνότητα και έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως στη βιβλιογραφία για ποικίλες εφαρμογές στην Όραση Υπολογιστών. Πιο συγκεκριμένα, για τη διάκριση των ανιχνευμένων ακτογραμμών από τις υπόλοιπες μη επιθυμητές ακμές χρησιμοποιήθηκε η εναλλαγή που παρατηρείται στην υφή μεταξύ των θαλάσσιων περιοχών (μαλακή υφή, από σκουρόχρωμους τόνους) και του εδάφους (τραχεία υφή, με μέσους τόνους μεγαλύτερου εύρους). Για την παραπάνω ανάλυση της υφής, οι Karantzalos et al. (2002) χρησιμοποίησαν φίλτρα Gabor, επιτυγχάνοντας το διαχωρισμό του εδάφους από τη θάλασσα. Τελικά, με συγχώνευση (fusion) της πληροφορίας από την ανίχνευση των ακτογραμμών και την ανάλυση υφής, έγινε η εξαγωγή της ακτογραμμής. Οι Karantzalos et al. (2002)

σημειώνουν ότι στο ίδιο αποτέλεσμα, επίσης, μπορεί κανείς να καταλήξει εάν αντί για ανάλυση υψής πραγματοποιηθεί μια κατωφλίωση σε υπέρυθρο κανάλι ή κάποιος δείκτης (όπου και οι δύο μέθοδοι βασίζονται στον άμεσο υπολογισμό διαφορών σε τιμές φωτεινότητας, οι οποίες οδήγησαν στην αστοχία της ανίχνευσης των ακμών) ή μια ταξινόμηση, η πολυπλοκότητα της οποίας, όμως, είναι αρκετά μεγαλύτερη.

Οι Karantzalos et al. (2002) τονίζουν τη σημασία της προ-επεξεργασίας της εικόνας. Έτσι, οι **Karantzalos και Argialas (2006)** συνδυάζουν δύο προηγμένες τεχνικές ομαλοποίησης σε χώρους κλίμακας. Την ανισοτροπική διάχυση και τη μορφολογική απλοποίηση. Λαμβάνοντας υπόψη ότι όλες οι μέθοδοι ανισοτροπικής διάχυσης αφενός μειώνουν το «θόλωμα» των ακμών, αλλά δεν το εξαλείφουν εντελώς, αφετέρου δεν λαμβάνουν υπόψη τη γεωμετρία των αντικειμένων της εικόνας, τελικά η χρήση τους έχει περιορισμένη επιτυχία. Παράλληλα, η μορφολογική απλοποίηση αν και λαμβάνει υπόψη τη γεωμετρία των αντικειμένων, απλοποιεί ισχυρά την εικόνα «εξουσιαζόμενη» από ισοτροπικούς (γκαουσιανούς) σημαδευτές, αφού η όλη τεχνική βασίζεται σε αυτούς. Τελικά, προκύπτει η ανισοτροπική μορφολογική εξομάλυνση (AML), τεχνική η οποία απλοποιεί την εικόνα χωρίς μετατόπιση των ακμών της, με χρήση ανισοτροπικά ομαλοποιημένων σημαδευτών (markers), διατηρώντας καλύτερα τη δομή των διαφορών στις τιμές φωτεινότητας. Εφαρμόζεται τόσο για τη διευκόλυνση ανίχνευσης σημείων και ακμών όσο και τεχνικών κατάτμησης.

Η ανίχνευση ακμών είναι σχετικά πιο απλή διαδικασία από την κατάτμηση. Ωστόσο, μέθοδοι ανίχνευσης ακμών υποφέρουν από το γεγονός ότι τα εικονοστοιχεία των ακμών που παράγονται από τους τελεστές είναι αρκετά ασυνεχή και σπάνια χαρακτηρίζουν εντελώς μια ακτογραμμή. Η αποκατάσταση αυτού του προβλήματος υπολογιστικά είναι μια απαιτητική διαδικασία ακόμα και σε μια χονδροειδή προσέγγιση.

Εν αντιθέσει, οι μέθοδοι κατάτμησης εικόνας έχουν το πλεονέκτημα δημιουργίας μιας συνεχούς οριογραμμής, αν και απαιτούν περισσότερη μετα-επεξεργασία για το διαχωρισμό των εικονοστοιχείων του εκάστοτε ορίου και παρουσιάζουν δυσκολίες κατά την κατωφλίωση και τα κριτήρια ομογενοποίησης. Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι τόσο η κατάτμηση, σε εικόνες με ένα ή πολλά κανάλια, όσο και η ταξινόμηση – επιβλεπόμενη και μη επιβλεπόμενη – σε πολυφασματικά δεδομένα (π.χ. ISODATA, PCA, Tasseled Cap, NDWI), είναι αλγόριθμοι που βασίζονται αποκλειστικά στην ανάλυση της φασματικής υπογραφής μεμονωμένων εικονοστοιχείων, χωρίς να λαμβάνουν υπόψη την υψή, το σχήμα, τη μορφολογία και το περιεχόμενο των περιοχών στις εικόνες. Ωστόσο, οι Frazier και Page (2000) βρήκαν ότι μια απλή κατάτμηση στο κανάλι 5 του Landsat TM επιτυγχάνει ταξινόμηση ακρίβειας 96,9%, όμοια με πιο σύνθετες μεθοδολογίες όπως η εκτίμηση της μέγιστης πιθανοφάνειας, χωρίς ωστόσο να εξάγει ικανοποιητικά μικρότερα υδάτινα σώματα.

Οι **Di et al. (2003)** παρουσιάζουν μια ημι-αυτόματη μέθοδο η οποία βασίζεται στην κατάτμηση με μετακίνηση μέσης τιμής (mean shift segmentation) δεδομένων Ikonos. Αρχικά, είχε προταθεί από της Fukunaga και Hostetler το 1975 ως μια μη

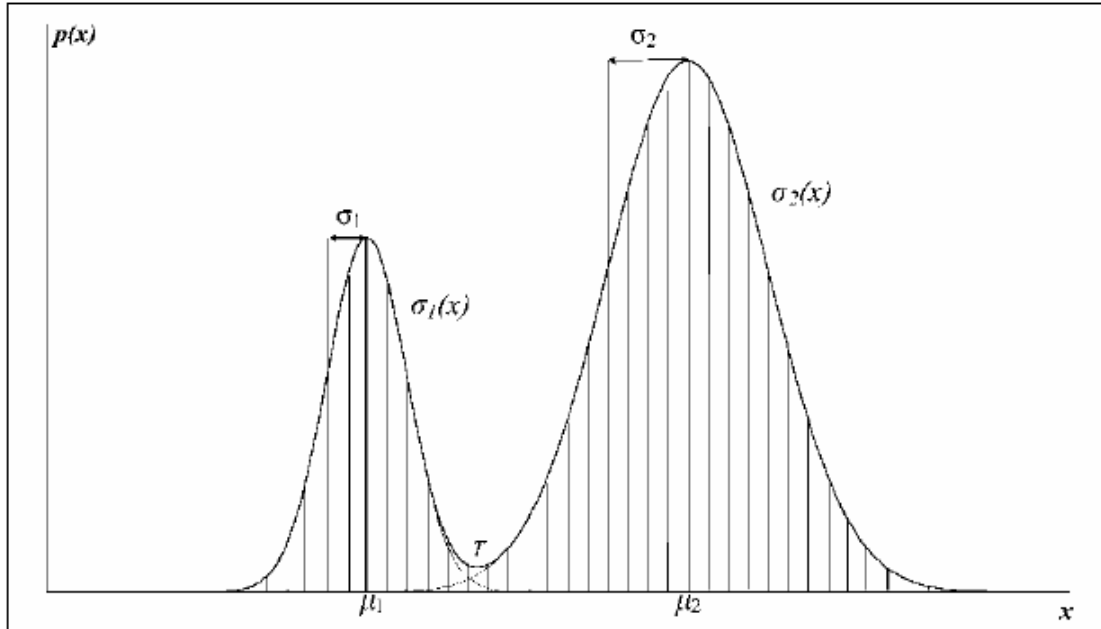
παραμετρική μέθοδος ταξινόμησης. Ουσιαστικά, κάθε εικονοστοιχείο μετακινείται σε μία γειτονιά με τη μέση ή την προσαρμοσμένη (σταθμισμένη με βάρη) μέση τιμή των εικονοστοιχείων που ανήκουν σε αυτή. Το πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι η διαδικασία λαμβάνει υπόψη τόσο τις πληροφορίες των εικονοστοιχείων όσο και τις χωρικές συσχετίσεις τους. Αποτέλεσμα είναι η επιτυχής κατάτμηση ξηράς/θάλασσας, με την ακτογραμμή να εξάγεται αυτόματα ως το μεταξύ τους όριο. Οι Di et al. (2003) κατά την υλοποίηση της μεθόδου παρατήρησαν ότι η κατάτμηση δεν ήταν ιδιαίτερα ευαίσθητη στις παραμέτρους της διακριτικής ικανότητας. Τελικά, η ακτογραμμή βελτιώνεται χειροκίνητα σε περιβάλλον GIS.

Οι **Bagli και Soille (2004)** επιτυγχάνουν εξαγωγή ακτογραμμής με αλγορίθμους κατάτμησης εικόνας βασισμένους σε περιοχές εκκίνησης (seed regions) και μορφολογικούς τελεστές (π.χ. μετασχηματισμός υδροκρίτη). Αρχικά, βάσει χωρικών και φασματικών κριτηρίων, γίνεται η ανίχνευση και η αφαίρεση νεφών και των σκιών τους. Έπειτα από την υλοποίηση των δύο αλγορίθμων κατάτμησης, με χρήση κατωφλίων και του τελεστή κλίσης ανιχνεύεται η ακτογραμμή. Τελικά, το αποτέλεσμα αξιολογείται με βάση μια ακτογραμμή αναφοράς.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η μεθοδολογία των **Liu και Jezek (2004)**. Αποτελείται από τρία στάδια αλγορίθμων επεξεργασίας εικόνας: προ-κατάτμησης, κατάτμησης, μετα-κατάτμησης. Η διαδικασία πριν την κατάτμηση στοχεύει στον περιορισμό του θορύβου της εικόνας και στην ενίσχυση των στοιχείων των ακμών στις εικόνες. Για τη διατήρηση της σωστής θέσης της ακτογραμμής, απαιτείται ένας τελεστής διατήρησης ακμών για την απομάκρυνση του θορύβου. Ένα γκαουσιανό φίλτρο μπορεί να φιλτράρει οπτικές εικόνες χωρίς να θολώνει χαρακτηριστικές ακμές. Όσον αφορά στις radar εικόνες, τα φίλτρα Lee, Frost, Kuan, Median και Gamma MAP μπορούν να μειώσουν το θόρυβο χωρίς να επηρεάσουν την οξύτητα των ακμών. Στο στάδιο της προ-επεξεργασίας χρησιμοποιείται και ο αλγόριθμος των Perona και Malik για την ανισοτροπική διάχυση, για την ενίσχυση των κύριων ακμών της ακτογραμμής και την απομάκρυνση των αδύναμων ακμών στις υδάτινες και χερσαίες μάζες.

Οι αλγόριθμοι κατάτμησης χωρίζουν την εισερχόμενη εικόνα σε ομογενείς περιοχές ξηράς και θάλασσας χρησιμοποιώντας ένα τοπικά προσαρμοζόμενο κατώφλι. Εάν χρησιμοποιηθεί ένα γενικό κατώφλι για όλη την εικόνα προκειμένου να γίνει ο διαχωρισμός των ορίων ξηράς/θάλασσας, μερικές ακμές δεν θα ανιχνευτούν λόγω της ετερογένειας της αντίθεσης των τιμών φωτεινότητας της εικόνας, προκαλώντας ασυνέχεια στις ακμές της ακτογραμμής σε περιοχές χαμηλής αντίθεσης. Η μέθοδος κατωφλίωσης των Liu και Jezek (2004) θέτει δυναμικά την τιμή που θα έχει το κατώφλι, ανάλογα με τα τοπικά χαρακτηριστικά, για να επιτευχθεί ένας καλός διαχωρισμός ανάμεσα στην ξηρά και τη θάλασσα. Εάν μια περιοχή της εικόνας περιέχει μια ακτογραμμή, περιέχει εικονοστοιχεία και ξηράς και θάλασσας. Εν συνεχεία, οι τιμές φωτεινότητας των εικονοστοιχείων της ξηράς και της θάλασσας ομαδοποιούνται στις δύο επικρατέστερες επιλογές με σχετικά σαφείς μέσες τιμές στο ιστόγραμμα της εικόνας, οι οποίες όμως συχνά επικαλύπτονται. Γενικά, το ιστόγραμμα μιας τέτοιας περιοχής εμφανίζει δύο κορυφές και μια κοιλάδα (εικόνα 1.2). Η υπόθεση των συγγραφέων είναι ότι μια κατανομή με δύο κορυφές είναι ένα μείγμα δύο γκαουσιανών (κανονικών) κατανομών (bimodal). Η απομάκρυνση των

«περιπτών» εικονοστοιχείων που εμφανίζονται στο ιστόγραμμα κατά τη μετάβαση από τη μια κατηγορία στην άλλη, γίνεται χρησιμοποιώντας τον τελεστή Canny. Η λειτουργία αυτή ενδυναμώνει αποτελεσματικά την «κοιλάδα» του ιστογράμματος ανάμεσα στις δύο κορυφές, κι επομένως την κατωφλίωση.



Εικόνα 1.2: Η γραφική παράσταση της γκαουσιανής bimodal καμπύλης (Liu and Jezek, 2004).

Οι αλγόριθμοι κατά τη μετα-επεξεργασία σχεδιάζονται για να διαφοροποιήσουν τις ακμές της ακτογραμμής από άλλες και τις παρουσιάζουν διανυσματικά. Έπειτα από δύο «περάσματα» αφαίρεσης των υπόλοιπων, μεμονωμένων αντικειμένων, μόνο δύο μεγάλα συνεχή αντικείμενα ξηράς και θάλασσας απομένουν. Η διαδικασία αυτή πρακτικά εξαλείφει μη επιθυμητά αντικείμενα, των οποίων τα όρια δεν αποτελούν ακτογραμμή και επομένως μειώνει τη διόρθωση του τελικού προϊόντος. Επιπλέον, εφαρμόζεται και η μορφολογική λειτουργία του κλεισίματος (διαστολή ακολουθούμενη αμέσως από διάβρωση). Η χρήση της λειτουργίας αυτής έχει ως αποτέλεσμα τη γενίκευση των «οδοντωτών» ορίων των αντικειμένων της εικόνας, εξομαλύνοντας μορφολογικά την ακτογραμμή.

Στις απεικονίσεις πολύ υψηλής ανάλυσης, κάποιες λεπτομέρειες της παράκτιας ζώνης είναι ορατές και ο προσδιορισμός της ακτογραμμής εξαρτάται από το γεωμορφολογικό περιεχόμενό τους. Οι **Puissant et al. (2008)** προτείνουν μια μεθοδολογία για την εξαγωγή της ακτογραμμής σε δύο φάσεις, βασισμένη σε μορφολογικά εργαλεία και τη γεωμορφολογία της περιοχής, χρησιμοποιώντας χωρική και φασματική πληροφορία. Η βάση της προσέγγισής τους έγκειται στο ότι επειδή στις εικόνες πολύ υψηλής ανάλυσης κάποιες πληροφορίες είναι ορατές, η ακτογραμμή θα πρέπει να οριστεί ανάλογα με τη γεωμορφολογία της περιοχής. Έτσι, μπορούν να δοθούν *τρεις διαφορετικοί ορισμοί για την ακτογραμμή*: για τις αμμώδεις παραλίες ως ακτογραμμή ορίζεται το όριο της βλάστησης, για τις πετρώδεις η άκρη της πλαγιάς και για τις βραχώδεις η κορυφή του γκρεμού.

Σημειώνουν επίσης ότι στις παγχρωματικές απεικονίσεις είναι δύσκολη η ακριβής εξαγωγή της ακτογραμμής με χρήση μόνο της φασματικής πληροφορίας. Η γραμμή μεταξύ της στεριάς και της θάλασσας δεν είναι πάντα το όριο της βλάστησης. Επιπλέον, υπάρχουν μερικές ζώνες που τα φασματικά τους χαρακτηριστικά είναι παρόμοια με του υδάτινου σώματος, όπως οι λίμνες ή τα ποτάμια. Επομένως, είναι απαραίτητη η πολυφασματική πληροφορία και η γειτνίαση των αντικειμένων. Τελικά, αν και η φασματική πληροφορία μπορεί εύκολα να εξαχθεί αυτόματα, η χωρική είναι δύσκολο.

Οι Puissant et al. (2008) αναπτύσσουν μια ημι-αυτόματη μεθοδολογία για την ανίχνευση της ακτογραμμής σε δύο φάσεις. Αρχικά, γίνεται ο εντοπισμός των πιθανών θέσεων της ακτογραμμής και εντοπίζονται τα σχετικά εικονοστοιχεία βάσει προηγούμενης γνώσης. Τέλος, δημιουργείται μια χωρικά συνεχής γραμμή, η οποία αντιστοιχίζεται στην ακτογραμμή που έχει εξαχθεί από τα ήδη αναγνωρισμένα εικονοστοιχεία. Επειδή η χωρική πληροφορία είναι καίριας σημασίας, η λύση της βασίστηκε στη μαθηματική μορφολογία που χρησιμοποιείται ευρέως στην επεξεργασία εικόνας.

Στο πρώτο στάδιο, ο εντοπισμός των πιθανών θέσεων της ακτογραμμής γίνεται βάσει αναγνώρισης προτύπων. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκε το hit-or-miss εργαλείο από τη μαθηματική μορφολογία. Ο τελεστής αυτός βασίζεται σε δύο δομικά στοιχεία (structuring elements), ένα για τα στοιχεία που βρίσκονται στο προσκήνιο (foreground) κι ένα για τη γειτονιά τους ή το φόντο (background). Παρόλο που στις δυαδικές εικόνες ο ορισμός του τελεστή είναι μοναδικός, η επέκτασή του στις παγχρωματικές εικόνες, οι οποίες αποτελούνται από εικονοστοιχεία με τιμές φωτεινότητας στην κλίμακα του γκρι, οδήγησε σε πολλαπλούς ορισμούς λόγω της δυσκολίας αποσαφήνισης του προσκήνιου (foreground) και του φόντου (background) σε μη δυαδικές εικόνες. Ανεξάρτητα από τον ορισμό, ο τελεστής hit-or-miss βασίζεται στις διεργασίες της δυαδικής μορφολογίας, τη διαστολή (dilation) και τη συστολή (erosion).

Σε πολυφασματικά δεδομένα οι συγγραφείς προτείνουν επεξεργασία σε κάθε κανάλι ξεχωριστά κι έπειτα συγχώνευση των αποτελεσμάτων. Κάθε δομικό στοιχείο χαρακτηρίζεται από το σχήμα, το κανάλι, τον τύπο (προσκήνιο ή φόντο) του και ένα κατώφλι. Για κάθε εικόνα πρέπει να διατίθεται όλη η φασματική και χωρική πληροφορία. Η χωρική πληροφορία αφορά στον καθορισμό του αριθμού των δομικών στοιχείων, το σχήμα και τη θέση τους. Η φασματική πληροφορία αφορά στον καθορισμό του καναλιού, στο κατώφλι και τον τύπο του δομικού στοιχείου. Γενικά, οι ειδικοί ορίζουν δύο ή τρία αντικείμενα στην παράκτια ζώνη: 1) στεριά, 2) θάλασσα και 3) περιοχή ακτογραμμής, ανάλογα με τη μορφολογία της περιοχής.

Αφού οριστούν τα στοιχεία αυτά, εφαρμόζεται ο μετασχηματισμός hit-or-miss σε δύο βήματα. Αρχικά, αναγνωρίζονται όλα τα εικονοστοιχεία που ταιριάζουν στο πρότυπο που έχει δοθεί. Αυτό επιτυγχάνεται ελέγχοντας τοπικά αν το αποτέλεσμα του μορφολογικού τελεστή (διαστολή ή συστολή) είναι πάνω ή κάτω από την τιμή του κατωφλίου που έχει δοθεί στο εκάστοτε κανάλι. Κάθε εικονοστοιχείο λαμβάνει μια ποιοτική τιμή ανάλογα με την ποιότητα της εφαρμογής (ένα εικονοστοιχείο με τιμή πολύ μεγαλύτερη από το κατώφλι είναι πιο πιθανό να είναι σχετικό). Για να μη

μεταβάλλεται ο αλγόριθμος με τον προσανατολισμό της ακτογραμμής, ο τελεστής εφαρμόζεται σε όλες τις δυνατές διευθύνσεις και κάθε εικονοστοιχείο λαμβάνει την τιμή με τη μεγαλύτερη απόκριση. Σημειώνεται ότι η αποτελεσματικότητα του αλγορίθμου εξαρτάται πάρα πολύ από τα κριτήρια που έχουν δοθεί (μέγεθος γειτονιάς, τιμή φωτεινότητας κατωφλίου), τα οποία δεν πρέπει να είναι ούτε πολύ περιοριστικά ούτε να μην διακρίνονται αρκετά μεταξύ τους, προκειμένου τα αποτελέσματα να μην είναι λανθασμένα.

Στο δεύτερο στάδιο, επειδή ο μετασχηματισμός μπορεί να δώσει λανθασμένα αρνητικά (false negative) ή θετικά (false positive) αποτελέσματα, εξετάζονται και οι δύο περιπτώσεις δίνοντας δύο σύνολα δομικών στοιχείων και καταλήγοντας σε δύο διαφορετικές εικόνες. Στην πρώτη περίπτωση (A) το σύνολο είναι πολύ περιοριστικό καταλήγοντας σε λανθασμένο αρνητικό αποτέλεσμα (για παράδειγμα, παραλειπόμενα εικονοστοιχεία), ενώ στη δεύτερη περίπτωση (B) το σύνολο δεν είναι αρκετά περιοριστικό καταλήγοντας σε λανθασμένο θετικό αποτέλεσμα (για παράδειγμα, μη σχετικά εντοπισμένα εικονοστοιχεία). Τελικά, με γεωδαιτικό μετασχηματισμό της μάσκας B από τη μάσκα A, λαμβάνονται τα συνδεδεμένα στοιχεία του B τα οποία περιέχουν τουλάχιστον ένα εικονοστοιχείο του A και παράλληλα χρησιμοποιούνται δυαδικές εικόνες που περιέχουν όλα τα εικονοστοιχεία του μετασχηματισμού hit-or-miss (ανεξάρτητα από την αξιολόγησή τους).

Ωστόσο, εφόσον λαμβάνεται κάθε εικονοστοιχείο του B το οποίο ανήκει σε μια περιοχή που περιέχει ένα εικονοστοιχείο του A, υπάρχει περίπτωση αυτό να είναι ένα λανθασμένο θετικό αποτέλεσμα. Αυτό αντιμετωπίζεται με κατάτμηση του καναλιού σε δύο μέρη και χρήση του μετασχηματισμού υδροκρίτη (watershed) με μάρκες. Ως τοπογραφική επιφάνεια θεωρείται η εικόνα B. Έτσι, βάσει των λανθασμένων εικονοστοιχείων (μάρκες) επιστρέφονται οι γραμμές που είναι πιο πιθανό να ταιριάζουν στα όρια μεταξύ αυτών.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της μεθοδολογίας, η εξαγωγή της ακτογραμμής είναι ενθαρρυντική στις βραχώδεις και τις αμμώδεις παραλίες, ενώ διαφοροποιήσεις παρατηρούνται στις πετρώδεις λόγω της γεωμορφολογίας της περιοχής και των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν. Χρησιμοποιήθηκαν δύο μέθοδοι αξιολόγησης των αποτελεσμάτων, βάσει του μέσου σφάλματος θέσης σε εικονοστοιχεία και ομαλοποιημένο (ανεξάρτητο του μήκους της ακτογραμμής αναφοράς και του μεγέθους της εικόνας). Βάσει αυτών αλλά και του οπτικού αποτελέσματος, ο αλγόριθμος αποδεικνύεται ανθεκτικός. Συγκεκριμένα, στις αμμώδεις παραλίες η ακρίβεια είναι κάτω του μισού μέτρου και στις υπόλοιπες περιπτώσεις η μέση απόσταση των εικονοστοιχείων της εξαγόμενης από αυτών της ακτογραμμής αναφοράς είναι στα ένα ή δύο εικονοστοιχεία (2.4 έως 5 m).

Τελικά, οι δυνατότητες των δορυφορικών απεικονίσεων, εκτός από τη φασματική ανάλυση των τιμών των εικονοστοιχείων, καθιστούν δυνατή και την ανάλυση βάσει αντικειμένων (object-based analysis). Οι **Armenakis και Savopol (2004)** παρουσιάζουν μια ημι-αυτόματη διαδικασία για την ανίχνευση υδάτινων μαζών από δορυφορικά δεδομένα Landsat, βάσει εργαλείων επεξεργασίας εικόνας και GIS, με χωρικούς περιορισμούς. Η προσέγγισή τους βασίζεται σε συνθήκες που

περιγράφουν μοναδικά τις επιφάνειες αυτές και οι οποίες αφορούν στις φασματικές ιδιότητες του νερού, στη θεωρία ότι υδάτινες μάζες υπάρχουν σε περιοχές με μηδενική ή ελάχιστη εδαφική κλίση και στον τελεστή Boolean “ΚΑΙ”. Η ανίχνευση και η εξαγωγή των υδάτινων μαζών βασίζεται σε κατώφλια, φασματικούς, χωρικούς και Boolean τελεστές. Αρχικά η εικόνα γίνεται sharpened. Έπειτα αφαιρείται ο θόρυβος με φίλτρο μεσαίας τιμής και εφαρμόζεται ένα κατώφλι στο κανάλι 5. Στη συνέχεια εφαρμόζεται μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση ISODATA χρησιμοποιώντας τα κανάλια 4, 5, 7. Τα αποτελέσματα της κατωφλίωσης και της ταξινόμησης συγκρίνονται με τον τελεστή Boolean “ΚΑΙ”, ούτως ώστε να βρεθούν οι κοινές και για τις δύο εικόνες περιοχές. Τελικά, χρησιμοποιώντας ψηφιακό μοντέλο εδάφους από το οποίο εξάγονται οι εδαφικές κλίσεις και τίθεται ο χωρικός περιορισμός, προκύπτουν οι τελικές θέσεις των υδάτινων μαζών.

Πιο αναλυτικά, η ISODATA αποτελεί μια ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδο μη επιβλεπόμενης ταξινόμησης (Αργιολάς, 1998). Με τη χρήση αυτού του αλγορίθμου, μια έγχρωμη ή πολυφασματική εικόνα μπορεί να ταξινομηθεί σε μια ποικιλία κατηγοριών χρήσης γης οι οποίες έπειτα μπορούν να συγχωνευτούν σε δύο (ξηρά και θάλασσα). Η ταξινόμηση ISODATA εκτελεί μια επαναληπτική ταξινόμηση βελτιστοποίησης. Αρχικά, ορίζει αυθαίρετα αρχικές μέσες τιμές για ένα συγκεκριμένο αριθμό τάξεων ίσων διαστημάτων. Για κάθε κανάλι της πολυφασματικής εικόνας, η κάθε τάξη ορίζεται από τις τιμές της μέσης τιμής και της τυπικής απόκλισης. Κατά την πρώτη επανάληψη, οι τιμές κάθε εικονοστοιχείου σε όλα τα κανάλια συγκρίνονται με τις μέσες τιμές διαφορετικών καναλιών κάθε τάξης και υπολογίζεται η Ευκλείδεια απόσταση των τιμών αυτών. Το υποψήφιο εικονοστοιχείο κατηγοριοποιείται στην τάξη της οποίας η Ευκλείδεια απόσταση από αυτό είναι η μικρότερη. Στη δεύτερη επανάληψη, υπολογίζονται νέες μέσες τιμές για όλα τα κανάλια κάθε τάξης βάσει των εικονοστοιχείων που έχουν ταξινομηθεί με τον κανόνα της ελάχιστης Ευκλείδειας απόστασης. Οι τάξεις που έχουν προκύψει ελέγχονται ούτως ώστε να συγχωνευτούν ή να χωριστούν. Εάν μια τάξη περιέχει λιγότερα από ένα ελάχιστο ποσοστό εικονοστοιχείων, συγχωνεύεται με την πλησιέστερή της. Εάν η Ευκλείδεια απόσταση των μέσων τιμών δύο τάξεων είναι κάτω από ένα συγκεκριμένο κατώφλι (συνήθως τιμή 3), τότε αυτές συγχωνεύονται. Εάν η τυπική απόκλιση μιας τάξης υπερβαίνει μια συγκεκριμένη μέγιστη τιμή τυπικής απόκλισης (τυπικά 4, 5 με 7) ή ο αριθμός των εικονοστοιχείων μιας τάξης είναι μεγαλύτερος από τον καθορισμένο μέγιστο αριθμό, τότε η τάξη αυτή χωρίζεται σε δύο τάξεις. Οι μέσες τιμές των δύο αυτών νέων τάξεων υπολογίζονται ως η μέση τιμή της αρχικής τάξης συν/ μείων την τυπική απόκλιση. Τελικά, υπολογίζονται οι μέσες τιμές των νέων τάξεων. Στην επόμενη επανάληψη, κάθε εικονοστοιχείο της εικόνας ξανακατηγοριοποιείται σε μια τάξη βάσει του κανόνα της ελάχιστης Ευκλείδειας απόστασης. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου συγκλίνουν οι επαναλήψεις ή όταν λάβει χώρα ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων. Στην τελευταία επανάληψη, τα εικονοστοιχεία κατηγοριοποιούνται σε τάξεις χρησιμοποιώντας τον κανόνα μέγιστης πιθανοφάνειας βάσει των μέσων τιμών και των τυπικών αποκλίσεων των καναλιών κάθε τάξης. Η δυαδική εικόνα των εικονοστοιχείων ξηράς και θάλασσας πραγματοποιείται με οπτική εποπτεία της ταξινομημένης εικόνας από το χρήστη.

Οι **Guariglia et al. (2006)** περιλαμβάνουν για την ανίχνευση της ακτογραμμής τη χρήση μη επιβλεπόμενης ταξινόμησης σε πολυφασματικά και παγχρωματικά δεδομένα, καθώς και λόγους καναλιών σε πολυφασματικά δεδομένα μέτριας διακριτικής ικανότητας. Όσον αφορά στην πρώτη μεθοδολογία, πριν την ταξινόμηση, η οποία γίνεται με τον αλγόριθμο ISODATA, τα οπτικά και υπέρυθρα δεδομένα συγχωνεύονται (image fusion) για να χρησιμοποιηθεί η «καλύτερη» πληροφορία, η φασματική από τα υπέρυθρα δεδομένα και η υψηλή χωρική ανάλυση των οπτικών. Οι Guariglia et al. (2006) καταλήγουν ότι η μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση ενδείκνυται για παγχρωματικά δεδομένα. Όσον αφορά στα πολυφασματικά δεδομένα μεσαίας ανάλυσης, έγινε χρήση των υπέρυθρων καναλιών λόγω της σχεδόν μηδενικής ανακλαστικότητας του νερού σε αυτό το μήκος κύματος κι επομένως το νερό εμφανίζεται μαύρο σε μια τέτοια εικόνα. Επιπλέον, σε αυτά τα κανάλια το έδαφος και η υγιής βλάστηση παρουσιάζουν μεγαλύτερη ανακλαστικότητα, καθιστώντας έτσι καλύτερο το διαχωρισμό εδάφους – νερού. Έτσι, με έναν απλό αλγόριθμο κατωφλίωσης η εικόνα μετατρέπεται σε δυαδική και ανιχνεύεται η ακτογραμμή.

Οι **Liu et al. (2007)** παρουσίασαν object-based αλγορίθμους για την εξαγωγή της ακτογραμμής από τηλεπισκοπικά δεδομένα, εξελίσσοντας την επεξεργασία και μετα-επεξεργασία των τηλεπισκοπικών δεδομένων. Η τοπικά προσαρμοζόμενη κατωφλίωση – όπως παρουσιάστηκε παραπάνω – χρησιμοποιείται στα παγχρωματικά δεδομένα (ή για ένα κανάλι) ανάλογα με τα στατιστικά στοιχεία κάθε υποπεριοχής, σε αντίθεση με τους Guariglia et al. (2006) που προτείνουν μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση. Όσον αφορά στα πολυφασματικά δεδομένα, γίνεται χρήση ISODATA ταξινόμησης.

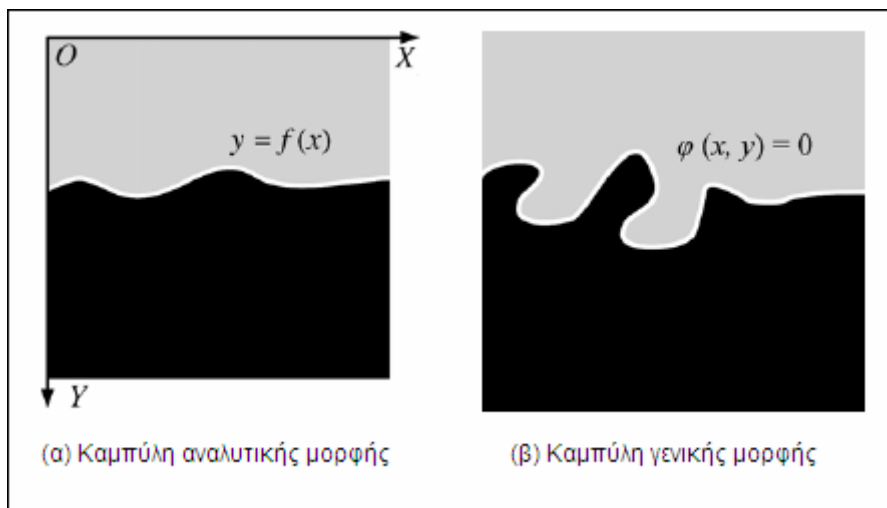
Τέλος, οι Liu et al. (2007) εξελίσσουν και την εφαρμογή των μορφολογικών τελεστών που είχαν χρησιμοποιήσει για τη μετα-επεξεργασία των αποτελεσμάτων, υλοποιώντας πολύπλοκους αλγορίθμους βασισμένους στη γενίκευση και την απλοποίηση. Η γενίκευση και η απλοποίηση αποτελούν χρήσιμες διαδικασίες προκειμένου να ελαττωθεί ο υπερβολικός όγκος δεδομένων (καθώς δεν απαιτείται σε όλες τις εφαρμογές) και να ομαλοποιηθεί η οπτική αναπαράσταση. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται δύο αλγόριθμοι. Ο αλγόριθμος Douglas-Peucker εξυπηρετεί στην απλοποίηση μιας γραμμής και λειτουργεί βάσει του στοιχειώδους σχήματός της. Ο δεύτερος αλγόριθμος απλοποιεί τις κοιλότητες μιας ακτογραμμής αναλύοντας το σχήμα της και εντοπίζονται τα κοίλα/ κυρτά σημεία.

Όπως σημειώθηκε, η εξαγωγή της ακτογραμμής ενυπάρχει στο πρόβλημα της ανίχνευσης ορίων των πεδίων της Όρασης Υπολογιστών και Επεξεργασίας Εικόνας. Τόσο η ανίχνευση ορίων όσο και η ανίχνευση ακμών, επεξεργασία υφής κ.ά., αποτελούν *προσεγγίσεις της αυτόματης ανίχνευσης μια συνοριακής γραμμής*. Η αυτόματη ανίχνευση μιας ανοιχτής συνοριακής γραμμής έχει μεγάλη σημασία στην επεξεργασία δορυφορικών εικόνων, όπως η ακτογραμμή στη χαρτογραφία, ο εντοπισμός πλοίων και η ανίχνευση του ορίζοντα στην πλοήγηση και την αυτόματη αναγνώριση στόχων. Η προς ανίχνευση ανοιχτή καμπύλη πρέπει να αναγνωριστεί ανάμεσα στις εντοπισμένες ακμές, οι οποίες συνήθως περιλαμβάνουν πολλές ψευδοακμές και πολύ περισσότερες μη σχετικές ακμές. Επιπλέον, λόγω του θορύβου και της σύνθετης υφής, μια ακμή συνήθως δεν μπορεί να ανιχνευτεί

συνεχής. Επομένως, η μετα-επεξεργασία (π.χ. μαθηματική μορφολογία) είναι επίσης απαραίτητη όσον αφορά στη συνεκτικότητα των ακμών, ούτως ώστε να διαμορφωθεί μια συνεχής καμπύλη ή μια ανοιχτή συνοριακή γραμμή.

Πολλές προσεγγίσεις, γνωστές ως μοντέλα ενεργών περιγραμμάτων, έχουν προταθεί για την κατάτμηση εικόνας χρησιμοποιώντας τη θεωρία των επιπεδοσυνόλων. Μία από τις πιο διάσημες προσεγγίσεις είναι το μοντέλο των Chan και Vese, το οποίο βασίζεται στο μοντέλο για την κατάτμηση εικόνων των Mumford και Shah καθώς και στα επιπεδοσύνολα. Το μοντέλο κατάτμησης είναι ανθεκτικό στο θόρυβο και στην αρχική θέση της καμπύλης. Σχεδόν σε κάθε μοντέλο ενεργών περιγραμμάτων, τα περιγράμματα πρέπει να είναι κλειστές καμπύλες και με τη μέθοδο των επιπεδοσυνόλων καθορίζονται έμμεσα ως το μηδενικό επιπεδοσύνολο της συνάρτησης Lipschitz ορισμένη σε μεγαλύτερη διάσταση. Στις περιπτώσεις ανίχνευσης μιας ακτογραμμής, που αποτελεί ανοιχτή συνοριακή γραμμή, εάν εφαρμοστεί άμεσα ένα γενικό μοντέλο ενεργών περιγραμμάτων για ανοιχτές συνοριακές γραμμές, ανιχνεύονται και κάποια άλλα αντικείμενα – όπως ένα απομονωμένο νησί. Επομένως, είναι απαραίτητο να αναγνωριστεί ποιο χωρίο είναι το επιθυμητό.

Πρόσφατα, ο Lieu (2006) και ο Min (2006) πρότειναν σχεδόν ταυτόχρονα την ίδια μέθοδο για την ανίχνευση ανοιχτών συνοριακών γραμμών βάσει του μοντέλου C-V. Η μέθοδός τους μπορεί να ανιχνεύει αυτόματα μια επιθυμητή ανοιχτή καμπύλη. Έτσι, όταν το περίγραμμα μιας περιοχής είναι καμπύλη, θα πρέπει να την εκφράζει η συνάρτηση $y = f(x)$ (εικόνα 1.3), ενώ ο αλγόριθμος αποτυγχάνει όταν η ανοιχτή καμπύλη είναι μια γενική καμπύλη και δεν περιγράφεται με την εξίσωση $y = f(x)$.



Εικόνα 1.3: Εικονογράφηση μιας καμπύλης περιγράμματος η οποία περιγράφεται με συνάρτηση αναλυτικής και γενικής μορφής (Li et al., 2009).

Οι Li et al. (2009) προτείνουν μια μέθοδο αυτόματης ανίχνευσης μιας ανοιχτής συνοριακής γραμμής, βάσει του μοντέλου M-S, ενός μεταβολικού μαθηματικού μοντέλου μερικών διαφορικών εξισώσεων και ενεργών περιγραμμάτων τύπου «diffusion snake». Αντίθετα με τη μέθοδο των Lieu (2006) και Min (2006), η

εξελισσόμενη καμπύλη αναπαρίσταται με μια καμπύλη της μορφής B-Spline, ούτως ώστε να μπορεί να ανιχνευτεί αποτελεσματικά η γενική της μορφή. Η μέθοδος επεκτείνεται και σε περιπτώσεις δύο καμπύλων, όπως δρόμους και ποτάμια. Τα αποτελέσματά της εμφανίζουν πολλά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τις μεθόδους που παρουσιάστηκαν. Είναι πολύ ανθεκτική στο θόρυβο και την αρχική θέση της καμπύλης, χρησιμοποιούνται λιγότερα σημεία ελέγχου, δεν απαιτείται προ-επεξεργασία και μετα-επεξεργασία της εικόνας, ακόμα κι αν αυτή έχει θόρυβο. Ωστόσο, δεν μπορεί να ανιχνεύσει με ακρίβεια το περίγραμμα μια καμπύλης όταν αυτή εναλλάσσεται απότομα.

Η Αναλυτική Φωτογραμμετρία αποτελεί και αυτή μια σύγχρονη μέθοδο οριοθέτησης της ακτογραμμής, με χρήση αεροφωτογραφιών για δεδομένο ύψος παλίρροιας, ελεγχόμενων με κινηματικές τεχνικές GPS. Αυτή η τεχνική χαρτογράφησης της ακτογραμμής έχει πολλά πλεονεκτήματα, όπως υψηλή ακρίβεια, ευέλικτο προγραμματισμό και δομή. Ωστόσο, αποτελεί μια πολυδάπανη λειτουργία.

Τα δορυφορικά συστήματα πολύ υψηλής ανάλυσης αν και παρέχουν πολυφασματικά δεδομένα, δεδομένα υψηλής ανάλυσης και δυνατότητες για στερεο-χαρτογραφήσεις, δεν παρέχουν το αυστηρό μοντέλο του αισθητήρα αλλά κλασματικά πολυώνυμα τα οποία και χρησιμοποιούνται όταν το μοντέλο του αισθητήρα δεν είναι διαθέσιμο ή για την επίτευξη μεγαλύτερης ταχύτητας επεξεργασίας. Οι **Di et al. (2001)** αναπτύσσουν μεθοδολογίες εξαγωγής ακτογραμμών σε τρεις διαστάσεις βάσει των κλασματικών πολυωνύμων, με χρήση στερεοαπεικονίσεων (τουλάχιστον 3 εικόνες), βαθυμετρικών δεδομένων και ψηφιακών μοντέλων εδάφους.

Τα κλασματικά πολυώνυμα χρησιμοποιούν το λόγο δύο συναρτήσεων πολυωνύμων για να περιγράψουν το μετασχηματισμό ανάμεσα στις συντεταγμένες εικόνας και εδάφους. Οι συντεταγμένες αυτές κανονικοποιούνται σε μια κλίμακα μεταξύ του -1.0 και του 1.0. Το πρόβλημα είναι η εξαγωγή τρισδιάστατων συντεταγμένων στο χώρο από συντεταγμένες εικόνας συζυγών σημείων ενός στερεοζεύγους. Το πρόβλημα αυτό λύνεται με χρήση κλασματικών πολυωνύμων, ζεύγη εικονοσυντεταγμένων και τα αντίστοιχα υψόμετρα (Yang, 2000). Οι συγγραφείς, ωστόσο, προτείνουν γραμμικοποίηση κατά Taylor των συναρτήσεων αυτών.

Οι συγγραφείς κάνουν μια σύγκριση εξαγωγής της ακτογραμμής σε τρεις διαστάσεις με χρήση ψηφιακών μοντέλων και ορθοαπεικονίσεων, συμπεραίνοντας ότι η δεύτερη μεθοδολογία είναι πολύ πιο ακριβής. Παρατήρησαν ότι τα κλασματικά πολυώνυμα μπορούν να αντικαταστήσουν επιτυχώς σε επίπεδο ακρίβειας τα αυστηρά μαθηματικά μοντέλα, αρκεί να επιλεγεί σωστά η σειρά των πολυωνύμων και να υπάρχουν αρκετά σημεία ελέγχου βάσει του αυστηρού μαθηματικού μοντέλου και του εύρους του ψηφιακού μοντέλου εδάφους.

Σε επόμενη έρευνά τους (**2003**) οι **Li et al.** μέτρησαν τις συντεταγμένες 11 σημείων ελέγχου με GPS και με κλασματικά πολυώνυμα τα οποία δίνονταν μαζί με τα δεδομένα εικόνας. Στα δύο αυτά σετ συντεταγμένων παρατήρησαν ότι τα κυριότερα σφάλματα είναι συστηματικά και κυρίως στη x – διεύθυνση. Η μέγιστη διαφορά

μεταξύ των επίγειων συντεταγμένων των σημείων ελέγχου που προέκυψαν με GPS και με κλασματικά πολυώνυμα σε ένα στερεοζεύγος, ισούται με 16 m. Επομένως, εάν η χρήση αεροφωτογραφιών αντικατασταθεί από δορυφορικές εικόνες πολύ υψηλής ανάλυσης, η ακρίβεια των επίγειων συντεταγμένων θεωρητικά θα βελτιωθεί.

Στην έρευνά τους παρουσιάζουν δύο μεθόδους για τη βελτίωση της ακρίβειας των επίγειων συντεταγμένων. Η πρώτη προσέγγιση αφορά στη βελτίωση των παρεχόμενων ρητών συναρτήσεων βάσει πραγματικών κι όχι εικονικών επίγειων συντεταγμένων, με χρήση ελαχίστων τετραγώνων. Ωστόσο, η μέθοδος αυτή απαιτεί μεγάλο αριθμό επίγειων σημείων ελέγχου. Η δεύτερη προσέγγιση αφορά στην απευθείας βελτίωση των επίγειων συντεταγμένων που υπολογίστηκαν με χρήση των κλασματικών πολυωνύμων. Η μέθοδος αυτή συνήθως εκτελείται ως γραμμικός μετασχηματισμός, χρησιμοποιώντας σημαντικά μικρότερο αριθμό σημείων ελέγχου συγκριτικά με την πρώτη μέθοδο. Αν και η δεύτερη μέθοδος αποδεικνύεται αποτελεσματικότερη, και οι δύο εξασφαλίζουν ακρίβεια 2 με 4 m.

Κατά την εξαγωγή της ακτογραμμής σε τρεις διαστάσεις, υπολογίζονται επίγειες συντεταγμένες αυτής από εικονοσυντεταγμένες, με χρήση κλασματικών πολυωνύμων. Το πρώτο βήμα, είναι η απόκτηση εικονοσυντεταγμένων της ακτογραμμής και στις δύο εικόνες του στερεοζεύγους. Στόχος, είναι να βρεθούν συζυγή σημεία και στις δύο εικόνες. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε ημι – αυτόματα. Τέλος, με χρήση κλασματικών πολυωνύμων και έναν επαναληπτικό αλγόριθμο, προκύπτουν από τις εικονοσυντεταγμένες οι συντεταγμένες εδάφους.

Ο σωστός σχεδιασμός και η αποτελεσματική διαχείριση του παράκτιου περιβάλλοντος εξαρτώνται άμεσα από την πρόβλεψη των μελλοντικών θέσεων της ακτογραμμής. Οι **Addo et al.(2008)** αναπτύσσουν μια μεθοδολογία βάσει της οποίας συγχωνεύουν, αρχικά, όλα τα ιστορικά στοιχεία (χαρτογραφικά, βαθυμετρικά) σε περιβάλλον ArcGIS για να υπολογιστεί έπειτα με γραμμική παλινδρόμηση ο ρυθμός μεταβολής της θέσης της ακτογραμμής. Τα στατιστικά στοιχεία του ρυθμού μεταβολής των ακτογραμμών αποτελούν μια περίληψη των διαδικασιών που έχουν επηρεάσει την ακτή. Η μεταβλητότητα αυτών των στοιχείων βασίζεται σημαντικά στη μεθοδολογία που χρησιμοποιείται για την εξαγωγή της (π.χ. γραμμική παλινδρόμηση). Επιλέχθηκε η τεχνική αυτή λόγω της ανθεκτικότητάς της σε περιορισμένο αριθμό δεδομένων αλλά και της συχνής εφαρμογής της στη στατιστική για τον υπολογισμό ρυθμού μεταβολής. Οι διαθέσιμες μέθοδοι για την ποσοτικοποίηση της επίδρασης των διαβρώσεων στη μέση στάθμη της θάλασσας βασίζονται στη γνώση προγενέστερων στοιχείων που αφορούν στο ρυθμό μεταβολής της. Αυτό είναι προβληματικό σε περιοχές για τις οποίες δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα. Η διαδικασία αυτή χρησιμεύει στην πρόβλεψη των μελλοντικών θέσεων της ακτογραμμής. Η πρόβλεψη έγινε με χρήση του εργαλείου SCAPE, αλλά και άλλων γεωμετρικών και μαθηματικών μοντέλων.

Εκτός των αυτοματοποιημένων και ημι-αυτοματοποιημένων τεχνικών που έχουν αναπτυχθεί την τελευταία πενταετία για την εξαγωγή και την επεξεργασία της ακτογραμμής, έντονη είναι και η χρήση πακέτων λογισμικού για το σκοπό αυτό. Οι **Lipakis et al. (2008)** χρησιμοποιώντας τα πακέτα ERDAS Imagine, LPS, Feature

Analyst και ArcGIS αναπτύσσουν μια μεθοδολογία εξαγωγής της ακτογραμμής με χρήση ταξινόμησης. Η προ-επεξεργασία που αφορά στη δημιουργία μιας *resharpened* εικόνας έγινε στο ERDAS Imagine. Στη συνέχεια, επιλέγονται τα επίγεια σημεία ελέγχου και υπολογίζονται οι άγνωστες παράμετροι των μαθηματικών συναρτήσεων της γεωμετρικής διόρθωσης. Ο εσωτερικός και ο εξωτερικός προσανατολισμός επιλύονται αυτόματα στο LPS (εξειδικευμένο φωτογραμμετρικό λογισμικό, Leica Photogrammetry Suite). Με τη χρήση ενός ακριβούς DEM και των παραμέτρων του αεροτριγωνισμού που έχουν υπολογιστεί με το LPS, γίνεται η ορθοαναγωγή των εικόνων (γεωμετρική και ραδιομετρική διόρθωση). Τελικά, η ακτογραμμή εξάγεται με το πακέτο Feature Analyst, το οποίο εκτελεί ταξινόμηση. Παράμετροι των περιοχών εκπαίδευσης είναι το σχήμα, το μέγεθος, το χρώμα, η υφή, το μοτίβο, οι σκιές και οι συσχετίσεις. Οι παραδοσιακές τεχνικές επεξεργασίας εικόνας περιλαμβάνουν το χρώμα (φασματική υπογραφή), την υφή ή ενίοτε και το μοτίβο. Η διανυσματοποίηση της εξαγόμενης ακτογραμμής γίνεται σε περιβάλλον GIS. Οι Lipakis et al. (2008) σημειώνουν ότι τόσο η ακρίβεια της ορθοαναγωγής όσο και της ταξινόμησης είναι οι σημαντικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την εξαγόμενη ακτογραμμή. Κατά το τελευταίο στάδιο της μεθοδολογίας υπολογίζεται η ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος, προκειμένου να αποδοθεί η διαφοροποίηση των θέσεων της ακτογραμμής σε βάθος χρόνου. Επιπλέον, η εξαγόμενη ακτογραμμή συγκρίνεται με την ακτογραμμή αναφοράς, όπως αυτή έχει προκύψει με επιτόπιες μετρήσεις με χρήση διαφορικού GPS, για τον έλεγχο της αξιοπιστίας της.

1.2 Ανασκόπηση τεχνικών ανίχνευσης ακτογραμμής από LIDAR δεδομένα

Τις τελευταίες δεκαετίες, εκτός της χρήσης δορυφορικών απεικονίσεων, έχουν αναπτυχθεί ποικίλες προσεγγίσεις για τη χαρτογράφηση ακτογραμμών. Αυτές περιλαμβάνουν και τη χρήση δεδομένων **LIDAR** (Light Detection And Ranging). Η τεχνολογία LIDAR επιτρέπει τη συλλογή υψομετρικών δεδομένων μεγάλης πυκνότητας και ακρίβειας χρησιμοποιώντας τεχνικές σάρωσης με δέσμη laser. Μια εξαιρετικής ακρίβειας και αποτελεσματικότητας μέθοδος παραγωγής υψομετρικής πληροφορίας, που επιτρέπει τη σάρωση του εδάφους αλλά και της βλάστησης κάτω από οποιοσδήποτε συνθήκες φωτισμού ή νέφωσης.

Η χαρτογράφηση της ακτογραμμής με χρήση δεδομένων LIDAR είναι μια θεμελιώδης εφαρμογή. Μέθοδοι όπως κατάτμηση, παρεμβολή του LIDAR DEM με παλιρροιακό datum, εξαγωγή περιγραμμάτων (contouring), cross-shore profile έχουν χρησιμοποιηθεί την τελευταία δεκαετία για το σκοπό αυτό. Οι **Woolard et al. (2003)** αναπτύσσουν μια μεθοδολογία εξαγωγής της ακτογραμμής, προκειμένου να εκτιμηθεί η ακρίβεια και η συνάφεια δύο διαφορετικών πακέτων δεδομένων. Για την έρευνα αυτή χρησιμοποιήθηκαν πολλαπλά δεδομένα LIDAR από διαφορετικούς δέκτες (ALTM και LADS). Τα δεδομένα συσχέτισαν τις μετρήσεις παλίρροιας, τα ύψη των Mean Lower Low Water (MLLW) και Mean High Water (MHW) με το ελλειψοειδές και έτσι έδωσαν την υψομετρική διόρθωση. Η διόρθωση αυτή έφερε όλα τα δεδομένα LIDAR σε ένα κοινό σύστημα αναφοράς (κάθετο datum-Vdatum)

και δίνει μία αριθμητική καμπύλη για την αυτόματη εξαγωγή της vector ακτογραμμής. Το Vdatum είναι ένα εργαλείο μετασχηματισμού του NOAA – πολύ χρήσιμο για τη σύνδεση δεδομένων από διαφορετικές πηγές, για τη δημιουργία ενός ενιαίου πακέτου δεδομένων – το οποίο απλοποιεί τη μεθοδολογία και εκτείνει την καταλληλότητά της και σε τοπική κλίμακα. Τα Vdatum χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: εκείνα που δημιουργήθηκαν ως προς τη Μέση Στάθμη της Θάλασσας- (MSL) και ονομάζονται ορθομετρικά datum και εκείνα που δημιουργήθηκαν ως προς τις επιφάνειες της παλίρροιας και ονομάζονται παλιρροιακά datum. Πριν γίνει η εξαγωγή της ακτογραμμής θα πρέπει να γίνει σύγκριση των υψομέτρων και των ηχογραμμάτων στην επιφάνεια που καλύπτει κάθε δέκτης LIDAR με τα δεδομένα NOAA. Τα δεδομένα θέσης x , y , z των διαφόρων σημείων που πάρθηκαν από το λογισμικό του NOAA συγκρίθηκαν με τα άλλα δεδομένα LIDAR. Στη συνέχεια, δημιουργούνται δυο διανυσματικά αρχεία, ένα από τα ALTM δεδομένα κι ένα από δεδομένα χαμηλότερης ανάλυσης LADS, τα οποία και συγκρίνονται μεταξύ τους. Η στατιστική ανάλυση των δεδομένων αυτών βοηθούν στην ποσοτικοποίηση της σχέσης και συνεπώς της συνάφειας των δύο διανυσματικών αρχείων. Για κάθε σημείο (P_i) του ALTM vector καθορίζονται τα δύο κοντινότερα σημεία του στο LADS vector και τα δύο αυτά σημεία ενώνονται. Η κάθετη απόσταση μεταξύ του P_i και της γραμμής αυτής ορίζεται ως το σφάλμα της μέτρησης. Στο σφάλμα ανατίθεται και ο παράγοντας της διεύθυνσης. Αν η διεύθυνση της κάθετης γραμμής από το P_i στα δύο κοντινότερά του βρίσκεται στο δεξί μέρος της γραμμής μεταξύ του P_i και του P_{i+1} , τότε η τιμή του σφάλματος είναι αρνητική. Σε αντίθετη περίπτωση η τιμή του σφάλματος είναι θετική. Η διαδικασία συνεχίζεται για όλα τα σημεία του ALTM vector. Το αποτέλεσμα είναι ένα σύνολο μετρήσεων σφάλματος ίσο με τις μετρήσεις των σημείων στο ALTM.

Οι **Liu et al. (2007)** αναπτύσσουν μια μέθοδο επεξεργασίας εικόνας βασισμένη στην κατάτμηση για την αυτόματη εξαγωγή της ακτογραμμής από δεδομένα LIDAR. Η μέθοδος αυτή αφορά στην κατάτμηση του LIDAR DEM σε μια δυαδική εικόνα, η οποία αποτελείται από εικονοστοιχεία ξηράς και θάλασσας, με παρεμβολή του LIDAR DEM και ενός παλιρροιακού datum, ως κατώφλι. Στη συνέχεια εφαρμόζεται μια σειρά αλγορίθμων επεξεργασίας εικόνας – αφαίρεση μικρών αντικειμένων, εφαρμογή μορφολογικών τελεστών dilation και erosion, contouring – για την εξαγωγή ακτογραμμών σε διανυσματική μορφή με τη μικρότερη δυνατή παρέμβαση του χρήστη. Προκειμένου να εντοπιστεί το περίγραμμα μιας ακτογραμμής τίθενται κριτήρια μήκους και τιμής υψομέτρου (συνήθως μηδενική). Όσον αφορά στη μέθοδο contouring (Robertson et al., 2004) – αφαιρώντας το επιθυμητό παλιρροιακό datum από το ψηφιακό μοντέλο εδάφους, προκύπτουν οι μηδενικές τιμές της ακτογραμμής και από το περίγραμμα αυτών προκύπτει η ακτογραμμή με αναφορά στην παλίρροια – τονίζουν ότι παρόλο που στα περισσότερα πακέτα GIS και χαρτογραφήσεων παρέχονται ευρέως ρουτίνες περιγραμμάτων, δεν αξιοποιούνται για την εξαγωγή της ακτογραμμής. Εν συνεχεία, η διαδικασία αυτή συχνά δημιουργεί μη συνεχείς ακτογραμμές, με υπερβολικό θόρυβο. Συνήθως απαιτείται χειροκίνητη διόρθωση και επαναψηφιοποίηση για την εξάλειψη λανθασμένων ακτογραμμών και για τη βελτίωση των σωστών.

Οι **Liu et al. (2007)** παρουσίασαν object-based αλγορίθμους για την εξαγωγή της ακτογραμμής από δεδομένα LIDAR, παρεμβάλλοντας το DEM με το παλιρροιακό

datum (σύγκριση των τιμών των υψομέτρων που δίνονται από το LIDAR DEM με τα αντίστοιχα του παλιρροιακού datum). Η ρουτίνα παρεμβολής LIDAR DEM/ παλιρροιακού datum έχει ως σκοπό την κατάτμηση των κελιών με υψομετρικά δεδομένα LIDAR σε εικονοστοιχεία ξηράς και θάλασσας, συγκρίνοντας τις τιμές αυτών με τις αντίστοιχες του παλιρροιακού datum. Εάν ένα εικονοστοιχείο έχει υψόμετρο χαμηλότερο από την τιμή του παλιρροιακού datum, κωδικοποιείται ως εικονοστοιχείο «θάλασσας». Σε αντίθετη περίπτωση, κωδικοποιείται ως εικονοστοιχείο «ξηράς». Ο κάρναβος των LIDAR δεδομένων και το παλιρροιακό datum πρέπει να γεωαναφερθούν σε κοινό σύστημα αναφοράς.

Οι **Lee et al. (2009)** εστιάζουν στην εξαγωγή της ακτογραμμής συγχωνεύοντας αεροφωτογραφίες με δεδομένα LIDAR. Για την εξαγωγή της στιγμιαίας θέσης της ακτογραμμής υλοποιούν κατάτμηση βάσει του αλγορίθμου μετακίνησης μέσης τιμής (mean shift segmentation), ταξινομώντας τα σημεία ανάλογα με το αν ανήκουν σε ξηρά ή θάλασσα και εντοπίζοντας το όριο μεταξύ των κλάσεων. Το αποτέλεσμα είναι η στιγμιαία θέση της ακτογραμμής. Δεδομένα εισόδου της μεθόδου είναι το σύννεφο σημείων LIDAR και οι ορθοαπεικονίσεις (εικόνα 1.4).



Εικόνα 1.4: Το σύννεφο σημείων LIDAR προβεβλημένο στην ορθοαπεικόνιση (Lee et al., 2009).

Η διαδικασία εξαγωγής της ακτογραμμής αναπτύσσεται σε επτά στάδια. Αρχικά προσδιορίζονται οι παράμετροι του αλγορίθμου mean shift μέσω μιας διαδικασίας εκμάθησης. Στη συνέχεια, αποδίδεται σε κάθε σημείο LIDAR πληροφορία χρώματος (R, G, B). Επιπλέον, εφαρμόζεται φίλτρο mean shift στην υψομετρική πληροφορία (Z) του LIDAR και στην πληροφορία του χρώματος (R, G, B) για την ελαχιστοποίηση του αριθμού των κλάσεων. Εν συνεχεία, υπολογίζεται η πυκνότητα των σημείων (point density) για κάθε σημείο LIDAR. Οι πληροφορίες (X, Y, Z) κάθε σημείου μαζί με την αντίστοιχη πληροφορία χρώματος (R, G, B) από τις ορθοαπεικονίσεις χρησιμοποιούνται για την κατάτμηση των σημείων LIDAR. Επί προσθέτως, οι παράμετροι που έχουν υπολογιστεί κατά τη διαδικασία εκμάθησης,

χρησιμοποιούνται για την ομαδοποίηση των κατατμημένων σημείων σε τάξεις. Μόνο δύο τάξεις προκύπτουν μέσω αυτής της διαδικασίας, σημεία ξηράς και σημεία θάλασσας. Τελικά, η στιγμιαία θέση της ακτογραμμής μπορεί να εξαχθεί εντοπίζοντας το περίγραμμα της ξηράς. Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται για το σκοπό αυτό είναι ένας τροποποιημένος αλγόριθμος κυρτού περιβλήματος (convex hull algorithm), ο οποίος βασίζεται στον αλγόριθμο κυρτού περιβλήματος που είχε προταθεί το 1977 από τον Jarvis. Η αξιολόγηση της ακτογραμμής γίνεται με αναφορά μια χειροκίνητα ψηφιοποιημένη – στις ορθοαπεικονίσεις – ακτογραμμή. Οι Lee et al. (2009) σημειώνουν ότι η χρήση των ορθοαπεικονίσεων βελτιώνει σημαντικά την ακρίβεια της μεθόδου.

1.3 Ανασκόπηση τεχνικών ανίχνευσης ακτογραμμής από video δεδομένα

Από την περασμένη δεκαετία είναι σαφής η προοπτική των στατικών τηλεπισκοπικών συστημάτων **video** για βελτιούμενη ανάλυση της εξέλιξης της ακτογραμμής στο χώρο και στο χρόνο. Τέτοια συστήματα αυξάνουν τη διαθεσιμότητα δεδομένων για τη διαχείριση του παράκτιου περιβάλλοντος. Τυπικά, παίρνουν δείγματα το λιγότερο ανά ώρα και μπορούν να παρέχουν μακροπρόθεσμες βάσεις δεδομένων δείχνοντας τις μεταβολές στο πέρασμα του χρόνου. Επιπλέον, οι εικόνες video δίνουν λεπτομερείς εκτιμήσεις υψηλής ανάλυσης για τη θέση της ακτογραμμής (1 έως 5 km ακτής). Video δεδομένα χρησιμοποιούνται και για την πρόβλεψη μελλοντικών θέσεων της ακτογραμμής (Smit et al., 2007).

Υπάρχουν ποικίλα μοντέλα ανίχνευσης ακτογραμμών που αφορούν σε video απεικονίσεις Argus. Οι Uunk et al. (2010), στο πλαίσιο του ASM (Auto Shoreline Mapper) αλγορίθμου, χρησιμοποιούν το μοντέλο ομαδοποίησης βάσει των τιμών φωτεινότητας των εικονοστοιχείων (Pixel Intensity Clustering-PIC) των Aarninkhof et al. (2003). Το μοντέλο PIC είναι ικανό να ανιχνεύει πολλαπλά χαρακτηριστικά ακτογραμμής κι επομένως είναι κατάλληλο για παραλίες με χαμηλή κλίση και αναδυόμενες νησίδες άμμου (sand bars). Το μοντέλο ανίχνευσης PIC αυτό-ορίζει έναν δείκτη βάσει των παρατηρούμενων χρωμάτων των εικονοστοιχείων εντός μιας περιοχής ενδιαφέροντος επιλεγμένη από το χρήστη. Η περιοχή αυτή βρίσκεται στην εικόνα timex (ο μέσος όρος μια σειράς εικόνων που έχουν συλλεχθεί στα 2Hz κατά τη διάρκεια μιας χρονικής περιόδου 10 λεπτών) και καλύπτει την παραλία εντός και εκτός της θάλασσας. Τα χρώματα ορίζονται βάσει της απόχρωσης, της έντασης και της φωτεινότητάς τους. Το μοντέλο PIC χρησιμοποιεί αυτό το δείκτη για τη χαρτογράφηση της – κατά μέσο όρο στη χρονική περίοδο των 10 λεπτών – θέσης της ακτογραμμής στην εικόνα timex. Οι Aarninkhof et al. (2003) δημιούργησαν ένα μοντέλο εδάφους για τον υπολογισμό του αντίστοιχου υψομέτρου της ακτογραμμής από μετρήσεις εκτός της ακτής, όπως το ύψος της παλίρροιας και των κυμάτων.

Για τη διευκόλυνση της χαρτογράφησης της ακτογραμμής, οι Aarninkhof et al. (2003) ανέπτυξαν ένα χειροκίνητο εργαλείο ανίχνευσης ακτογραμμής, το IBM (Intertidal Beach Mapper). Το εργαλείο αυτό εκτελεί την ακριβή ανίχνευση της

ακτογραμμής και τον υπολογισμό του υψομέτρου της, αλλά απαιτεί εισερχόμενα δεδομένα από το χρήστη για κάθε εικόνα. Εκτός από τη χρήση της σωστής εικόνας, ο χρήστης πρέπει να υποδείξει την περιοχή ενδιαφέροντος και να εκτελέσει τον έλεγχο ποιότητας στα ανιχνευμένα ως ακτογραμμή σημεία. Για να είναι εφικτή η μακροπρόθεσμη εξαγωγή βαθυμετρίας καθημερινά, τα δύο κύρια σημεία που χρήζουν αυτοματοποίησης είναι η επιλογή της περιοχής ενδιαφέροντος και ο έλεγχος ποιότητας. Ο χαρτογράφος περιγράφει την ακτογραμμή βάσει της οπτικής αντίθεσης της παραλίας ανάμεσα στο υποθαλάσσιο και χερσαίο κομμάτι της.

Ο αυτόματος χαρτογράφος ASM (Auto Shoreline Mapper) που χρησιμοποιούν οι Uunk et al. (2010) αποτελεί μια αυτόματη διαδικασία χαρτογράφησης η οποία, σε συνδυασμό με μετρήσεις εκτός ακτής, όπως δεδομένα της επιφάνειας του νερού και του ύψους των κυμάτων, συγκεντρώνει υψομετρικά δεδομένα από εικόνες video χωρίς την επιτήρηση του χρήστη. Μπορεί να εφαρμοστεί σε χαμηλής κλίσης παραλίες με αναδυόμενες νησίδες. Η διαδικασία ASM χρησιμοποιεί αρχικά τα βήματα από το χειροκίνητα ελεγχόμενο εργαλείο IBM. Γενικά, ο αλγόριθμος ASM αποτελείται από τα παρακάτω στάδια: διόρθωση της εικόνας, συλλογή της περιοχής ενδιαφέροντος, χαρτογράφηση της ακτογραμμής και έλεγχος ποιότητας. Η σημασία της σωστής επιλογής της περιοχής ενδιαφέροντος είναι διττή. Πρώτον, το μοντέλο ανίχνευσης PIC χρησιμοποιεί το υποσύνολο των εικονοστοιχείων που παρατηρούνται σε αυτήν για να κάνει τη διαφοροποίηση μεταξύ των χρωμάτων «ξηρά» και «θάλασσα» των εικονοστοιχείων. Δεύτερον, η επιλεγμένη περιοχή περιορίζει την έκταση στην οποία το εργαλείο ψάχνει για ακτογραμμή.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει και η χρήση των ASVs (αυτόνομα θαλάσσια συστήματα οχημάτων) για την εξαγωγή της ακτογραμμής. Οι **Gong et al. (2007)** παρουσίασαν τη μεθοδολογία τους βάσει αυτών των συστημάτων πλοήγησης. Μια κάμερα πάνω στο σύστημα απαθανατίζει τον περιβάλλοντα χώρο. Λόγω της διαφορετικής αντανάκλασης του νερού ανά περιπτώσεις και της φοράς της ακτογραμμής, γραμμικές μέθοδοι ανίχνευσης βασισμένες σε ανίχνευση ακμών δεν είναι κατάλληλες. Ανάλογα με την αντανάκλαση του νερού εφαρμόζεται είτε κατωφλίωση – όταν δεν υπάρχει αντανάκλαση – είτε ανίχνευση σε 2 φάσεις, υπερκατάτμηση βάσει της ομογένειας των χρωμάτων και ταξινόμηση βάσει συμμετρίας και φωτεινότητας – όταν υπάρχει αντανάκλαση – για το διαχωρισμό των σκηνών (στοιχεία υψής). Με τις διαδικασίες αυτές και line fitting επιτυγχάνεται για την κάθε περίπτωση η εξαγωγή της ακτογραμμής.

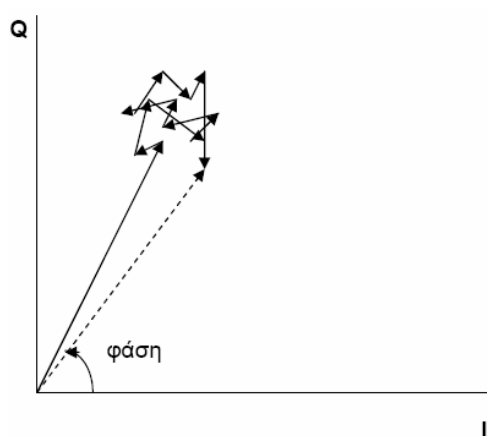
1.4 Ανασκόπηση τεχνικών ανίχνευσης ακτογραμμής από radar δεδομένα

Της τελευταίες δεκαετίες, εκτός των ηλεκτρο-οπτικών, LIDAR και video δεδομένων, διαθέσιμα είναι και τα SAR δεδομένα. Το ραντάρ συνθετικού ανοίγματος **SAR** (Synthetic Aperture Radar) είναι ένα ενεργό μικροκυματικό όργανο τηλεπισκοπικής παρακολούθησης ποικίλων περιβαλλοντικών φαινομένων, που παράγει υψηλής ανάλυσης εικόνες της επιφάνειας της γης σε όλες τις καιρικές συνθήκες. Πολλές φορές χρειάζεται να ληφθούν εικόνες σε άσχημες καιρικές συνθήκες ή ακόμη κατά

τη διάρκεια της νύχτας, επομένως το συγκεκριμένο ραντάρ καθίσταται ιδιαίτερα χρήσιμο για τις περιπτώσεις αυτές, αφού μπορεί να συλλέγει δεδομένα και πληροφορίες τόσο κατά τη διάρκεια της ημέρας όσο και της νύχτας – τα ραντάρ διαθέτουν τη δική της πηγή ενέργειας – ανεξάρτητα από τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν. Επιπλέον μπορεί να απεικονίσει μια διαφορετική όψη ενός στόχου, χρησιμοποιώντας πολύ μικρότερες ηλεκτρομαγνητικές συχνότητες από τους υπόλοιπους οπτικούς αισθητήρες. Τα δεδομένα SAR χρησιμοποιούνται ευρέως στις εφαρμογές της Τηλεπισκόπησης όπως χαρτογραφήσεις, περιβαλλοντική παρακολούθηση, ανίχνευση αλλαγών και παροχή δεδομένων στις γεωεπιστήμες.

Η ανίχνευση της ακτογραμμής από εικόνες SAR αποτελεί ένα δύσκολο εγχείρημα καθώς συνδέεται με τη φύση του ανακλώμενου σήματος από τη στεριά και τη θάλασσα. Πιο συγκεκριμένα, το ανακλώμενο σήμα από τη θάλασσα μπορεί συχνά να μην είναι διακριτό σε σχέση με αυτό της στεριάς. Επιπλέον, τόσο η χαμηλή ποιότητα των δεδομένων όσο και η παρουσία θορύβου υψηλής συχνότητας (speckle, μοντελοποιείται ως δυνατός πολλαπλασιαστικός θόρυβος), καθιστούν την ακριβή ανίχνευση της ακτογραμμής ένα πολύπλοκο θέμα.

Ο θόρυβος υψηλής συχνότητας ή «κηλίδωση» (speckle) στις εικόνες SAR είναι διαφορετικός από το θόρυβο των εικόνων ηλεκτρο-οπτικών αισθητήρων. Η «κηλίδωση» είναι η διαφορά φωτεινότητας μεταξύ γειτονικών εικονοστοιχείων της ίδιας κατηγορίας, δηλαδή αποτελεί μικρο-υφή. Η διαφορά αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι το radar χρησιμοποιεί σύμφωνη (coherent) ακτινοβολία ή ακτινοβολία η οποία βρίσκεται σε φάση, η οποία όμως μπορεί να μεταβληθεί από έναν εκτεταμένο στόχο ο οποίος θεωρείται ότι έχει αρκετά κέντρα οπισθοσκέδασης που συμβάλλουν θετικά ή αρνητικά στο τελικό σήμα επιστροφής (σχήμα 1.1). Επομένως, η «κηλίδωση» δεν αντιστοιχεί σε πραγματική μεταβολή της ραδιομετρίας μεταξύ των εικονοστοιχείων. Είναι θόρυβος του συστήματος και είναι χαρακτηριστικός για όλα τα συστήματα συνάφειας (coherent), όπως τα SAR, sonar και laser, όπου η εκπεμπόμενη και καταγραφόμενη ακτινοβολία είναι συγκεκριμένου κύματος, φάσης και πόλωσης. Γι' αυτό, αποδίδεται ως υφή του συστήματος και όχι της απεικόνισης (B. Καραθανάση, 2001).



Σχήμα 1.1: Συμβολή των μικρών τυχαία κατανεμημένων σκεδαστών οι οποίοι συνθέτουν τη μοναδιαία επιφάνεια του στόχου, στο σήμα επιστροφής (συνιστώσες I και Q) του radar (Καραθανάση, 2001).

Επειδή η παρουσία της δυσχεραίνει την ερμηνεία των radar απεικονίσεων – διότι επικάθεται της υψής – απαιτείται η αφαίρεσή της. Το μέγεθος αυτό μπορεί να θεωρηθεί στατιστικά επεξεργάσιμο (ακολουθεί κανονική, εκθετική ή Rayleigh κατανομή) κι επομένως οι τιμές του συντελεστή οπισθοσκέδασης του ίδιου στόχου σε διαδοχικές χρονικά παρατηρήσεις έχουν ένα μέσο όρο και μια τυπική απόκλιση. Σκοπός είναι η μείωση της τυπικής απόκλισης, ώστε οι αποκρίσεις του ίδιου στόχου να είναι σύμφωνες. Αντιμετωπίζεται με τεχνικές φιλτραρίσματος ή με επεξεργασία πολλών όψεων (multi-look processing), με «αντίτιμο» την ελάττωση της χωρικής διακριτικής ικανότητας. Η επιτυγχανόμενη ελάττωση της «κηλίδωσης» ποσοτικοποιείται με τον ορισμό του αποδοτικού αριθμού των πολλών όψεων απεικονίσεων N_{eff} (ο λόγος του τετραγώνου της μέσης τιμής της «κηλίδωσης» προς το τετράγωνο της μεταβλητότητάς της). Ο αριθμός αυτός είναι το πιο σημαντικό στοιχείο αξιολόγησης της «κηλίδωσης» και δεν συμπίπτει κατ' ανάγκη με τον προδιαγεγραμμένο αριθμό των απεικονίσεων πολλών όψεων. Γενικά, η αφαίρεσή της είναι μια δύσκολη διαδικασία επειδή είναι θόρυβος πολλαπλασιαστικός και όχι προσθετικός, δηλαδή ενισχύοντας τις τιμές της απεικόνισης – ως αποτέλεσμα αύξησης της εκπεμπόμενης ισχύος – ενισχύεται και η «κηλίδωση» (B. Καραθανάση, 2001).

Υπάρχουν πολλά φίλτρα μείωσης του θορύβου υψηλής συχνότητας, όπως τα φίλτρα Lee, Kuan, Frost, enhanced Lee, enhanced Frost, Gamma MAP, τα οποία μειώνουν την «κηλίδωση» προσαρμόζοντας το μέγεθος του παραθύρου του φίλτρου. Ωστόσο, αν και την απομακρύνουν, μειώνουν την ανάλυση της εικόνας εντός του παραθύρου με επιπτώσεις στην ευκρίνεια των ακμών και άλλων γραμμικών στόχων (Huang et al., 2009). Σε άλλη περίπτωση, οι ακμές διατηρούνται αλλά δεν αφαιρείται εντελώς η «κηλίδωση». Τα τελευταία χρόνια, ο μετασχηματισμός κυματιδίων και τα χαρακτηριστικά υψής χρησιμοποιούνται για τη μείωση της «κηλίδωσης». Εκτός αυτού διατηρούνται ικανοποιητικά οι ακμές. Οι μεθοδολογίες αυτές εστιάζουν στην ανίχνευση των «κηλίδων» στην εικόνα, ενώ **η σημασία της μείωσης του θορύβου υψηλής συχνότητας είναι πολύ μεγάλη για την ερμηνεία SAR εικόνων** (Huang et al., 2009).

Οι **Descombes et al. (1996)** αναπτύσσουν μια μεθοδολογία εξαγωγής ακτογραμμής από SAR δεδομένα, βασισμένη στα τυχαία πεδία Markov (Markov Random Fields – MRFs). Στην έρευνά τους υπογραμμίζουν κυρίως δύο σημεία: τη χρήση απεικονίσεων αλλοιωμένων από θόρυβο υψηλής συχνότητας και την ανίχνευση της ακτογραμμής στην αρχική εικόνα. Βάσει ιεραρχικής προσέγγισης, προτείνουν τη χρήση των MRFs σε δύο επίπεδα χωρικής ανάλυσης.

Ένα MRF είναι μια διακριτή στοχαστική διαδικασία της οποίας οι γενικές ιδιότητες ελέγχονται μέσω τοπικών ιδιοτήτων. Ορίζονται από τοπικές, υπό συνθήκη, πιθανότητες. Τα MRF είναι μια οικογένεια στατιστικών μοντέλων που περιγράφουν περιορισμούς, και μπορούν να θεωρηθούν ως γενίκευση των μοντέλων αλυσίδας Markov (MC Models), τα οποία περιγράφουν χρονικούς περιορισμούς. Θεμελιώδεις έννοιες της θεωρίας των MRF μοντέλων είναι η έννοια των θέσεων, οι οποίες είναι τυχαίες μεταβλητές και παίρνουν μια τιμή από ένα σύνολο ετικετών. Ένας συγκεκριμένος τρόπος κατά τον οποίο τοποθετούνται ετικέτες στις θέσεις καλείται διαμόρφωση του MRF πεδίου. Οι θέσεις, μαζί με ένα σύστημα γειτονιάς,

σχηματίζουν ένα μη διευθυνόμενο γράφημα το οποίο χρησιμοποιείται για τον καθορισμό των περιορισμών μεταξύ των ετικετών των θέσεων. Η Μαρκον ιδιότητα των MRF εκφράζει ότι η κατανομή πιθανότητας κάθε θέσης, μπορεί να εξαρτάται μόνο από τον τρόπο που αποδίδονται ετικέτες σε αυτές τις θέσεις που είναι συνδεδεμένες στο γράφημα. Τελικά, με το μοντέλο αυτό λύνεται το πρόβλημα απόδοσης ετικετών στις θέσεις.

Στην αρχική ανάλυση, η χρήση ενός MRF στην τοπολογία μειώνει τα μειονεκτήματα των κλασικών προσεγγίσεων (π.χ. υπερκατάτμηση). Η αρχική κατάτμηση προβάλλεται στην εικόνα πλήρους ανάλυσης κι έπειτα γίνεται μια δεύτερη ταξινόμηση με το μοντέλο Ising.

Για την ανίχνευση της ακτογραμμής χρησιμοποιείται ο τελεστής κλίσης στην εικόνα χαμηλής ανάλυσης. Οι θέσεις των εικονοστοιχείων των περιγραμμάτων ανιχνεύονται εύκολα. Σε κάθε θέση που ανιχνεύεται ένα εικονοστοιχείο ορίου, ορίζεται μια μικρή γειτονιά (3x3). Τα δεδομένα της γειτονιάς χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της παραγώγου κατά μήκος της ακτογραμμής. Ο υπολογισμός της εκτελείται μόνο για τις ορθογώνιες διευθύνσεις. Για την αποφυγή ασαφειών στις απεικονίσεις των ακμών, η ακτογραμμή υπολογίζεται αρχικά κατά μήκος των συνδεδεμένων περιοχών κι έπειτα κανονικοποιείται από το μήκος της. Κατ' αυτόν τον τρόπο, μια περιοχή που συνδέεται με n κλάσεις έχει n κανονικοποιημένα επίπεδα παραγώγων.

Για την τελική εξαγωγή της ακτογραμμής στην εικόνα πλήρους ανάλυσης, δημιουργείται μια λεπτή λωρίδα στην ακτογραμμή που έχει εξαχθεί από την προηγούμενη διαδικασία. Τελικά η ακτογραμμή ανιχνεύεται σε αυτή τη λωρίδα με τη χρήση ενός δεύτερου MRF.

Οι **Dellepiane et al. (2004)** εστιάζουν στην εκμετάλλευση εικόνων SAR, επειδή αυτού του τύπου τα δεδομένα είναι ιδιαίτερα ελκυστικά για πολλούς λόγους, όπως οι προγραμματισμένες αποστολές με δέκτες SAR υψηλής διακριτικής ικανότητας και η πιθανότητα λήψης εικόνων ανεξάρτητα από τις καιρικές συνθήκες. Η διευκόλυνση αυτή είναι πολύ σημαντική για εφαρμογές όπως η παρακολούθηση της ακτογραμμής, καθώς οι περισσότερες αλλαγές σχετίζονται με τις κακές καιρικές συνθήκες.

Οι περισσότερες έρευνες επωφελούνται των μεθοδολογιών και των αλγορίθμων που σχετίζονται με τις τιμές φωτεινότητας του γκρι στις εικόνες. Όπως τονίζουν οι Dellepiane et al. (2004) αυτό δεν είναι πάντα χρήσιμο όσον αφορά στις εικόνες SAR, επειδή η θάλασσα δεν χαρακτηρίζεται γενικά από ενιαίες τιμές φωτεινότητας του γκρι. Η προτεινόμενη προσέγγισή τους λαμβάνει υπόψη το γεγονός ότι οι εικόνες SAR χαρακτηρίζονται από έντονη πληροφορία υψής, λόγω τόσο των ιδιοτήτων της σκέδασης όσο και αυτών μιας φυσικής επιφάνειας. Σε αυτού του τύπου τις εικόνες η θάλασσα έχει διαφορετική υφή από την ξηρά.

Μια αρχική διάσταση της προτεινόμενης μεθόδου περιλαμβάνει την απλή σύνθεση διαφορετικών παραμέτρων εικόνας λαμβάνοντας υπόψη το βαθμό συνάφειας του ζεύγους InSAR (interferometric SAR) εικόνων. Η πληροφορία που δίνεται από το

βαθμό συνάφειας είναι πάντα ένα δυνατό εργαλείο όσον αφορά στη διάκριση ξηράς και θάλασσας. Η απλότητα της μεθόδου συνίσταται στο μικρό αριθμό παραμέτρων και τιμών κατωφλίων που εφαρμόζονται, με αποτέλεσμα – σε αντίθεση με άλλες μεθόδους – να δημιουργείται μια ανθεκτική, εύστοχη και επαναληπτική μέθοδος.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία για την εξαγωγή της ακτογραμμής βασίζεται σε μια ανάλυση των SAR δεδομένων, λαμβάνοντας υπόψη τα δεδομένα υψής και την περιοδικότητα στη λήψη εικόνων παράλληλα. Για την ακρίβεια, με την συμβολομετρική συνοχή που προκύπτει από τη συσχέτιση του ζεύγους InSAR, αξιοποιούνται τόσο οι τιμές φωτεινότητας της εικόνας όσο και οι ιδιότητες της υψής. Τα στάδια της μεθόδου παρουσιάζονται παρακάτω:

- Αρχικά λαμβάνει χώρα η προ-επεξεργασία για την εξαγωγή της εικόνας συνάφειας από το ζεύγος InSAR εικόνων. Ο βαθμός συνάφειας που εξάγεται για κάθε σημείο της εικόνας περιλαμβάνει πληροφορία σχετική με τις αλλαγές που έχουν γίνει στην υπό εξέταση περιοχή μέσα σε μια γνωστή χρονική περίοδο. Η θάλασσα χαρακτηρίζεται από χαμηλό βαθμό συνάφειας, λόγω των συνεχών αλλαγών που υφίσταται.

- Ένα δεύτερο στάδιο προ-επεξεργασίας αφορά στην παρουσία υψής, την οποία δημιουργεί η τελική εικόνα συνοχής που απεικονίζει το μέσο όρο των τιμών (συνοχής). Προκειμένου να οριστεί η υψή σε μια εικόνα, είναι απαραίτητη η περιγραφή της χωρικής μεταβλητότητας των τιμών φωτεινότητας του γκρι των εικονοστοιχείων, εντός ενός κινούμενου παραθύρου με κέντρο κάθε εικονοστοιχείο ορισμένου εκ των προτέρων. Η τελική αυτή εικόνα προκύπτει από την εφαρμογή ενός απλού κινούμενου φίλτρου μέσου όρου, επιτρέποντας τη δημιουργία μιας εικόνας η οποία παρουσιάζει ομογένεια στη θαλάσσια περιοχή.

- Το τρίτο στάδιο της επεξεργασίας αφορά στην κατάτμηση, η οποία εφαρμόζεται παράλληλα στην εικόνα συνάφειας και στην τελική εικόνα συνάφειας, έχοντας ως αποτέλεσμα έναν σταθμισμένο με βάρη χάρτη συνοχής από τον οποίο με κατωφλίωση προκύπτει η ακτογραμμή. Οι συγγραφείς προτείνουν την εφαρμογή της θεωρίας των ασαφών συνόλων που προτείνεται στη μέθοδό τους isocountour (1996). Σε αυτή την περίπτωση, αξιοποιείται η συνάφεια για την αποσαφήνιση των χωρικών σχέσεων μεταξύ γειτονικών εικονοστοιχείων. Η προτεινόμενη προσέγγιση είναι μια ημι-διαδραστική κατάτμηση. Βασίζεται στην εξάπλωση ενός αρχικού σημείου, το οποίο επιλέγεται από το χρήστη με κριτήριο ότι σίγουρα ανήκει στο ανιχνευόμενο αντικείμενο. Στη συνέχεια, ακολουθεί τα καλύτερα μονοπάτια με κριτήρια συνοχής, καταλήγοντας έτσι στην εξαγωγή ενός συνεχούς στοιχείου και των λεπτομερειών του. Η μέθοδος οδηγείται κυρίως από τα δεδομένα και χρησιμοποιεί κάποιες πληροφορίες του επιλεγμένου αρχικού σημείου. Επομένως, θα μπορούσε να θεωρηθεί επιβλεπόμενη. Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές επιβλεπόμενες μεθόδους της μεγίστης πιθανοφάνειας και της ελάχιστης απόστασης, η εφαρμογή της μεθόδου isocountour επιτρέπει στο χρήστη τον καλύτερο εντοπισμό αντικειμένων ενδιαφέροντος τα οποία είναι πολύ ετερογενή, όπως η θαλάσσια περιοχή. Η χρήση της εικόνας συνάφειας δεν επιτρέπει την ορθή ανίχνευση της ακτογραμμής, αφού η παρουσία της υψής οδηγεί σε ένα

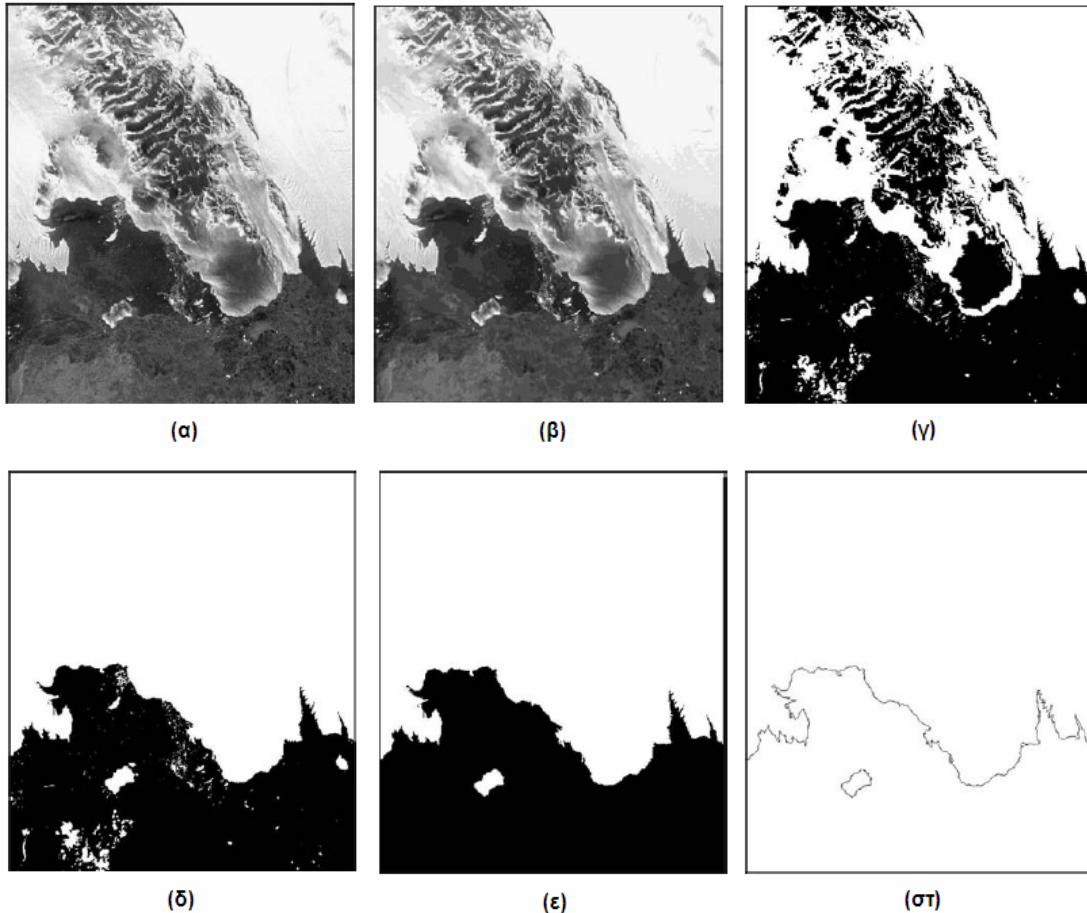
κατακερματισμένο αποτέλεσμα. Από την άλλη πλευρά, η χρήση της τελικής εικόνας συνάφειας οδηγεί στην απώλεια σημαντικών πληροφοριών. Ο συνδυασμός των δύο, γίνεται σε επίπεδο συνάφειας. Αυτό επιτρέπει την εφαρμογή ενός απλού σταθμισμένου με βάρη μέσου όρου. Τελικά, με διαδοχικές κατωφλιώσεις επιλέγεται το καταλληλότερο κατώφλι για την εξαγωγή της ακτογραμμής από το σταθμισμένο με βάρη χάρτη συνάφειας.

Προκειμένου να εκτιμηθεί η ακρίβεια των αποτελεσμάτων από τα δεδομένα SAR, εξάγεται η ακτογραμμή και από μιας υψηλής ανάλυσης αεροφωτογραφία. Αυτό είναι δυνατό ακόμα και με την ύπαρξη μεγάλης διαφοράς στη χωρική ανάλυση μεταξύ των εικόνων SAR και των αεροφωτογραφιών. Η προ-επεξεργασία της αεροφωτογραφίας επιτυγχάνεται με υποδειγματοληψία (sub-sampling). Η μέθοδος με την οποία γίνεται η εκτίμηση των αποτελεσμάτων από τις εικόνες SAR, παρουσιάζεται παρακάτω:

- Εξαγωγή της ακτογραμμής από την αεροφωτογραφία της οποίας έχει αλλάξει το μέγεθος και μιας εικόνας μετατόπισης (distance image).
- Κανονικοποίηση $[0, 1]$ της ακτογραμμής που έχει ανιχνευτεί από τις εικόνες SAR.
- Η κανονικοποιημένη ακτογραμμή τίθεται ως μάσκα στην εικόνα μετατόπισης. Συγκεκριμένα, δημιουργείται μια γραμμή της οποίας κάθε εικονοστοιχείο αναπαριστά την απόσταση μεταξύ των δύο γραμμών.
- Υπολογισμός της μέσης μετατόπισης και της τυπικής απόκλισης κάθε εικονοστοιχείου της γραμμής που προκύπτει από το προηγούμενο στάδιο.

Οι **Liu και Jezek (2004)** αναπτύσσουν μια αποτελεσματική και ανθεκτική μεθοδολογία εξαγωγής της ακτογραμμής στην περιοχή της Ανταρκτικής, σε τρία στάδια, στο πλαίσιο του RAMP (Radarsat Antarctic Mapping Project). Οι SAR εικόνες (Radarsat-1, C band) διορθώνονται γεωμετρικά και ραδιομετρικά (ορθοαναγωγή) και δημιουργείται ένα μωσαϊκό. Η διαδικασία αυτή γίνεται αφενός για να απαλειφθούν οι γεωμετρικές παραμορφώσεις και οι παραμορφώσεις λόγω αναγλύφου, αφετέρου για την απόδοση γεωγραφικών συντεταγμένων ακριβείας στα εικονοστοιχεία της εικόνας. Έπειτα, εφαρμόζεται μια σειρά αλγορίθμων επεξεργασίας εικόνας στο SAR ορθομωσαϊκό για την αυτόματη εξαγωγή της ακτογραμμής (εικόνα 1.5). Οι αλγόριθμοι αυτοί οργανώνονται με τρόπο που να επιτελούν τρεις συναπτές λειτουργίες: προ-επεξεργασία, κατάτμηση, μετα-επεξεργασία. Κατά την προ-επεξεργασία, χρησιμοποιείται το φίλτρο Lee και ο τελεστής ανισοτροπικής διάχυσης βάσει του αλγορίθμου των Perona και Malik, για τον περιορισμό του θορύβου υψηλής συχνότητας και για την ενίσχυση των ακμών της ακτογραμμής. Η κατάτμηση των εικόνων SAR σε ομογενείς περιοχές πάγου/εδάφους και θάλασσας γίνεται με τοπικά προσαρμοζόμενη κατωφλίωση, οπότε και προσαρμόζεται η μέθοδος των Levenberg-Marquardt στις γκαουσιανές παραμέτρους – η καμπύλη είναι bimodal, δηλαδή έχει δύο κορυφές και μία κοιλάδα – και χρησιμοποιείται ο τελεστής Canny για την ομαλοποίηση του ιστογράμματος και για την εκτίμηση αξιόπιστων αρχικών τιμών για τις γκαουσιανές παραμέτρους. Η μετα-επεξεργασία των δεδομένων ακολουθεί την εξής αλληλουχία διαδικασιών:

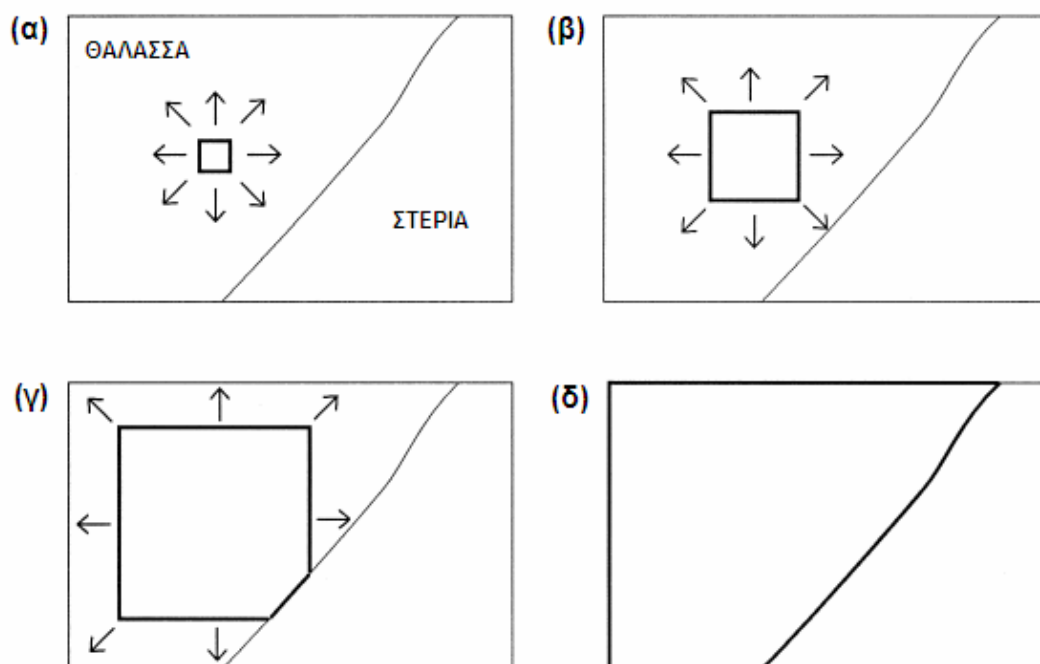
διαμόρφωση και απόδοση ετικέτας στα αντικείμενα της εικόνας, απομάκρυνση αντικειμένων που αποτελούν θόρυβο, εντοπισμός των ακμών και διανυσματοποίηση. Η μετα-επεξεργασία γίνεται στις κατατμημένες εικόνες για την εξαγωγή των ακτογραμμών σε διανυσματική μορφή. Περαιτέρω διαδικασίες διόρθωσης γίνονται στο ArcInfo GIS. Η ακτογραμμή παρουσιάζεται σε Πολική Στερεογραφική προβολή με αναφορά στο ελλειψοειδές WGS'84. Το τελικό προϊόν των Liu και Jezek (2004) είναι ένας χάρτης της ακτογραμμής της Ανταρκτικής χωρικής ανάλυσης 25 m (περίπου 1 εικονοστοιχείο), ο οποίος καλύπτει της προδιαγραφές των συμβατικών χαρτών κλίμακας 1:50.000.



Εικόνα 1.5: (α) Εικόνα SAR εισόδου. (β) Η εικόνα έπειτα από την εφαρμογή φίλτρου Lee και ανισοτροπικής διάχυσης. (γ) Κατάτμηση με τοπικά προσαρμοζόμενη κατωφλίωση, (δ) Απομάκρυνση μικρών θαλάσσιων αντικειμένων που αποτελούν θόρυβο. (ε) Απομάκρυνση μικρών χερσαίων αντικειμένων που αποτελούν θόρυβο. (στ) Εξαγωγή ακτογραμμής (vector). (Liu and Jezek, 2004).

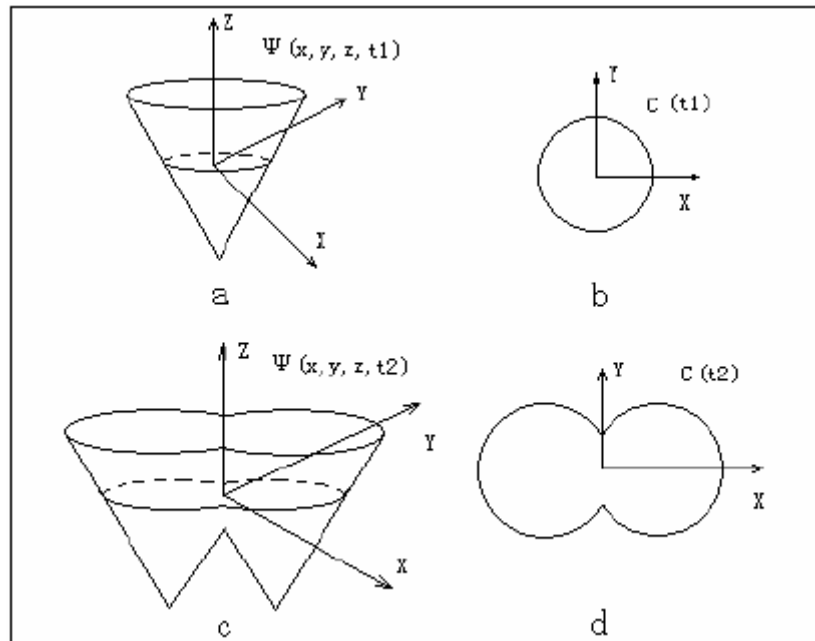
Οι μέθοδοι κατάτμησης που βασίζονται στα φίλτρα ανίχνευσης ακμών τα οποία έχουν αναπτυχθεί για εικόνες SAR, συχνά εμφανίζουν ακμές που μπορεί να μην σχηματίζουν ένα σύνολο κλειστών καμπυλών που περιβάλλουν συνδεδεμένες περιοχές. Οι παραδοσιακές τεχνικές της κατάτμησης, της κατωφλίωσης του ιστογράμματος και αυτές με βάση περιοχές της εικόνας (region-based), χρήζουν προ-επεξεργασίας βάσει μείωσης του θορύβου υψηλής συχνότητας. Επιπλέον, οι

μέθοδοι κατάτμησης με επέκταση περιοχών (region-growing) περιορίζονται από την επιλογή των αρχικών σημείων (εικόνα 1.6).



Εικόνα 1.6: Κατάτμηση με επέκταση περιοχών (region-growing segmentation). (α) Επιλέγεται το αρχικό εικονοστοιχείο (seed pixel) και τα γειτονικά εικονοστοιχεία συγχωνεύονται εάν ικανοποιούν ένα κριτήριο ομοιογένειας. (β) Η περιοχή συνεχίζει να επεκτείνεται με συγχώνευση γειτονικών εικονοστοιχείων έως ότου. (γ) Συναντήσκει εικονοστοιχεία που δεν ικανοποιούν το κριτήριο ομοιογένειας. (δ) Ο αλγόριθμος τελειώνει όταν η περιοχή δεν επεκτείνεται άλλο. (White and El Asmar, 1999).

Τα τελευταία χρόνια, οι μέθοδοι των ενεργών περιγραμμάτων, βασισμένα στην εξέλιξη των καμπυλών και στην προσέγγιση των επιπεδοσυνόλων, αποτελούν ένα σημαντικό εργαλείο όσον αφορά στα προβλήματα κατάτμησης εικόνας. Τα ενεργά περιγράμματα ταξινομούνται ως παραμετρικά, τα λεγόμενα snakes, ή γεωμετρικά ανάλογα με την εφαρμογή και την παρουσίασή τους. Συγκεκριμένα, τα παραμετρικά ενεργά περιγράμματα παρουσιάζονται ως καμπύλες παραμετροποιημένες στο σύστημα αναφοράς Langrange, ενώ τα γεωμετρικά παρουσιάζονται ως δισδιάστατες συναρτήσεις, τα επιπεδοσύνολα, που εξελίσσονται στο σύστημα αναφοράς Euler (εικόνα 1.7).



Εικόνα 1.7: Εικονογράφηση της θεωρίας των επιπεδοσυνόλων (Chong et al., 2008).

Οι περισσότερες αριθμητικές υλοποιήσεις γεωμετρικών ενεργών περιγραμμάτων βασίζονται στη μέθοδο των επιπεδοσυνόλων των Osher και Sethian στην οποία το ενεργό περίγραμμα καθορίζεται έμμεσα ως το μηδενικό επιπεδοσύνολο μιας βαθμωτής συνάρτησης εμφύθισης (embedding) με πεδίο ορισμού το επίπεδο της εικόνας. Αυτό επιτρέπει αλλαγές στην τοπολογία της καμπύλης με πολύ φυσικότερο τρόπο σε σχέση με τα παραμετρικά ενεργά περιγράμματα.

Τα μοντέλα ενεργών περιγραμμάτων χρησιμοποιούνται ευρέως στις εφαρμογές της Επεξεργασίας Εικόνας. Τα snakes είναι καμπύλες που ορίζονται στο χώρο της εικόνας κι κινούνται υπό την επήρεια εσωτερικών δυνάμεων εντός της καμπύλης, αλλά και εξωτερικών δυνάμεων που προκύπτουν από τα δεδομένα της εικόνας. Οι εσωτερικές και εξωτερικές δυνάμεις ορίζονται ούτως ώστε τα snakes να ταιριάζουν τελικά στο περίγραμμα ενός αντικειμένου ή κάποιου άλλου επιθυμητού χαρακτηριστικού της εικόνας.

Παρουσιάστηκαν αρχικά το 1987 από τους Kass, Witkin και Terzopoulos. Για την ακρίβεια, το αρχικό μοντέλο ενεργών περιγραμμάτων παρουσιάζει μια σειρά από περιορισμούς. Αρχικά, το αρχικό περίγραμμα θα πρέπει να είναι αρκετά κοντά στο αντικείμενο, για την αποφυγή εσφαλμένων αποτελεσμάτων. Δευτερευόντως, η απόδοση ενός snake εξαρτάται από τον αριθμό των σημείων ελέγχου, που συνήθως είναι αμετάβλητος. Εκτός αυτού, η μέθοδος δεν είναι ικανή να εξαγάγει το περίγραμμα πολύπλοκων αντικειμένων και αντιμετωπίζει δυσκολίες όσον αφορά στα κοίλα περιγράμματα. Οι Della Rocca et al. (2004) στην έρευνά τους εφαρμόζουν έναν αλγόριθμο που χρησιμοποιεί μια τροποποιημένη εκδοχή του μοντέλου των ενεργών περιγραμμάτων και η οποία περιλαμβάνει μια νέα σειρά εξωτερικών δυνάμεων για την αντιμετώπιση των προβλημάτων που αναφέρθηκαν παραπάνω.

Ένα snake αποτελεί μια παραμετρική καμπύλη που ορίζεται στο χώρο της εικόνας και του οποίου η εκκίνηση γίνεται χειροκίνητα από ένα σύνολο σημείων ελέγχου μιας κλειστής ή ανοιχτής καμπύλης. Σχετικό με το snake είναι μια συνάρτηση ενέργειας η οποία χρησιμοποιείται για την κίνηση του snake κατά μήκος της εικόνας. Για κάθε σημείο ελέγχου, η ενέργεια ξαναυπολογίζεται για όλα τα σημεία της γειτονιάς του. Το σημείο εκείνο που ελαχιστοποιεί τη συνάρτηση ενέργειας χρησιμοποιείται για την ενημέρωση του σημείου ελέγχου. Ότι δηλαδή έχει ανιχνευτεί ένα σημείο ενδιαφέροντος (ακμή), το οποίο μπορεί να ανακατασκευαστεί με παρεμβολή μεταξύ των σημείων ελέγχου.

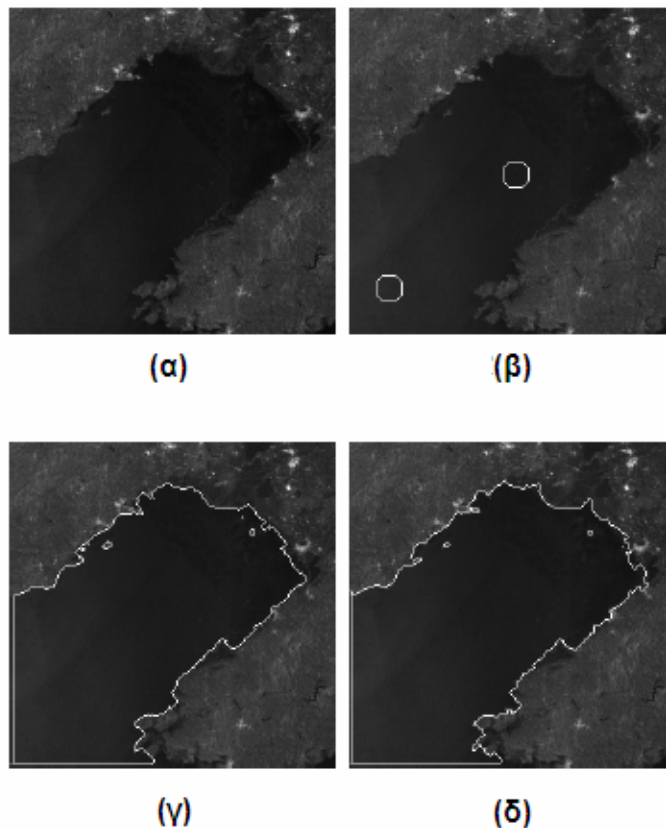
Οι Della Rocca et al. (2004) στην έρευνά τους χρησιμοποιούν έναν αλγόριθμο βασισμένο σε μια ιεραρχική διαδικασία φιλτραρίσματος, γνωστή ως θεωρία χώρων – κλίμακας (Within 1983, Leymarie and Levine 1993), η οποία ακολουθώντας γενικεύεται ούτως ώστε να ταιριάζει στο wavelet-based snake. Η ιδέα της θεωρίας χώρων – κλίμακας είναι ο υπολογισμός του snake στην απλοποιημένη εικόνα και η χρήση του ως αρχικό περίγραμμα σε μια εικόνα μεγαλύτερης λεπτομέρειας κ.ο.κ., μέχρις ότου να επιτευχθεί η αρχική ανάλυση της εικόνας. Η διαδικασία τελειώνει όταν επιτυγχάνεται το αρχικό επίπεδο λεπτομέρειας. Αυτό υλοποιείται στο χώρο των κυματιδίων. Ο μετασχηματισμός κυματιδίων βασίζεται σε «παράθυρα» μεταβλητού μεγέθους, με μεγάλα χρονικά παράθυρα όπου απαιτείται ακρίβεια σε πληροφορίες χαμηλών συχνοτήτων και μικρότερα παράθυρα όπου απαιτείται ακρίβεια σε πληροφορίες υψηλών συχνοτήτων. Η ανάλυση, λοιπόν, γίνεται *τοπικά*, σε μια εντοπισμένη περιοχή ενός μεγαλύτερου σήματος. Η χρησιμότητα του μετασχηματισμού έγκειται στη δυνατότητα επεξεργασίας πληροφορίας σε πολλαπλές κλίμακες – σημειώνεται ότι η ανάλυση γίνεται με απεικόνιση χρόνου-κλίμακας και όχι χρόνου-συχνότητας όπως συμβαίνει με το μετασχηματισμό Fourier – ενισχύοντας τις δομές της εικόνας (εν προκειμένω τις ακμές) και μειώνοντας το θόρυβο.

Η αρχική εικόνα φιλτράρεται μέσω μιας οικογένειας γκαουσιανών φίλτρων, σε διάφορες κλίμακες. Έπειτα, στις φιλτραρισμένες εικόνες εφαρμόζεται ένα φίλτρο διαφόρισης (π.χ. Sobel) για τον υπολογισμό των παραγώγων. Το επόμενο βήμα είναι η εφαρμογή της μεθόδου χώρων – κλίμακας βάσει παραγώγων μέσω του μετασχηματισμού κυματιδίων. Έχει αποδειχθεί ότι οι πρώτες παράγωγοι μιας οικογένειας γκαουσιανών φίλτρων είναι ισοδύναμες με τους συντελεστές του αντίστοιχου μετασχηματισμού κυματιδίων, πολλαπλασιασμένων με μια σταθερά κλίμακας. Αποδεικνύεται επίσης ότι η εφαρμογή ενός μετασχηματισμού κυματιδίων ισοδυναμεί με την εφαρμογή τελεστών απλοποίησης και κλίσεων. Επομένως, το wavelet-based μοντέλο ενεργών περιγραμμάτων συνδυάζει την ανάλυση χαμηλών και υψηλών συχνοτήτων (ακμές) σε μια διαδικασία.

Η μεθοδολογία εφαρμόστηκε τόσο σε SAR εικόνες όσο και σε εικόνες υψηλής διακριτικής ικανότητας. Η πρώτη λειτουργία αφορά στο φιλτράρισμα της αρχικής εικόνας με χαμηλοπερατά και υψιπερατά φίλτρα. Έπειτα υπολογίζεται το μέτρο του μετασχηματισμού κυματιδίου (εξωτερική ενέργεια) σε όλες τις κλίμακες. Σε κάθε βήμα προκύπτει ένα snake. Η καμπύλη που προκύπτει χρησιμοποιείται ως αρχική εκτίμηση στο επόμενο επίπεδο κλίμακας. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου επιτευχθεί το αρχικό επίπεδο λεπτομέρειας.

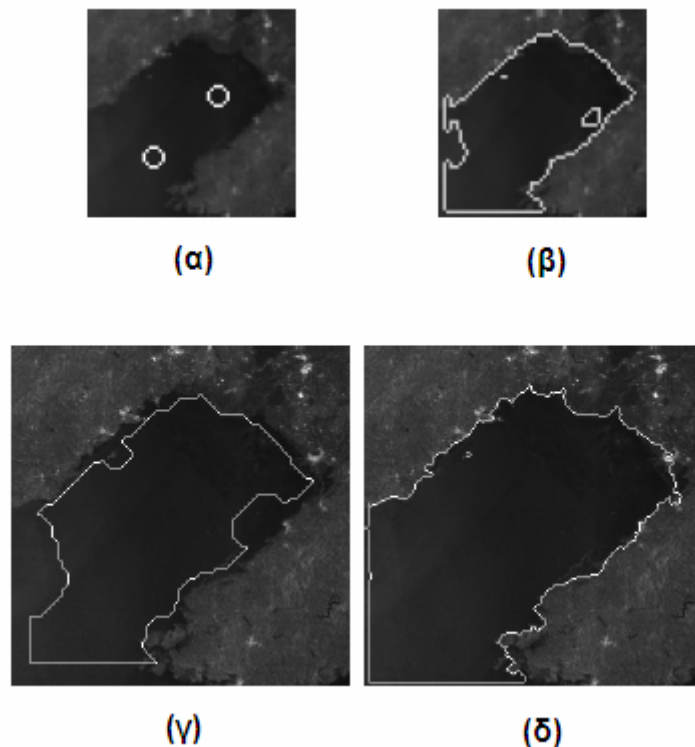
Οι **Chong et al. (2008)** αναπτύσσουν δύο μεθοδολογίες ανίχνευσης ακτογραμμής βασισμένες στη θεωρία των επιπεδοσυνόλων. Στον αλγόριθμο των επιπεδοσυνόλων το αρχικό περίγραμμα κατευθύνεται αυτόματα προς την ακτογραμμή της εικόνας, καθιστώντας ευρύ το πεδίο εφαρμογών του αλγορίθμου. Ωστόσο, ο αλγόριθμος είναι αρκετά αργός, ιδίως στις εικόνες υψηλής διακριτικής ικανότητας, λόγω της επαναληπτικότητας του σε ποικίλες και πολύπλοκες διαδικασίες. Η λειτουργία του έγκειται στην «ενσωμάτωση» μιας επίπεδης καμπύλης στον τρισδιάστατο χώρο. Η δυναμική εξέλιξη της καμπύλης αντιστοιχεί στο μηδενικό επιπεδοσύνολο της επιφάνειας.

Η μέθοδος των συγγραφέων βασίζεται στον αλγόριθμο των επιπεδοσυνόλων, με τη διαφορά ότι ορίζεται εκ των προτέρων μια παράμετρος η οποία ελέγχει την ταχύτητα που κινούνται τα επιπεδοσύνολα (εικόνα 1.8). Στόχος είναι το περίγραμμα να κινείται γρήγορα μακριά από μια αληθή ακμή και αργά κοντά σε αυτήν. Ο πρώτος αλγόριθμος που αναπτύσσουν βασίζεται σε μια συνάρτηση η οποία ελέγχει αν το κάθε σημείο είναι κοντά – ή πάνω – σε ακμή ή όχι. Έπειτα η εικόνα κατωφλιώνεται και σε αυτήν εφαρμόζεται ο αλγόριθμος των επιπεδοσυνόλων και ορίζεται η παράμετρος που ελέγχει την ταχύτητα. Οι συγγραφείς αναφέρουν ότι η μεθοδολογία αυτή καθιστά περιττή τη μετα-επεξεργασία της εικόνας, καθώς η επιφάνεια παραμένει ομαλή, και επιπλέον μειώνεται δραματικά η επαναληπτικότητα του αλγορίθμου. Σημειώνουν ότι ο χρόνος ανίχνευσης είναι το 1/6 του χρόνου ανίχνευσης με την απλή μέθοδο των επιπεδοσυνόλων.



Εικόνα 1.8: (α) Εικόνα RADARSAT ScanSAR. (β) Αρχικό περίγραμμα. (γ) Μεσαίο επίπεδο ανίχνευσης ακτογραμμής. (δ) Τελικό επίπεδο ανίχνευσης ακτογραμμής. (Chong et al., 2008).

Η δεύτερη μεθοδολογία των συγγραφέων για την ταχεία ανίχνευση μιας ακμής βασίζεται στη μείωση της ανάλυσης της εικόνας – μέσω της φίλτρου μέσου όρου (εικόνα 1.9). Έτσι, με τον αλγόριθμο “Narrow band” των επιπεδοσυνόλων ανιχνεύεται το περίγραμμα στην εικόνα μειωμένης διακριτικής ικανότητας και στη συνέχεια προβάλλεται στην αρχική – με μεθόδους ανίχνευσης ακμών στις 8 διευθύνσεις του εικονοστοιχείου. Η δυσκολία έγκειται σε αυτήν ακριβώς την προβολή. Τελικά, με τον ίδιο αλγόριθμο ανιχνεύεται η ακτογραμμή στην αρχική εικόνα υψηλής διακριτικής ικανότητας. Οι συγγραφείς σημειώνουν ότι ο χρόνος ανίχνευσης με αυτή τη μέθοδο είναι το 1/8 του χρόνου ανίχνευσης με την απλή μέθοδο των επιπεδοσυνόλων.



Εικόνα 1.9: (α) Αρχικό περίγραμμα στην εικόνα μειωμένης διακριτικής ικανότητας. (β) Ανίχνευση ακτογραμμής στην εικόνα μειωμένης διακριτικής ικανότητας. (γ) Προβολή περιγράμματος από την εικόνα μειωμένης διακριτικής ικανότητας. (δ) Τελικό επίπεδο ανίχνευσης ακτογραμμής. (Chong et al., 2008).

Οι **Cerimele et al. (2009)** χρησιμοποιούν τη μέθοδο των επιπεδοσυνόλων για την κατάτμηση SAR εικόνων σε ξηρά και θάλασσα, με εφαρμογή δύο διαφορετικών συναρτήσεων ταχύτητας. Η πρώτη βασίζεται στις μέσες τιμές φωτεινότητας των περιοχών (οι τιμές φωτεινότητας της εικόνας μοντελοποιούνται με την κατανομή Γάμμα) και δεν απαιτεί την αφαίρεση του θορύβου υψηλής συχνότητας. Η δεύτερη μεθοδολογία βασίζεται στην παράγωγο της εικόνας, η οποία χρησιμοποιείται για την ανίχνευση των ακμών, και συνυπολογίζει το πρόβλημα του φιλτραρίσματος της εικόνας με τη μέθοδο SRAD (Speckle Reducing Anisotropic Diffusion), η οποία αποτελεί επέκταση του αλγορίθμου των Perona και Malik. Η πρώτη εφαρμογή των επιπεδοσυνόλων ανιχνεύει την ακτογραμμή με περισσότερη ακρίβεια σε επίπεδο εικονοστοιχείων, εφόσον η εικόνα δεν φιλτράρεται. Οι συγγραφείς παρατήρησαν

ότι το καλύτερο αποτέλεσμα επιτυγχάνεται τοποθετώντας την αρχική καμπύλη όσο γίνεται πιο κοντά στην ακτογραμμή κι επομένως εξαρτάται άμεσα από τη θέση της αρχικής καμπύλης. Η δεύτερη μεθοδολογία είναι λιγότερο ακριβής σε επίπεδο εικονοστοιχείων λόγω της εφαρμογής της σε φιλτραρισμένη εικόνα. Ωστόσο, η συγκεκριμένη προσέγγιση δεν εξαρτάται από τη θέση της αρχικής καμπύλης.

Τελικά, προτείνουν το συνδυασμό των δύο συναρτήσεων ταχύτητας, όπως περιγράφεται παρακάτω. Για την εξασφάλιση μιας αυτόματης και ακριβούς διαδικασίας, αρχικά η αρχική καμπύλη εξελίσσεται εφαρμόζοντας τη συνάρτηση ταχύτητας βάσει της παραγώγου της εικόνας στην εικόνα που έχει φιλτραριστεί με SRAD. Το αποτέλεσμα χρησιμοποιείται ως αρχική καμπύλη για τη δεύτερη εφαρμογή των επιπεδοσυνόλων στην αρχική εικόνα χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση ταχύτητας βάσει των μέσων τιμών φωτεινότητας. Επομένως, η κατάτμηση που προκύπτει από αυτή τη συνδυαστική διαδικασία, είναι ανεξάρτητη από την αρχική θέση της καμπύλης.

1.5 Συμπεράσματα

Λεπτομερείς τοπογραφικοί χάρτες, αεροφωτογραφίες και, πρόσφατα, δορυφορικές εικόνες είναι τα κύρια δεδομένα που χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή στοιχείων και δεικτών, απαραίτητων για την παρακολούθηση της εξέλιξης της θέσης της ακτογραμμής κατά μήκος του παράκτιου περιβάλλοντος. Τα τελευταία χρόνια, η εξέλιξη των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών ενισχύει τη διαθεσιμότητα περισσότερων δεδομένων ακριβείας σε ψηφιακή μορφή. Το γεγονός αυτό επιτρέπει την ανάπτυξη των αυτοματοποιημένων συστημάτων με σκοπό την εξαγωγή στοιχείων, όπως οι ακτογραμμές. Παραδείγματα τέτοιων δεδομένων ακριβείας είναι απεικονίσεις πολύ υψηλής ανάλυσης (Ikonos, Quickbird, κ.ά), LIDAR, video και radar δεδομένα, πολύ πιο ακριβά από τις μεσαίας χωρικής ανάλυσης δορυφορικές εικόνες (Landsat, SPOT, κ. ά).

Στην ανασκόπηση που προηγήθηκε, καταγράφηκαν τεχνικές που έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια με εφαρμογή στα δεδομένα αυτά. Οι τεχνικές αυτές υπάγονται κυρίως στους τομείς της Επεξεργασίας Εικόνας και της Όρασης Υπολογιστών και δείχνουν ολοένα και περισσότερο την ανάγκη και την τάση ανάπτυξης αυτοματισμών στον τομέα όχι μόνο της Τηλεπισκόπησης, αλλά και της Φωτογραμμετρίας και της Χαρτογραφίας. Στους πίνακες που επισυνάπτονται παρουσιάζονται οι μέθοδοι εξαγωγής ακτογραμμών, όπως αυτές καταγράφηκαν κατά την ανασκόπηση της βιβλιογραφίας, καθώς και τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για το σκοπό αυτό.

	Ταξινόμηση (Classification)			Κατάτμηση/Κατωφλίωση	Τελεστές ανίχνευσης ακμών	Κλασματικά πολυώνυμα	Ψευδέγχρωμο σύνθετο
	Βάσει εικονοστοιχείων	Βάσει αντικειμένων	Feature Analyst				
Addo et al.							
Alesheikh et al.				X			X
Armenakis and Savopol	X			X			
Bagli and Soille				X			
Cerimele et al.							
Chong et al.				X			
Della Rocca et al.							
Dellepiane et al.		X		X			
Descombes et al.							
Di et al. (2001)						X	
Di et al. (2003)				X			
Gong et al.				X			
Guariglia et al.	X			X			
Karantzalos et al.					X		
Karantzalos and Argialas					X		
Lee et al.				X			
Li, R. Et al.						X	
Li, X.M. et al.							
Li and Damen							
Lipakis et al.			X				
Liu and Jezek (2004a)				X	X		
Liu and Jezek (2004b)				X			
Liu et al. (2007a)				X			
Liu et al. (2007b)	X			X			
Puissant et al.							
Robertson et al.							
Ruiz et al.				X			
Uunk et al.							
Van and Binh							
White and El Asmar							
Woolard et al.							
Yamano et al.				X			

Πίνακας 1.1: Ταξινόμηση μεθοδολογιών ανίχνευσης της ακτογραμμής βάσει τεχνικών ανάλυσης εικόνας (1/3).

	Λόγοι καναλιών	ArcGIS	Binary slicing	Χρήση υπερύθρου	Υπολογισμός πρώτης παραγώγου	Υπολογισμός δεύτερης παραγώγου	Υφή	Μαθηματική μορφολογία	Snakes
Addo et al.		X							
Alesheikh et al.	X								
Armenakis and Savopoul									
Bagli and Soille									
Cerimele et al.									
Chong et al.									
Della Rocca et al.									
Dellepiane et al.									
Descombes et al.					X				
Di et al. (2001)									
Di et al. (2003)									
Gong et al.							X		
Guariglia et al.	X			X					
Karantzalos et al.							X		
Karantzalos and Argialas									
Lee et al.									
Li, R. Et al.									
Li, X.M. et al.									X
Li and Damen			X						
Lipakis et al.									
Liu and Jezek (2004a)									
Liu and Jezek (2004b)									
Liu et al. (2007a)									
Liu et al. (2007b)									
Puissant et al.								X	
Robertson et al.									
Ruiz et al.						X			
Uunk et al.									
Van and Binh	X	X							
White and El Asmar				X					
Woolard et al.									
Yamano et al.		X							

Πίνακας 1.2: Ταξινόμηση μεθοδολογιών ανίχνευσης της ακτογραμμής βάσει τεχνικών ανάλυσης εικόνας (2/3).

	Wavelet-based snake	Επιπεδοσύνολα	V-Datum, NOAA	Contouring	Παρεμβολή	Convex Hull Algorithm	Μοντέλο PIC	Marcov Random Fields
Addo et al.								
Alesheikh et al.								
Armenakis and Savopol								
Bagli and Soille								
Cerimele et al.		X						
Chong et al.		X						
Della Rocca et al.	X							
Dellepiane et al.								
Descombes et al.								X
Di et al. (2001)								
Di et al. (2003)								
Gong et al.								
Guariglia et al.								
Karantzalos et al.								
Karantzalos and Argialas								
Lee et al.						X		
Li, R. Et al.								
Li, X.M. et al.								
Li and Damen								
Lipakis et al.								
Liu and Jezek (2004a)								
Liu and Jezek (2004b)								
Liu et al. (2007a)				X				
Liu et al. (2007b)					X			
Puissant et al.								
Robertson et al.				X				
Ruiz et al.								
Uunk et al.							X	
Van and Binh								
White and El Asmar								
Woolard et al.			X					
Yamano et al.								

Πίνακας 1.3: Ταξινόμηση μεθοδολογιών ανίχνευσης της ακτογραμμής βάσει τεχνικών ανάλυσης εικόνας (3/3).

Παρατηρείται ότι οι μέθοδοι της κατάτμησης και της κατωφλίωσης έχουν μελετηθεί την τελευταία πενταετία σε ποσοστό μεγαλύτερο του 45% – σημειώνεται ότι σε πολλές περιπτώσεις οι συγγραφείς χρησιμοποιούν περισσότερες από μία μεθοδολογίες. Η μεγάλη μελέτη της κατάτμησης έγκειται στη χρησιμότητά της να μειώνει τον πλεονασμό πληροφορίας στο χώρο της εικόνας – ή το χωρο-χρονικό πλεονασμό (spatio-temporal redundancy) στην περίπτωση των video – κι επομένως στη μείωση του υπολογιστικού χρόνου επεξεργασίας. Ωστόσο, η χρήση κατωφλιώσεων είναι πολύ σχετική όσον αφορά στην επιλογή του σωστού κατωφλίου, μέσα στο μεγάλο εύρος τιμών φωτεινότητας μιας εικόνας. Όταν μια εικόνα, για παράδειγμα, έχει ραδιομετρική ανάλυση 16bits, οι ψηφιακές τιμές της

απεικόνιση είναι 65536, οπότε η σωστή επιλογή κατωφλίου είναι απαιτητική, δεν ελέγχεται και πάντα εξαρτάται από τη φωτοερμηνευτική δεινότητα του χρήστη. Η ταξινόμηση, συνολικά, χρησιμοποιείται σε ποσοστό περίπου 16% και οι τελεστές ανίχνευσης ακμών σε ποσοστό περίπου 9%. Όλες οι υπόλοιπες μεθοδολογίες έχουν χρησιμοποιηθεί σε ποσοστά μικρότερα του 7%. Σημειώνεται ότι με την έννοια «ταξινόμηση» εννοείται η **κατηγοριοποίηση (classification)** και όχι η κατάταξη (sorting), έννοιες οι οποίες εμπίπτουν στο πεδίο της Εξόρυξης Δεδομένων (Data Mining) της Επιστήμης Υπολογιστών.

Τελικά, σε ποσοστό περίπου 80% παρατηρείται η χρήση ανεξάρτητων τεχνικών επεξεργασίας εικόνας βάσει αλγορίθμων, εν αντιθέσει με τις ήδη υπάρχουσες, όπως φωτοερμηνεία και έτοιμα πακέτα λογισμικού, ποσοστό το οποίο δείχνει αφενός την ανάγκη δημιουργίας σύγχρονων μεθόδων και τεχνικών επεξεργασίας τηλεπισκοπικών δεδομένων, αφετέρου πόσο εξελίξιμο είναι το επιστημονικό πεδίο της Επιστήμης Υπολογιστών σε ό,τι αφορά την Τηλεπισκόπηση αλλά και άλλες επιστήμες, όπως η Ιατρική. Στην εποχή της Γεωπληροφορικής, είναι απαραίτητη η έρευνα και η υλοποίηση ημι-αυτόματων και αυτόματων διαδικασιών επεξεργασίας και εξαγωγής γεωπληροφορίας για την παρακολούθηση του παγκόσμιου περιβάλλοντος, εφόσον τεράστιος όγκος δεδομένων μπορεί πλέον να ληφθεί σε πραγματικό χρόνο και είναι σκόπιμο να διαχειρίζεται συστηματικά και σε σύντομο χρονικό διάστημα.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή ακτογραμμών με τις μεθόδους που περιγράφηκαν κατά την ανασκόπηση της βιβλιογραφίας.

	SATELLITE										
	Panchromatic					MultiSpectral					
	Medium Resolution			High Resolution		Medium Resolution				High Resolution	
	LANDSAT	SPOT	IRS-1C	IKONOS	QUICKBIRD	LANDSAT	SPOT	IRS-1C	ASTER	IKONOS	QUICKBIRD
Addo et al.											
Alesheikh et al.						X					
Armenakis and Savopol				X		X					
Bagli and Soille						X					
Cerimele et al.											
Chong et al.											
Della Rocca et al.											
Dellepiane et al.											
Descombes et al.											
Di et al. (2001)				X							
Di et al. (2003)				X		X				X	
Gong et al.											
Guariglia et al.		X				X	X				
Karantzalos et al.		X	X	X		X					
Karantzalos and Argialas				X							
Lee et al.											
Li, R. Et al.				X							
Li, X.M. et al.											
Li and Damen		X				X	X				
Lipakis et al.				X						X	
Liu and Jezek (2004a)						X					
Liu and Jezek (2004b)		X									
Liu et al. (2007a)											
Liu et al. (2007b)				X						X	X
Puissant et al.											X
Robertson et al.											
Ruiz et al.					X						X
Smit et al.											
Uunk et al.											
Van and Binh						X			X		
White and El Asmar						X					
Woolard et al.											
Yamano et al.						X			X	X	

Πίνακας 1.4: Ταξινόμηση των δεδομένων που χρησιμοποιούνται στην ανίχνευση της ακτογραμμής βάσει τεχνικών ανάλυσης εικόνας (1/2).

	Map			SAR		LIDAR	Aerial Photography	DEM	Video	Other
	Bathymetric	Topographic	Nautical	Radarsat-1	ERS-1/2					
Addo et al.	X	X								
Alesheikh et al.										
Armenakis and Savopol							X	X		
Bagli and Soille										X
Cerimele et al.					X					
Chong et al.				X						
Della Rocca et al.					X					
Dellepiane et al.					X		X			
Descombes et al.					X					
Di et al. (2001)							X			
Di et al. (2003)										
Gong et al.									X	
Guariglia et al.		X					X			X
Karantzalos et al.										
Karantzalos and Argialas										X
Lee et al.						X	X			
Li, R. Et al.							X			
Li, X.M. et al.										X
Li and Damen		X	X							X
Lipakis et al.							X	X		
Liu and Jezek (2004a)				X						
Liu and Jezek (2004b)		X		X				X		
Liu et al. (2007a)						X	X			X
Liu et al. (2007b)						X		X		X
Puissant et al.										
Robertson et al.						X	X			X
Ruiz et al.										
Smit et al.									X	
Uunk et al.									X	
Van and Binh		X								
White and El Asmar		X								
Woolard et al.						X				X
Yamano et al.										

Πίνακας 1.5: Ταξινόμηση των δεδομένων που χρησιμοποιούνται στην ανίχνευση της ακτογραμμής βάσει τεχνικών ανάλυσης εικόνας (2/2).

Από τους παραπάνω πίνακες όπου παρουσιάζεται η χρήση ποικίλων τηλεπισκοπικών και άλλων δεδομένων, παρατηρείται ότι στις περισσότερες εφαρμογές μεγάλη είναι η χρήση δορυφορικών απεικονίσεων ηλεκτρο-οπτικών δεκτών μεσαίας διακριτικής ικανότητας (περίπου 36%). Σε μεγάλο ποσοστό (περίπου 33%) χρησιμοποιούνται υψηλής διακριτικής ικανότητας απεικονίσεις, παρόλο που οι πρώτες είναι πιο οικονομικές. Σημειώνεται ότι χρησιμοποιούνται περισσότεροι από ένας τύπος δεδομένων στις περισσότερες εφαρμογές. Έντονη είναι η χρήση αεροφωτογραφιών (περίπου 27%), χαρτών (περίπου 18%) και SAR εικόνων (περίπου 21%), σημαντική η χρήση των LIDAR (περίπου 15%) και μικρή των video εικόνων (περίπου 9%). Τελικά, τα δορυφορικά δεδομένα ηλεκτρο-οπτικών δεκτών αποτελούν τον καλύτερο συνδυασμό αποτελεσματικότητας, διαθεσιμότητας

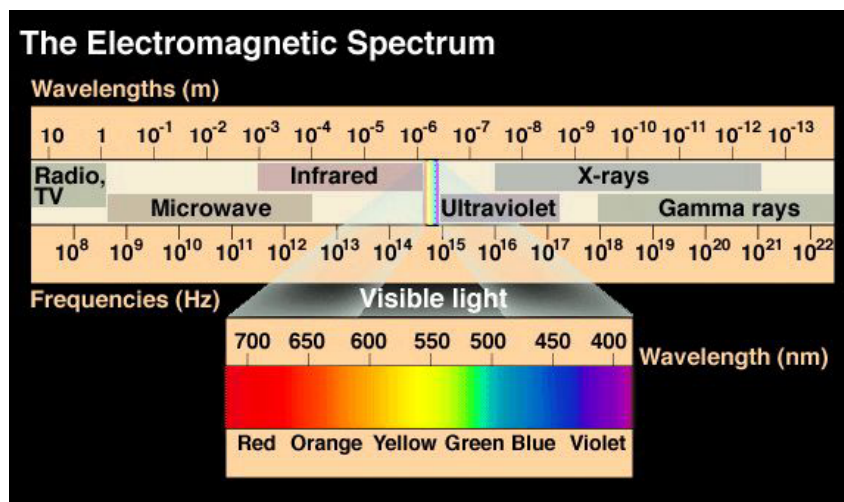
και κόστους, συγκριτικά με τους άλλους τύπους δεδομένων που παρουσιάστηκαν. Η χρήση δορυφορικών απεικονίσεων υψηλής διακριτικής ικανότητας, αν και είναι οριακά μικρότερη από αυτά της μεσαίας ανάλυσης, τελικά εκτιμάται ως η πιο έντονη, λόγω του μειονεκτήματός τους ως προς το κόστος και του πλεονεκτήματος της καλύτερης ανάλυσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

2 Τηλεπισκοπικά συστήματα για την ανίχνευση χαρακτηριστικών στο παράκτιο περιβάλλον

Για την παρατήρηση της γήινης επιφάνειας ένας ανιχνευτής μετρά το ποσοστό της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που ανακλάται από τα διάφορα υλικά. Κάθε αντικείμενο που βρίσκεται πάνω στη Γη έχει ένα μοναδικό τρόπο να ανακλά την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία σε διάφορα μήκη κύματος. Η φασματική αυτή συμπεριφορά ενός υλικού είναι αυτή που βοηθά στη μελέτη, τον εντοπισμό και την απεικόνιση αυτού. Στην Τηλεπισκόπηση υπάρχουν αισθητήρες που ανιχνεύουν ακτινοβολία και πέρα από το ορατό φάσμα, στο εγγύς υπέρυθρο, στο μέσο υπέρυθρο, στο θερμικό υπέρυθρο, στα μικροκύματα κ. ά., με αποτέλεσμα μια ποικιλία εικόνων.

Η ηλεκτρο-οπτική Τηλεπισκόπηση κυρίως δραστηριοποιείται στην περιοχή από το οπτικό φάσμα μέχρι και το θερμικό υπέρυθρο. Συνήθως οι δορυφόροι έχουν από τρία έως επτά ή και περισσότερα ραδιόμετρα. Κάθε ένα αποκτά μια ψηφιακή εικόνα (σκηνή) σε μια μικρή ζώνη του ορατού φάσματος (0.4 – 0.7 μm), που ονομάζεται RGB – κόκκινο, πράσινο, μπλε – περιοχή, και εν συνεχεία σε υπέρυθρα μήκη κύματος από 0.7 έως 10 μm ή περισσότερο, που ταξινομούνται στο εγγύς, μέσο ή θερμικό υπέρυθρο. Η επιλογή της περιοχής καταγραφής του φάσματος δεν είναι τυχαία. Βασική τροχοπέδη στον σχεδιασμό των δεκτών, πέρα από τις τεχνικές δυσκολίες, είναι και η *ατμόσφαιρα*. Η σύνθεσή της επηρεάζει δραστικά την απορρόφηση και την διάχυση του φωτός σε διάφορες περιοχές. Το παραπάνω οφείλεται στην δομή των μορίων και των ενώσεων που συνθέτουν την ατμόσφαιρα (Συκάς, 2010). Στο σχήμα 2.1 παρουσιάζεται το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα και στη συνέχεια αναλύεται επιγραμματικά ο τρόπος συλλογής δεδομένων, μέσω της *διαδρομής του φωτός*.



Σχήμα 2.1: Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Πηγή:

<http://www.qis.unbc.ca/courses/geoq205/lectures/rsdata/spectrum.gif>.

Όπως αναφέρει ο Συκάς Δ. (2010), το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας εκπέμπεται από τον Ήλιο και ταξιδεύει προς τη Γη. Η κατανομή αυτού του φάσματος δεν είναι ίδια σε όλα τα μήκη κύματος, αλλά παρουσιάζει συγκεκριμένες διαφοροποιήσεις, που προέρχονται καθαρά από τον τρόπο δημιουργίας της ακτινοβολίας αυτής (σύντηξη πυρήνων υδρογόνου κτλ). Στη συνέχεια, το φάσμα εισέρχεται στην ατμόσφαιρα του πλανήτη. Όπως είναι γνωστό από τους νόμους σκέδασης και διάχυσης του φωτός, τα διάφορα μήκη κύματος υφίστανται διάχυση, σκέδαση και απορρόφηση από τα στοιχεία και τις ενώσεις που είναι παρούσες στην ατμόσφαιρα. Αποτέλεσμα αυτού είναι η αλλαγή στην κατανομή της έντασης της ακτινοβολίας στα διάφορα μήκη κύματος που προσπίπτουν στο έδαφος. Ύστερα, το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας προσπίπτει στην επιφάνεια ή στο αντικείμενο προς εξέταση και ανακλάται. Κατά τη διάρκεια της ανάκλασης, ανάλογα με την μοριακή δομή του κάθε αντικειμένου, το κάθε μήκος κύματος ανακλά με διαφορετική ένταση. Επομένως, έχουμε άλλη μία μεταβολή στην κατανομή των εντάσεων του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Έπειτα, η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία συνεχίζει την πορεία της μέσα στην ατμόσφαιρα, όπου και υφίσταται τις ίδιες επιδράσεις που περιγράφηκαν παραπάνω, μέχρι να καταλήξει στον δέκτη. Τέλος, το φάσμα εισάγεται μέσα στον δέκτη όπου και καταγράφεται, δηλαδή η ένταση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας του κάθε καναλιού μετασχηματίζεται σε ηλεκτρικό σήμα. Έτσι κάθε εικονοστοιχείο περιέχει τη φασματική πληροφορία – υπογραφή του αντικείμενου το οποίο κατέγραψε.

Η *φασματική υπογραφή* ενός αντικείμενου, ουσιαστικά είναι ένα διάγραμμα το οποίο δείχνει την καταγεγραμμένη ακτινοβολούμενη ισχύ της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (radiance) από το αντικείμενο, στα διάφορα μήκη κύματος. Αν είναι διαθέσιμο και το φάσμα του Ήλιου, τότε οι τιμές αυτές μπορούν να μετατραπούν σε *ανακλαστικότητες*. Η υπογραφή αυτή είναι μια *διακριτή* καταγραφή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, αν και στα υπερφασματικά δεδομένα μοιάζει με μία συνεχόμενη καμπύλη, λόγω του πολύ μεγάλου πλήθους καναλιών.

Οι ανακλαστικότητες είναι ο λόγος της ανακλώμενης προς την προσπίπτουσα ένταση της ακτινοβολίας για κάθε κανάλι. Η έκφραση αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη, καθώς αποτελεί το *ποσοστό της ανακλώμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας*. Θεωρητικά, το ποσοστό αυτό παραμένει ανεπηρέαστο από τις συνθήκες φωτισμού, γεγονός που καθιστά τη φασματική ταξινόμηση των αντικειμένων ανεξάρτητη των συνθηκών αυτών. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι λόγω της ύπαρξης θορύβου στις διατάξεις του δέκτη – δηλαδή ατέλειες στη μέθοδο καταγραφής – ο λόγος αυτός δεν είναι ακριβώς ίδιος για συγκεκριμένο αντικείμενο, ενώ οι διαφοροποιήσεις που εμφανίζονται μπορεί να είναι από ασήμαντες έως προβληματικές (Συκάς, 2010).

Ανάλογα με το χαρακτηριστικό του οποίου γίνεται η μελέτη, επιλέγεται ο φασματικός τύπος ανιχνευτή ώστε να ληφθεί η μέγιστη πληροφορία. Για παράδειγμα, εάν το ζητούμενο είναι η χαρτογράφηση της ακτογραμμής, θα χρειαστεί το φασματικό τμήμα στο εγγύς υπέρυθρο, καθώς το νερό απορροφά πλήρως την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία σε αυτό το τμήμα, ενώ το έδαφος (ακτή) την ανακλά, με αποτέλεσμα να εμφανίζεται μια σαφής διαφοροποίηση κατάλληλη για την αποτύπωση του ορίου ύδατος – ακτής.

Ανάλογα με την προέλευση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, η οποία ανακλάται και στη συνέχεια ανιχνεύεται, οι δέκτες – σαρωτές (ή αισθητήρες) μπορούν να διακριθούν σε *παθητικούς* και σε *ενεργητικούς*. Άλλη διάκριση των ανιχνευτών μπορεί να γίνει ανάλογα με το πόσα κανάλια ανιχνεύουν και σε τι φασματικό εύρος. Ένας ανιχνευτής που καταγράφει σε μία φασματική ζώνη καλείται *μονοφασματικός*, και μπορεί να ανιχνεύει τη φασματική αντανάκλαση σε ένα μικρό (στενό) τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος ή σε μια ευρύτερη περιοχή. Μονοφασματικοί ανιχνευτές που καταγράφουν σε ολόκληρο το ορατό τμήμα και στο εγγύς υπέρυθρο (Visible & Near Infrared) δίνουν δεδομένα (εικόνες) που καλούνται *παγχρωματικά*. Ανιχνευτές που καταγράφουν δεδομένα σε περισσότερες από μία φασματικές ζώνες ονομάζονται *πολυφασματικοί* (multispectral). Οι πολλαπλές τιμές αντανάκλασης συνδυάζονται για να δημιουργηθούν *έγχρωμες* εικόνες. Τα παγχρωματικά δεδομένα έχουν καλύτερη ανάλυση από τα αντίστοιχα πολυφασματικά. Τέλος, ανιχνευτές που καταγράφουν την αντανάκλαση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σε πολλές φασματικές ζώνες στενού εύρους, συνήθως 10-20 nm, καλούνται *υπερφασματικοί* – δηλαδή δέκτες με πιο πολλά κανάλια ή λεπτότερη φασματική ανάλυση ή ευρύτερη φασματική κάλυψη.

2.1 Ανίχνευση χαρακτηριστικών σε παγχρωματικές και πολυφασματικές απεικονίσεις πολύ υψηλής ανάλυσης

Μια παγχρωματική εικόνα αποτελείται από ένα ενιαίο κανάλι. Συνήθως παρουσιάζεται σαν μια εικόνα που αποτελείται από αποχρώσεις του γκρι (grayscale). Ο αισθητήρας του συστήματος απεικόνισης είναι ένας ανιχνευτής ευαίσθητος σε ένα ευρύ φάσμα τιμών μήκους κύματος της ακτινοβολίας. Εάν το εύρος των τιμών αυτών συμπίπτει με το ορατό φάσμα (0.4 – 0.7 μm) – ή με μεγάλο μέρος αυτού – τότε η εικόνα μοιάζει με μια «ασπρόμαυρη» φωτογραφία που έχει ληφθεί από το διάστημα.

Η μετρούμενη ποσότητα σε αυτά τα δεδομένα είναι η τιμή φωτεινότητας του κάθε εικονοστοιχείου, η οποία είναι ανάλογη της ψηφιακής του τιμής. Η ψηφιακή τιμή ενός εικονοστοιχείου σχετίζεται με την *ένταση της ανακλώμενης ηλιακής ακτινοβολίας από το έδαφος*, η οποία ανιχνεύεται από τον αισθητήρα. Η ραδιομετρική πληροφορία είναι ο κύριος τύπος πληροφορίας που αξιοποιείται στην ερμηνεία μιας παγχρωματικής απεικόνισης, ενώ δεν υφίσταται η φασματική πληροφορία, αυτή του «χρώματος». Παραδείγματα δορυφορικών συστημάτων με παγχρωματικό αισθητήρα είναι οι LANDSAT, SPOT, IRS-1C, IKONOS, QUICKBIRD, WORLDVIEW-1, WORLDVIEW-2.

Πολυφασματική είναι η εικόνα που συλλαμβάνει δεδομένα εικόνας σε συγκεκριμένες συχνότητες του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Επιτρέπει την άντληση συμπληρωματικών πληροφοριών που το ανθρώπινο μάτι – με τους υποδοχείς του για το κόκκινο, το πράσινο και το μπλε – αδυνατεί να συλλάβει. Ένας πολυφασματικός δέκτης είναι ένας ανιχνευτής με πολλά κανάλια. Κάθε κανάλι είναι ευαίσθητο στην ακτινοβολία, σε μια μικρή ζώνη μήκους κύματος. Το αποτέλεσμα

είναι μια πολυεπίπεδη εικόνα με φασματική πληροφορία και πληροφορία φωτεινότητας. Κάθε επίπεδο αναπαριστά μια εικόνα σε μια συγκεκριμένη ζώνη μήκους κύματος.

Οι ακριβείς τιμές των μηκών κύματος εξαρτώνται από τα μέσα του εκάστοτε δορυφόρου. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται κατά προσέγγιση οι τιμές τους και οι εφαρμογές στις οποίες χρησιμοποιούνται.

ΚΑΝΑΛΙ	ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ
μπλε	450-520nm	χαρτογράφηση παράκτιων περιοχών, δασικών περιοχών, ανθρωπογενών κατασκευών, διάκριση διαφόρων ειδών φυτοκάλυψης, ατμοσφαιρική απεικόνιση και απεικόνιση νερού (έως 46 m καθαρού νερού)
πράσινο	515-600nm	διάκριση διαφόρων ειδών βλάστησης και ανθρωπογενών κατασκευών, απεικόνιση νερού (έως 27 m καθαρού νερού)
κόκκινο	600-690nm	διάκριση διαφόρων ειδών φυτών και ανθρωπογενών κατασκευών, απεικόνιση εδάφους, βλάστησης, νερού (έως 9,1 m καθαρού νερού)
εγγύς υπέρυθρο	750-900nm	προσδιορισμός ειδών βλάστησης, βιομάζας, διάκριση υδάτινων επιφανειών, χαρτογράφηση υγρασίας εδάφους
μέσο υπέρυθρο	1550-1750nm	προσδιορισμός υγρασίας του εδάφους και της βλάστησης, ορισμένες δασικές πυρκαγιές, διάκριση νεφών από επιφάνειες με χιόνια
μέσο υπέρυθρο	2080-2350nm	προσδιορισμός υγρασίας βλάστησης, γεωλογικά χαρακτηριστικά, πυρκαγιές, διάκριση ορυκτών και πετρωμάτων
θερμικό υπέρυθρο	10400-12500nm	εφαρμογές θερμικής χαρτογράφησης, διάκριση διαφορών στην περιεχόμενη υγρασία του εδάφους, εντοπισμός ασθενειών βλάστησης, απεικόνιση γεωλογικών δομών και πυρκαγιών

Πίνακας 2.1: Φασματικά κανάλια και εφαρμογές τους .

Για παράδειγμα, ο πολυφασματικός δέκτης SPOT HRV ανιχνεύει ακτινοβολίες σε τρία κανάλια: πράσινο (500-590 nm), κόκκινο (610-680 nm) και εγγύς υπέρυθρο (790-890 nm). Μια σκηνή αποτελείται από τρεις εικόνες φωτεινότητας σε τρία κανάλια, όπου κάθε εικονοστοιχείο έχει τρεις τιμές φωτεινότητας που αντιστοιχούν σε τρία κανάλια. Μία πολυφασματική εικόνα IKONOS αποτελείται από τέσσερα κανάλια: μπλε, πράσινο, κόκκινο και εγγύς υπέρυθρο, ενώ μια LANDSAT TM από επτά: μπλε, πράσινο, κόκκινο, εγγύς υπέρυθρο, μέσο υπέρυθρο (δύο) και θερμικό υπέρυθρο.

Ανάλογα με την εφαρμογή και το σκοπό της, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφοροι συνδυασμοί καναλιών, τα οποία «εκπροσωπούνται» στην εικόνα από το κόκκινο, το πράσινο και το μπλε. Έτσι μπορούν να δημιουργηθούν ψευδέγχρωμα σύνθετα ή και φυσικά έγχρωμα σύνθετα. Για παράδειγμα, συχνά το εγγύς υπέρυθρο εμφανίζεται ως κόκκινο κι επομένως οι περιοχές που καλύπτονται από βλάστηση φαίνονται κόκκινες, διευκολύνοντας τη φωτοερμηνεία. Παραδείγματα δορυφορικών συστημάτων με πολυφασματικούς δέκτες είναι οι LANDSAT, SPOT, IRS-1C, IKONOS, QUICKBIRD, ASTER, WORLDVIEW-2.

Στη συνέχεια παρατίθενται γνωστά δορυφορικά συστήματα υψηλής διακριτικής ικανότητας και τα χαρακτηριστικά τους. Τα συστήματα αυτά έχουν το σαφές πλεονέκτημα της υψηλότερης ανάλυσης που τα καθιστά καταλληλότερα για πληθώρα εφαρμογών ακριβείας, ειδικά στο πεδίο της Επεξεργασίας Εικόνας. Στο

προηγούμενο κεφάλαιο καταγράφηκε ότι χρησιμοποιούνται περίπου όσο και τα δεδομένα μεσαίας διακριτικής ικανότητας, παρόλο που τα τελευταία είναι πιο οικονομικά. Ως εκ τούτου, παρατίθενται και όλα τα οικονομικά στοιχεία που αφορούν στην αγορά δεδομένων υψηλής ανάλυσης.

2.1.1 Δορυφορικά συστήματα απεικόνισης πολύ υψηλής ανάλυσης

IKONOS

Ο IKONOS είναι ένας υψηλής ανάλυσης δορυφόρος που διαχειρίζεται η GeoEye. Η ονομασία του δορυφόρου προέρχεται από την ελληνική λέξη *εικόνα*. Εκτοξεύτηκε στις 24 Σεπτεμβρίου 1999 στην περιοχή της Καλιφόρνια των Η. Π. Α. και είναι ο πρώτος εμπορικός δορυφόρος παγκοσμίως που παρέχει εικόνες υψηλής ανάλυσης (έως 1m) της Γης. Για το λόγο αυτό θεωρείται σημαντικός σταθμός στη πορεία της διαστημικής εποχής.

Ο δορυφόρος είναι σχεδιασμένος να παίρνει ψηφιακές λήψεις της Γης από ύψος 680 χιλιομέτρων κινούμενος με ταχύτητα 7 χιλιομέτρων το δευτερόλεπτο, περίπου. Η δορυφορική κάμερα μπορεί να διακρίνει αντικείμενα στην επιφάνεια της Γης μεγέθους 1m και ελάχιστης απόστασης 1m το ένα από το άλλο στο έδαφος (στα παγχρωματικά δεδομένα), αλλά όχι και ανθρώπους. Ο δορυφόρος είναι εξοπλισμένος με GPS δίνοντας έτσι πολύ μεγάλη ακρίβεια θέσης στις δορυφορικές απεικονίσεις.

Έχει μια επαναλαμβανόμενη, κυκλική, σύγχρονη με τον Ήλιο, κοντά στους πόλους τροχιά, εγγυώντας πλήρη κάλυψη της Γης. Επιπλέον, ο αισθητήρας μπορεί να λάβει κλίση με σκοπό την απόκτηση εικόνων σε ύψος έως 700 km και από τα δύο σημεία της τροχιάς (μέγιστη απόκλιση 26°), δίνοντας έτσι στο δορυφόρο τη δυνατότητα να επαναλάβει την επίσκεψη σε οποιαδήποτε περιοχή κάθε 1.5 μέρα, αν και ο αισθητήρας θα έχει διαφορετική κλίση και χωρική ανάλυση (έως 2 m). Για δεδομένα χωρικής ανάλυσης 1 m περιοχής που καλύπτει έως 300 χιλιόμετρα, μπορεί να επιτευχθεί «επανεπίσκεψη» του δορυφόρου σε 2.9 μέρες, κατά μέσο όρο (κλίση αισθητήρα $\pm 10^\circ$).

Οι δυνατότητές του περιλαμβάνουν ταυτόχρονη συλλογή παγχρωματικών δεδομένων ανάλυσης 0.82m και πολυφασματικών 3.2m. Οι πολυφασματικές εικόνες αποτελούνται από τέσσερα κανάλια το μπλε, το κόκκινο, το πράσινο και το εγγύς υπέρυθρο, δίνοντας υψηλή ποιότητα και δυνατότητα πολλαπλών αναλύσεων για κάθε εφαρμογή. Τα πολυφασματικά δεδομένα του IKONOS διατίθενται είτε σε τέσσερα αρχεία (1 ανά κανάλι) είτε σε συνδυασμούς 3 καναλιών σε ένα αρχείο. Μπορούν να συνδυαστούν απεικονίσεις και από τους δύο αισθητήρες δημιουργώντας 1m έγχρωμες απεικονίσεις pan-sharpened οι οποίες συνδυάζουν την ακρίβεια των 1m παγχρωματικών δεδομένων και όλη τη φασματική πληροφορία των 4m πολυφασματικών δεδομένων. Αξίζει να σημειωθεί ότι με αυτή τη διαδικασία, το τελικό προϊόν δεν ενδείκνυται για αυτόματη ταξινόμηση γιατί έχει

αλλάζει η πληροφορία της ανακλώμενης ακτινοβολίας. Ομοίως, τα raw-sharpened δεδομένα διατίθενται είτε σε τέσσερα αρχεία (1 ανά κανάλι) είτε σε συνδυασμούς 3 καναλιών σε ένα αρχείο.

Μέχρι σήμερα, ο IKONOS έχει συλλέξει περισσότερα από 300 εκατομμύρια τετραγωνικά χιλιόμετρα απεικονίσεων σε κάθε ήπειρο. Τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιούνται για λόγους εθνικής ασφάλειας, χαρτογραφήσεις για στρατιωτικούς σκοπούς, ναυτικές και εναέρια μεταφορές και από τις τοπικές κυβερνήσεις. Οι εφαρμογές του περιλαμβάνουν τόσο αστικές όσο και αγροτικές χαρτογραφήσεις των φυσικών πόρων και των φυσικών καταστροφών, ορυχείων, κατασκευών, δασικών και γεωργικών εκτάσεων, καθώς και ανίχνευση αλλαγών. Ακόμη, μπορεί να αποφέρει σχετικά δεδομένα για όλες σχεδόν τις πτυχές μιας περιβαλλοντικής μελέτης και να χρησιμοποιηθεί για εφαρμογές στη βιομηχανία που ασχολείται με το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο. Εικόνες IKONOS έχουν αγοραστεί και για χρήση από τη βιομηχανία του κινηματογράφου αλλά και από τα μέσα μαζικής ενημέρωσης, παρέχοντας εναέρια όψεις και δορυφορικές εικόνες για πολλές περιοχές σε όλο τον κόσμο. Τα υψηλής ακρίβειας δεδομένα που παρέχει καθιστούν αναπόσπαστη τη συμβολή στην εσωτερική ασφάλεια, στην παρακολούθηση παράκτιων περιοχών και διευκολύνει την τρισδιάστατη ανάλυση (3D Terrain analysis).

Οι IKONOS απεικονίσεις είναι κατάλληλες για εφαρμογές που απαιτούν υψηλό επίπεδο ακρίβειας, όπως οι χαρτογραφήσεις, ο αστικός σχεδιασμός, η παρακολούθηση της αγροτικής ανάπτυξης και γενικά των γεωργικών εκτάσεων, η κτηματογράφηση και η διαχείριση πόρων.

ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ IKONOS: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΡΟΧΙΑΣ	
Τύπος	Σύγχρονη με τον Ήλιο
Ημερομηνία εκτόξευσης	24/9/1999
Αναμενόμενη διάρκεια ζωής	> 8.3 χρόνια
Ταχύτητα στην τροχιά	7.5 km/ sec
Ταχύτητα πάνω από το έδαφος	6.8 km/ sec
Υψόμετρο	681 km
Κλίση	98.1 deg.
Περίοδος	98 min.
Διέλευση από τον Ισημερινό	10:30 π.μ. (ώρα Γκρίνουιτς)
Περίοδος επανάληψης τροχιάς	1.5 με 2.9 μέρες στις 40 ^ο γεωγραφικού πλάτους

Πίνακας 2.2: Χαρακτηριστικά της τροχιάς του δορυφορικού συστήματος IKONOS.

ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΙΚΟΝΟΣ: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ	
Πλάτος ζώνης	11 km
Χωρική ανάλυση (στο ναδίρ)	0.82 m (παγχρωματικά), 3.2 m (πολυφασματικά) – για εμπορικούς σκοπούς 1 m και 4 m αντίστοιχα
Δυναμικό εύρος (ραδιομετρική ανάλυση)	11 bits ανά pixel (ή 8 bits/ pixel)
Ακρίβεια θέσης	12 m οριζοντιογραφικά, 10 m υψομετρικά χωρίς σημεία επίγειου ελέγχου (GCP)
Γωνία θέασης	εντοπισμός σε όλη την τροχιά και κατά μήκος της τροχιάς
Χαρακτηριστικά	σκηνή: 13 km x 13 km
	λωρίδες: 11 km x 100 km έως 11 km x 1000 km
	μωσαϊκά: έως 12000 km ²
Εύρος φάσματος	526 – 929 nm (παγχρωματικό κανάλι)
	445 – 516 nm (μπλε κανάλι)
	506 – 595 nm (πράσινο κανάλι)
	632 – 698 nm (κόκκινο κανάλι)
	757 – 853 nm (εγγύς υπέρυθρο κανάλι)

Πίνακας 2.3: Χαρακτηριστικά του αισθητήρα του δορυφορικού συστήματος ΙΚΟΝΟΣ.

Σύμφωνα με την GeoEye ανάλογα με τον τύπο των δεδομένων, το κόστος των δορυφορικών απεικονίσεων ΙΚΟΝΟΣ ποικίλει. Στον πίνακα που ακολουθεί παρατίθενται τα στοιχεία που συλλέχθηκαν για το σκοπό αυτό. Σημειώνεται ότι οι τιμές που δίνονται είναι δολάρια/ km², αφορούν εικόνες της GeoEye και/ ή της e-GEOS, η ελάχιστη παραγγελία είναι 100 km², εκτός από τα δεδομένα Archieve (αρχείου) τα οποία έχουν ως ελάχιστη παραγγελία 49 km² και η μέγιστη νεφοκάλυψη είναι 15%. Επιπλέον χρεώσεις δίνονται εάν ο πελάτης επιθυμεί λιγότερη νεφοκάλυψη. Οι τιμές είναι οι ίδιες και για τα παγχρωματικά και για τα πολυφασματικά δεδομένα.

ΚΟΣΤΟΣ ΑΠΟΚΤΗΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΙΚΟΝΟΣ (1.0 m PAN/ 4.0 m MS) ΑΝΑ ΤΥΠΟ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	
Παγχρωματικά (Geo)	20 \$/km ²
Πολυφασματικά (Geo)	20 \$/km ²
Pan-sharpened (Geo)	20 \$/km ²
Παγχρωματικά γεωμετρικά διορθωμένα (GeoProfessional)	25 \$/km ²
Πολυφασματικά γεωμετρικά διορθωμένα (GeoProfessional)	25 \$/km ²
Pan-sharpened γεωμετρικά διορθωμένα (GeoProfessional)	25 \$/km ²
Παγχρωματικά γεωμετρικά διορθωμένα με επίγεια σημεία ελέγχου (GeoProfessional Precision ²)	35 \$/km ²
Πολυφασματικά γεωμετρικά διορθωμένα με επίγεια σημεία ελέγχου (GeoProfessional Precision ²)	35 \$/km ²
Pan-sharpened γεωμετρικά διορθωμένα με επίγεια σημεία ελέγχου (GeoProfessional Precision ²)	35 \$/km ²
Παγχρωματικά Stereo (GeoStereo)	35 \$/km ²
Πολυφασματικά Stereo (GeoStereo)	35 \$/km ²
Pan-sharpened Stereo (GeoStereo)	35 \$/km ²
Παγχρωματικά Stereo με επίγεια σημεία ελέγχου (GeoStereo Precision ²)	40 \$/km ²
Πολυφασματικά Stereo με επίγεια σημεία ελέγχου (GeoStereo Precision ²)	40 \$/km ²
Pan-sharpened Stereo με επίγεια σημεία ελέγχου (GeoStereo Precision ²)	40 \$/km ²
Παγχρωματικά αρχείου (Archieve, Geo only)	10 \$/km ²
Πολυφασματικά αρχείου (Archieve, Geo only)	10 \$/km ²
Pan-sharpened αρχείου (Archieve, Geo only)	10 \$/km ²

Πίνακας 2.4: Κόστος απόκτησης δεδομένων ΙΚΟΝΟΣ ανά τύπο δεδομένων. Πηγή: Eurimage, Ιούλιος 2010.

Τα προϊόντα Geo είναι ραδιομετρικά διορθωμένα, τα GeoProfessional είναι γεωμετρικά διορθωμένα, τα GeoProfessional Precision² είναι γεωμετρικά διορθωμένα και διαθέτουν και επίγεια σημεία ελέγχου η χρέωση των οποίων σε ορισμένες περιπτώσεις είναι επιπλέον, τα GeoStereo παρέχουν δύο εικόνες με στερεο – γεωμετρία για τρισδιάστατες εφαρμογές, τα GeoStereo Precision² διαθέτουν και επίγεια σημεία ελέγχου η χρέωση των οποίων σε ορισμένες περιπτώσεις είναι επιπλέον και τα Archieve αφορούν μόνο τα Geo δεδομένα και ορίζονται έτσι 90 μέρες έπειτα από τη συλλογή τους.

QUICKBIRD

Ο QUICKBIRD είναι ο τέταρτος πιο υψηλής ανάλυσης παγκοσμίως δορυφόρος (μετά τον WorldView-1, τον WorldView-2 και τον GeoEye-1). Ανήκει στην DigitalGlobe, η οποία και τον λειτουργεί. Εκτοξεύτηκε στις 18 Οκτωβρίου 2001 στην Καλιφόρνια των Η. Π. Α. και είναι σχεδιασμένος να παίρνει ψηφιακές λήψεις της Γης από ύψος 450 χιλιομέτρων κινούμενος με ταχύτητα 7 χιλιομέτρων το δευτερόλεπτο, περίπου.

Σε ένα ενιαίο πέρασμα του δορυφόρου, είναι δυνατή η συλλογή λωρίδων μήκους έως 250 km παρέχοντας παράλληλα το μεγαλύτερο πλάτος ζώνης (16.5 km) και τη μεγαλύτερη χωρητικότητα δεδομένων επί του σκάφους (128 Gbit, περίπου 57 σκηνές). Έτσι, καθίσταται ταχύτατος στη συλλογή δεδομένων μεγάλων περιοχών. Παράλληλα, ο δορυφόρος είναι ικανός να συλλέγει δεδομένα περισσότερα των 75

εκατομμυρίων τετραγωνικών χιλιομέτρων ετησίως συμπληρώνοντας και ανανεώνοντας το αρχείο του με πρωτοφανή ταχύτητα.

Χρησιμοποιώντας έναν υπερσύγχρονο BGIS 2000 αισθητήρα, ο δορυφόρος συλλέγει δεδομένα από 0.61 m χωρική διακριτική ικανότητα, αποτελώντας μια εξαιρετική πηγή περιβαλλοντικών δεδομένων χρήσιμων για αναλύσεις που αφορούν στις χρήσεις γης και στη διαχείριση γεωργικών και δασικών εκτάσεων. Συλλέγει ταυτόχρονα παγχρωματικά δεδομένα στα 0.6 – 0.7 m ανάλυση και πολυφασματικά δεδομένα στα 2.4 – 2.8 m ανάλυση. Με αυτή τη διακριτική ικανότητα λεπτομέρειες όπως κτίρια και άλλες υποδομές είναι εύκολα ορατές. Ωστόσο, είναι ανεπαρκής για την επεξεργασία μικρότερων αντικειμένων, όπως η πινακίδα κυκλοφορίας ενός αυτοκινήτου. Επιπλέον, είναι δυνατή η δημιουργία pan-sharpened δεδομένων διακριτικής ικανότητας 0.6 m σε φυσικά ή υπέρυθρα χρώματα.

Η διακριτική ικανότητα των απεικονίσεων ποικίλει ανάλογα με τη γωνία θέασης του αισθητήρα και τις διορθώσεις που υφίστανται τα δεδομένα πριν τη διάθεσή τους. Για παράδειγμα, στις εικόνες με τη λιγότερη δυνατή επεξεργασία η οποία περιλαμβάνει ραδιομετρική διόρθωση και διορθώσεις δέκτη (Basic Imagery), 30° από το ναδίρ τα παγχρωματικά δεδομένα συλλέγονται με χωρική ανάλυση 0.73 m και τα πολυφασματικά με ανάλυση 2.44 – 2.88 m.

Οι απεικονίσεις QUICKBIRD δίνουν τη δυνατότητα για πολύ υψηλού επιπέδου ταξινομήσεις και αναλύσεις εικόνων, βάσει των διακριτών φασματικών καναλιών και της 11bit/ pixel ραδιομετρικής ανάλυσης. Σε συνδυασμό με τον υψηλό λόγο σήματος προς θόρυβο, το ευρύ οπτικό πεδίο και τη μεγάλη αντίθεση (contrast) στις απεικονίσεις που συλλέγει, παρέχει υψηλής ποιότητας δεδομένα.

Τα παγχρωματικά δεδομένα συλλέγονται στο ορατό και εγγύς υπέρυθρο μέρος του φάσματος, με ραδιομετρική ανάλυση 11bit/ pixel, ωστόσο διανέμονται με 16bit/ pixel για καλύτερη φωτοερμηνεία (π.χ. σκιές) ή σε 8bit/ pixel για τις εφαρμογές χαρτογραφήσεων και GIS. Τα πολυφασματικά δεδομένα τα οποία περιλαμβάνουν τα κανάλια μπλε, πράσινο, κόκκινο και εγγύς υπέρυθρο, διανέμονται με ραδιομετρική ανάλυση 16bit ή 8bit. Συνήθως, οι πολυφασματικές εικόνες χρησιμοποιούνται για ταξινόμηση και ανάλυση εικόνας, ενώ οι παγχρωματικές και οι pan-sharpened για οπτικές αναλύσεις και εφαρμογές χαρτογραφήσεων και GIS (λόγω του GeoTIFF format εικόνας που παρέχεται).

Οι δυνατότητες απεικονίσεων του QUICKBIRD μπορούν να εφαρμοστούν σε μια σειρά από κλάδους, όπως το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο, οι κατασκευές και οι περιβαλλοντικές μελέτες. Είναι σχεδιασμένος ούτως ώστε να συλλέγει εικόνες μεγάλων περιοχών, ακρίβειας υψηλών επιδόσεων. Για το λόγο αυτό τα δεδομένα που συλλέγει είναι κατάλληλα για χαρτογραφήσεις, ανίχνευση αλλαγών και ανάλυση εικόνας. Αντικείμενα επί της γήινης επιφάνειας μεγέθους έως 23 m, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν για χαρτογραφήσεις απομακρυσμένων περιοχών χωρίς τη χρήση επίγειων σημείων ελέγχου. Επιπλέον, σε σχέση με άλλα ανταγωνιστικά προϊόντα, προσφέρει μεγαλύτερο και πιο συχνά ανανεούμενο αρχείο εικόνων.

ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ QUICKBIRD: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΡΟΧΙΑΣ	
Τύπος	Σύγχρονη με τον Ήλιο
Ημερομηνία εκτόξευσης	18/10/2001
Αναμενόμενη διάρκεια ζωής	έως το 2010
Ταχύτητα πάνω από το έδαφος	7.1 km/ sec
Υψόμετρο	450 km
Κλίση	98 deg.
Περίοδος	93.4 min.
Διέλευση από τον Ισημερινό	10:30 π.μ. (ώρα Γκρίνουιτς)
Περίοδος επανάλιψης τροχιάς	1 με 3.5 μέρες ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος

Πίνακας 2.5: Χαρακτηριστικά της τροχιάς του δορυφορικού συστήματος QUICKBIRD.

ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ QUICKBIRD: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ	
Ζώνη οπτικού πεδίου	544 km
Πλάτος ζώνης	16.5 km
Χωρική ανάλυση (στο ναδίρ)	0.61 m (παγχρωματικά), 2.44 m (πολυφασματικά)
Χωρική ανάλυση (30° από το ναδίρ)	0.73 m (παγχρωματικά), 2.88 m (πολυφασματικά)
Δυναμικό εύρος (ραδιομετρική ανάλυση)	11 bits ανά pixel (διανέμονται με 8 ή 16 bits/pixel)
Ακρίβεια μετρήσεων	23 m κυκλικό σφάλμα, 17 m γραμμικό σφάλμα (χωρίς επίγειο έλεγχο)
Γωνία θέασης	εντοπισμός σε όλη την τροχιά και κατά μήκος της τροχιάς
Χαρακτηριστικά	σκηνή: 16.5 km x 16.5 km
	λωρίδες: 16.5 km x 115 km
Εύρος φάσματος	445 – 900 nm (παγχρωματικό κανάλι)
	450 – 520 nm (μπλε κανάλι)
	520 – 600 nm (πράσινο κανάλι)
	630 – 690 nm (κόκκινο κανάλι)
	760 – 900 nm (εγγύς υπέρυθρο κανάλι)

Πίνακας 2.6: Χαρακτηριστικά του αισθητήρα του δορυφορικού συστήματος QUICKBIRD.

Σύμφωνα με την Digital Globe ανάλογα με τον τύπο των δεδομένων, το κόστος των δορυφορικών απεικονίσεων QUICKBIRD ποικίλει. Στον πίνακα που ακολουθεί παρατίθενται τα στοιχεία που συλλέχθηκαν για το σκοπό αυτό.

ΚΟΣΤΟΣ ΑΠΟΚΤΗΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ QUICKBIRD ΑΝΑ ΤΥΠΟ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	
Παγχρωματικά (Basic) – Παραγγελία (Select Tasking)	20 \$/km ²
Παγχρωματικά (Basic) – Ειδική Παραγγελία (Select Plus Tasking)	40 \$/km ²
Παγχρωματικά (Basic) – Ειδική Παραγγελία (Assured Tasking)	60 \$/km ²
Παγχρωματικά (Basic) – Ειδική Παραγγελία (Single Shot Tasking)	80 \$/km ²
Πολυφασματικά (Basic) – Παραγγελία (Select Tasking)	20 \$/km ²
Πολυφασματικά (Basic) – Ειδική Παραγγελία (Select Plus Tasking)	40 \$/km ²
Πολυφασματικά (Basic) – Ειδική Παραγγελία (Assured Tasking)	60 \$/km ²
Πολυφασματικά (Basic) – Ειδική Παραγγελία (Single Shot Tasking)	80 \$/km ²
Παγχρωματικά και Πολυφασματικά (Basic Bundle) – Παραγγελία (Select Tasking)	23 \$/km ²
Παγχρωματικά και Πολυφασματικά (Basic Bundle) – Ειδική Παραγγελία (Select Plus Tasking)	43 \$/km ²
Παγχρωματικά και Πολυφασματικά (Basic Bundle) – Ειδική Παραγγελία (Assured Tasking)	63 \$/km ²
Παγχρωματικά και Πολυφασματικά (Basic Bundle) – Ειδική Παραγγελία (Single Shot Tasking)	83 \$/km ²
Παγχρωματικές Ορθοαπεικονίσεις (Standard Ortho Ready PAN) – Παραγγελία (Select Tasking)	20 \$/km ²
Παγχρωματικές Ορθοαπεικονίσεις (Standard Ortho Ready PAN) – Ειδική Παραγγελία (Select Plus Tasking)	40 \$/km ²
Παγχρωματικές Ορθοαπεικονίσεις (Standard Ortho Ready PAN) – Ειδική Παραγγελία (Assured Tasking)	60 \$/km ²
Πολυφασματικές Ορθοαπεικονίσεις (Standard Ortho Ready MS4 BAND) – Παραγγελία (Select Tasking)	20 \$/km ²
Πολυφασματικές Ορθοαπεικονίσεις (Standard Ortho Ready MS4 BAND) – Ειδική Παραγγελία (Select Plus Tasking)	40 \$/km ²
Πολυφασματικές Ορθοαπεικονίσεις (Standard Ortho Ready MS4 BAND) – Ειδική Παραγγελία (Assured Tasking)	60 \$/km ²
Pan-sharpened Ορθοαπεικονίσεις (Standard Ortho Ready PS ₃) – Παραγγελία (Select Tasking)	20 \$/km ²
Pan-sharpened Ορθοαπεικονίσεις (Standard Ortho Ready PS ₃) – Ειδική Παραγγελία (Select Plus Tasking)	40 \$/km ²
Pan-sharpened Ορθοαπεικονίσεις (Standard Ortho Ready PS ₃) – Ειδική Παραγγελία (Assured Tasking)	60 \$/km ²
Παγχρωματικές και Πολυφασματικές Ορθοαπεικονίσεις (Standard Ortho Ready Bundle/ PS ₄) – Παραγγελία (Select Tasking)	23 \$/km ²
Παγχρωματικές και Πολυφασματικές Ορθοαπεικονίσεις (Standard Ortho Ready Bundle/ PS ₄) – Ειδική Παραγγελία (Select Plus Tasking)	43 \$/km ²
Παγχρωματικές και Πολυφασματικές Ορθοαπεικονίσεις (Standard Ortho Ready Bundle/ PS ₄) – Ειδική Παραγγελία (Assured Tasking)	63 \$/km ²
Παγχρωματικά (Basic) – Αρχείου (Image Library)	14 \$/km ²
Παγχρωματικά (Basic) – Ετοιμοπαράδοτα αρχείου (Rush Image Library)	24 \$/km ²
Πολυφασματικά (Basic) – Αρχείου (Image Library)	14 \$/km ²
Πολυφασματικά (Basic) – Ετοιμοπαράδοτα αρχείου (Rush Image Library)	24 \$/km ²
Παγχρωματικά και Πολυφασματικά (Basic Bundle) – Αρχείου (Image Library)	17 \$/km ²
Παγχρωματικά και Πολυφασματικά (Basic Bundle) – Ετοιμοπαράδοτα αρχείου (Rush Image Library)	27 \$/km ²
Παγχρωματικές Ορθοαπεικονίσεις (Standard Ortho PAN) – Αρχείου (Image Library)	14 \$/km ²
Παγχρωματικές Ορθοαπεικονίσεις (Standard Ortho PAN) – Ετοιμοπαράδοτα αρχείου (Rush Image Library)	24 \$/km ²
Πολυφασματικές Ορθοαπεικονίσεις (Standard Ortho Ready MS ₄ BAND) – Αρχείου (Image Library)	14 \$/km ²
Πολυφασματικές Ορθοαπεικονίσεις (Standard Ortho Ready MS ₄ BAND) – Ετοιμοπαράδοτα αρχείου (Rush Image Library)	24 \$/km ²
Pan-sharpened Ορθοαπεικονίσεις (Standard Ortho Ready PS ₃) – Αρχείου (Image Library)	14 \$/km ²

Pan-sharpened Ορθοαπεικονίσεις (Standard Ortho Ready PS ₃) – Ετοιμοπαράδοτα αρχείου (Rush Image Library)	24 \$/km ²
Παγχρωματικές και Πολυφασματικές Ορθοαπεικονίσεις (Standard Ortho Ready Bundle/ PS ₄) – Αρχείου (Image Library)	17 \$/km ²
Παγχρωματικές και Πολυφασματικές Ορθοαπεικονίσεις (Standard Ortho Ready Bundle/ PS ₄) – Ετοιμοπαράδοτα αρχείου (Rush Image Library)	27 \$/km ²

Πίνακας 2.7: Κόστος απόκτησης δεδομένων QUICKBIRD ανά τύπο δεδομένων. Πηγή: Eurimage, Ιούλιος 2010.

Όπως φαίνεται και στον πίνακα, οι τιμές που δίνονται είναι δολάρια/ km². Τα προϊόντα Basic είναι ραδιομετρικά διορθωμένα, αφορούν σε σκηνή 272 km² στο ναδίρ και το πολύγωνο παραγγελίας πρέπει να είναι τετράγωνο ή ορθογώνιο παραλληλόγραμμο με ελάχιστο πλάτος 12 km. Γι' αυτά τα προϊόντα η ελάχιστη παραγγελία είναι 1 σκηνή. Η επιλογή Bundle περιλαμβάνει και το παγχρωματικό και τα πολυφασματικά κανάλια. Οι επιλογές Image Library και Rush Image Library αφορούν σε απεικονίσεις αρχείου με τη διαφορά ότι οι Rush Image Library μπορούν από τη στιγμή της παραγγελίας σε 1 (για τα παγχρωματικά και τα πολυφασματικά δεδομένα) ή 2 ημέρες (για τα pan-sharpened) να παραδοθούν στον πελάτη. Οι επιλογές Tasking αφορούν σε ειδικές παραγγελίες και έχουν μέγιστη νεφοκάλυψη 15%. Τα προϊόντα Standard Ortho Ready είναι ραδιομετρικά και γεωμετρικά διορθωμένα και η ελάχιστη παραγγελία είναι 25 km² για τα προϊόντα αρχείου. Για τις επιλογές Tasking υπάρχει περιορισμός τιμής, 1800 δολάρια για τις Select Tasking, 4250 δολάρια για τις Select Plus Tasking και 10000 δολάρια οι Assured και Single Shot Tasking.

GEOEYE-1

Στις 6 Σεπτεμβρίου 2008, η εταιρία GeoEye εκτόξευσε το δορυφόρο GeoEye – 1, το μεγαλύτερης ανάλυσης παγκοσμίως εμπορικό δορυφορικό σύστημα απεικονίσεων. Είναι εξοπλισμένος με την πιο προηγμένη τεχνολογία που έχει χρησιμοποιηθεί ποτέ σε εμπορικό σύστημα τηλεπισκόπησης.

Βρίσκεται σε τροχιά σύγχρονη με τον ήλιο, περιόδου 98 λεπτών και κάθε μέρα ολοκληρώνει περίπου 15 τροχιές, με τροχιακή ταχύτητα περίπου 7.5 χιλιομέτρων το δευτερόλεπτο. Η σχετικά υψηλή του τροχιά, στα 681 km πάνω από τη γήινη επιφάνεια, του δίνει το πλεονέκτημα περισσότερου χρόνου πρόσβασης σε μια συγκεκριμένη περιοχή ενδιαφέροντος, με αποτέλεσμα τη δυνατότητα συλλογής περισσότερων δεδομένων. Παράλληλα, η μοναδική ευκινησία του δορυφόρου, του δίνει τη δυνατότητα σε ένα πέρασμα να συλλέγει ζεύγη δεδομένων από μεγάλες περιοχές – ίδιου φωτισμού και περιβαλλοντικών συνθηκών – για στερεοαποδόσεις, χρήσιμες για εξαγωγή τρισδιάστατων χαρακτηριστικών και ψηφιακών μοντέλων εδάφους.

Ο δορυφόρος συλλέγει πάνω από 700.000 τετραγωνικά χιλιόμετρα παγχρωματικών και πάνω από 350.000 τετραγωνικά χιλιόμετρα πολυφασματικών εικόνων, ημερησίως. Η δυνατότητά του αυτή είναι ιδανική για χαρτογραφήσεις περιοχών

μεγάλης κλίμακας, καθιστώντας τον αισθητήρα του δορυφόρου βέλτιστο για μεγάλα έργα. Μπορεί να επαναλάβει την επίσκεψη σε οποιοδήποτε σημείο της Γης κάθε 3 ημέρες ή και νωρίτερα (ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος και τη γωνία θέασης του αισθητήρα). Με πλάτος λωρίδας στα 15.2 km, μπορεί να συλλέγει δεδομένα σε οποιαδήποτε γωνία θέασης του αισθητήρα.

Προσφέρει μια πρωτοφανή διακριτική ικανότητα συλλέγοντας ταυτόχρονα παγχρωματικά δεδομένα στα 0.41 m και πολυφασματικά στα 1.65 m (στο ναδίρ). Ωστόσο, τα παγχρωματικά δεδομένα διατίθενται για εμπορικούς σκοπούς με 0.50 m χωρική διακριτική ικανότητα και τα πολυφασματικά με 2 m, εφόσον η αμερικάνικη κυβέρνηση δεν παρέχει για εμπορικούς σκοπούς απεικονίσεις ανάλυσης μικρότερης του μισού μέτρου. Επιπλέον, ο GeoEye – 1 παρέχει και rap-sharpened προϊόντα. Οι παγχρωματικές εικόνες συλλέγονται στο ορατό και εγγύς υπέρυθρο μέρος του φάσματος, ενώ τα πολυφασματικά δεδομένα περιλαμβάνουν τα κανάλια μπλε, πράσινο, κόκκινο και εγγύς υπέρυθρο.

Η ραδιομετρική ανάλυση των απεικονίσεων είναι είτε 8 είτε 11 bits ανά pixel. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο δορυφόρος συλλέγει παγχρωματικά δεδομένα 40% πιο γρήγορα από τον IKONOS και πολυφασματικά 25% πιο γρήγορα. Μαζί οι δύο δορυφόροι της GeoEye συλλέγουν περίπου ένα εκατομμύριο τετραγωνικά χιλιόμετρα εικόνων την ημέρα.

Η λεπτομέρεια και η χωρική ακρίβεια των δεδομένων που συλλέγει ο δορυφόρος, διευρύνουν το πεδίο των εφαρμογών εν γένει των δορυφορικών απεικονίσεων. Εξίσου σημαντική όμως είναι και η δυνατότητα εντοπισμού ενός αντικειμένου – φυσικού ή ανθρωπογενούς κατασκευής- σε λιγότερα από 5 μέτρα από τη φυσική του θέση, χωρίς επίγεια σημεία ελέγχου. Αυτός ο βαθμός χωρικής ακρίβειας δεν έχει επιτευχθεί σε κανένα εμπορικό σύστημα απεικονίσεων και θα παραμείνει αναμφισβήτητος ακόμα και όταν εκτοξευθούν οι επόμενης γενιάς δορυφόροι.

Οι απεικονίσεις του GeoEye – 1 εξυπηρετούν μια ποικιλία εφαρμογών όπως η εθνική ασφάλεια και άμυνα, εναέριας και θαλάσσιας μεταφορές, πετρέλαιο και φυσικό αέριο, μεταλλευτική βιομηχανία, ενέργεια, γεωργία, διαχείριση φυσικών πόρων, διαχείριση περιβάλλοντος και χαρτογραφήσεις. Η χωρική ανάλυση, η ακρίβεια θέσης και η κάλυψη μεγάλων περιοχών είναι τα 3 μεγάλα πλεονεκτήματα του δορυφόρου, καθιστώντας τον ιδανικό για χαρτογραφήσεις μεγάλων περιοχών αλλά και αυτών που απαιτούν μεγάλο επίπεδο ακρίβειας.

ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ GEOEYE-1: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΡΟΧΙΑΣ	
Τύπος	Σύγχρονη με τον Ήλιο
Ημερομηνία εκτόξευσης	6/9/2008
Αναμενόμενη διάρκεια ζωής	>10 χρόνια
Ταχύτητα στην τροχιά	7.5 km/ sec
Υψόμετρο	681 km
Κλίση	98 deg.
Περίοδος	98 min.
Διέλευση από τον Ισημερινό	10:30 π.μ. (ώρα Γκρίνουιτς)
Περίοδος επανάληψης τροχιάς	<3 μέρες ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος και τη γωνία θέασης

Πίνακας 2.8: Χαρακτηριστικά της τροχιάς του δορυφορικού συστήματος GEOEYE -1.

ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ GEOEYE-1: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ	
Πλάτος ζώνης	15.2 km
Χωρική ανάλυση (στο ναδίρ)	0.41 m (παγχρωματικά), 1.65 m (πολυφασματικά) – για εμπορικούς σκοπούς 0.50 m και 2 m αντίστοιχα
Δυναμικό εύρος (ραδιομετρική ανάλυση)	11 bits ανά pixel (ή 8 bits/ pixel)
Ακρίβεια θέσης	5 m οριζοντιογραφικά (4 m για τις στερεοαποδόσεις), 6 m υψομετρικά χωρίς σημεία επίγειου ελέγχου (GCP)
Γωνία θέασης	εντοπισμός σε οποιαδήποτε διεύθυνση
Χαρακτηριστικά	σκηνή: 15 km x 15 km
Εύρος φάσματος	450 – 800 nm (παγχρωματικό κανάλι)
	450 – 510 nm (μπλε κανάλι)
	510 – 580 nm (πράσινο κανάλι)
	655 – 690 nm (κόκκινο κανάλι)
	780 – 920 nm (εγγύς υπέρυθρο κανάλι)

Πίνακας 2.9: Χαρακτηριστικά του αισθητήρα του δορυφορικού συστήματος GEOEYE -1.

Σύμφωνα με την GeoEye ανάλογα με τον τύπο των δεδομένων, το κόστος των δορυφορικών απεικονίσεων GeoEye – 1 ποικίλει. Στον πίνακα που ακολουθεί παρατίθενται τα στοιχεία που συλλέχθηκαν για το σκοπό αυτό. Σημειώνεται ότι οι τιμές που δίνονται είναι δολάρια/ km², αφορούν εικόνες της GeoEye και/ ή της e-GEOs, η ελάχιστη παραγγελία είναι 100 km², εκτός από τα δεδομένα Archieve (αρχείου) τα οποία έχουν ως ελάχιστη παραγγελία 49 km² και η μέγιστη νεφοκάλυψη είναι 15%. Επιπλέον χρεώσεις δίνονται εάν ο πελάτης επιθυμεί λιγότερη νεφοκάλυψη. Οι τιμές είναι οι ίδιες και για τα παγχρωματικά και για τα πολυφασματικά δεδομένα.

ΚΟΣΤΟΣ ΑΠΟΚΤΗΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ GEOEYE-1 (0.5 m PAN/ 2.0 m MS) ΑΝΑ ΤΥΠΟ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	
Παγχρωματικά (Geo)	25 \$/km ²
Πολυφασματικά (Geo)	25 \$/km ²
Pan-sharpened (Geo)	25 \$/km ²
Παγχρωματικά γεωμετρικά διορθωμένα (GeoProfessional)	35 \$/km ²
Πολυφασματικά γεωμετρικά διορθωμένα (GeoProfessional)	35 \$/km ²
Pan-sharpened γεωμετρικά διορθωμένα (GeoProfessional)	35 \$/km ²
Παγχρωματικά γεωμετρικά διορθωμένα με επίγεια σημεία ελέγχου (GeoProfessional Precision ²)	40 \$/km ²
Πολυφασματικά γεωμετρικά διορθωμένα με επίγεια σημεία ελέγχου (GeoProfessional Precision ²)	40 \$/km ²
Pan-sharpened γεωμετρικά διορθωμένα με επίγεια σημεία ελέγχου (GeoProfessional Precision ²)	40 \$/km ²
Παγχρωματικά Stereo (GeoStereo)	40 \$/km ²
Πολυφασματικά Stereo (GeoStereo)	40 \$/km ²
Pan-sharpened Stereo (GeoStereo)	40 \$/km ²
Παγχρωματικά Stereo με επίγεια σημεία ελέγχου (GeoStereo Precision ²)	50 \$/km ²
Πολυφασματικά Stereo με επίγεια σημεία ελέγχου (GeoStereo Precision ²)	50 \$/km ²
Pan-sharpened Stereo με επίγεια σημεία ελέγχου (GeoStereo Precision ²)	50 \$/km ²
Παγχρωματικά αρχείου (Archive, Geo only)	12.5 \$/km ²
Πολυφασματικά αρχείου (Archive, Geo only)	12.5 \$/km ²
Pan-sharpened αρχείου (Archive, Geo only)	12.5 \$/km ²

Πίνακας 2.10: Κόστος απόκτησης δεδομένων GEOEYE-1 ανά τύπο δεδομένων. Πηγή: Eurimage, Ιούλιος 2010.

Τα προϊόντα Geo είναι ραδιομετρικά διορθωμένα, τα GeoProfessional είναι γεωμετρικά διορθωμένα, τα GeoProfessional Precision² είναι γεωμετρικά διορθωμένα και διαθέτουν και επίγεια σημεία ελέγχου η χρέωση των οποίων σε ορισμένες περιπτώσεις είναι επιπλέον, τα GeoStereo παρέχουν δύο εικόνες με στερεο – γεωμετρία για τρισδιάστατες εφαρμογές, τα GeoStereo Precision² διαθέτουν και επίγεια σημεία ελέγχου η χρέωση των οποίων σε ορισμένες περιπτώσεις είναι επιπλέον και τα Archive αφορούν μόνο τα Geo δεδομένα και ορίζονται έτσι 90 μέρες έπειτα από τη συλλογή τους.

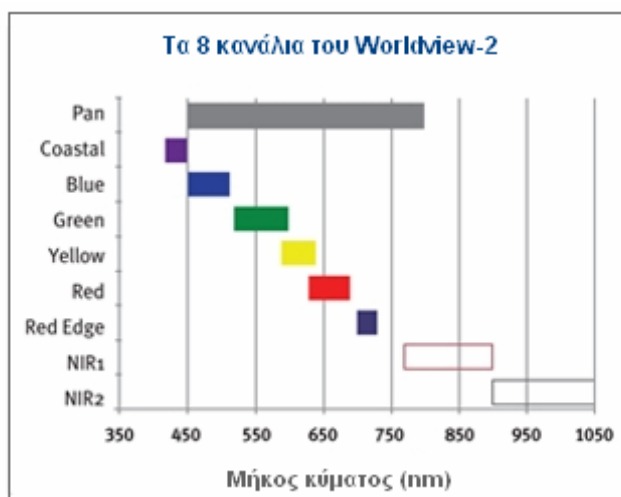
WORLDVIEW-2

Ο Worldview – 2, ο οποίος εκτοξεύτηκε με επιτυχία στις 8 Οκτωβρίου 2009 στην Καλιφόρνια των Η. Π. Α., είναι ο πρώτος εμπορικός πολυφασματικός δορυφόρος υψηλής ανάλυσης με 8 κανάλια, εκτός από παγχρωματικό που διαθέτει. Ο δορυφόρος, τον οποίο διαχειρίζεται η Digital Globe, λειτουργεί σε υψόμετρο 770 χιλιομέτρων συλλέγοντας παγχρωματικές εικόνες διακριτικής ικανότητας 0.46 m και πολυφασματικές ανάλυσης 1.84 m, οι οποίες διατίθενται με 0.5 m και 2 m διακριτική ικανότητα αντίστοιχα. Βρίσκεται σε τροχιά σύγχρονη με τον ήλιο, περιόδου 100 λεπτών και διαθέτει πλάτος λωρίδας 16.4 km (στο ναδίρ), δεύτερη μετά τον Quickbird (16.5 km).

Χάρη στην προηγμένη τεχνολογία του, διαθέτει μεγαλύτερη ευελιξία σε σχέση με άλλους δορυφόρους καλύπτοντας μια έκταση 300 km από 60 δευτερόλεπτα – και παραπάνω – σε μόλις 9. Αυτό σημαίνει ότι ο δορυφόρος μπορεί να κινείται ταχύτατα από τον ένα στόχο στον άλλο, επιτρέποντας τη λήψη πολλών πολυφασματικών απεικονίσεων, πολλών στόχων, σε ένα ενιαίο πέρασμα. Σε συνδυασμό με το υψηλό υψόμετρο της τροχιάς του, μπορεί να «ξαναεπισκεφτεί» οποιοδήποτε σημείο της Γης σε 1.1 μέρα, ενισχύοντας τις εφαρμογές ανίχνευσης αλλαγών και τις ενημερώσεις χαρτών ακριβείας. Είναι ικανός να συλλέγει έως 975.000 τετραγωνικά χιλιόμετρα δεδομένων ημερησίως. Παράλληλα εξασφαλίζει υψηλή ακρίβεια θέσης, χάρη στην πλατφόρμα, τους αισθητήρες και το GPS που διαθέτει, καθιστώντας δυνατή τη δημιουργία χαρτών απομακρυσμένων περιοχών με μεγάλη ακρίβεια (2 m με επίγεια σημεία ελέγχου και 6.5 m χωρίς επίγεια σημεία ελέγχου).

Τα δεδομένα που συλλέγει ο Worldview – 2 έχουν υψηλό λόγο σήματος προς θόρυβο, υψηλή αντίθεση (contrast), ενώ η ραδιομετρική τους ανάλυση είναι στα 11 bits ανά pixel, διευρύνοντας το πεδίο των κατάλληλων προς απεικόνιση στόχων και ενισχύοντας τη φωτοερμηνεία. Ο δορυφόρος παρέχει ένα υψηλής ανάλυσης παγχρωματικό κανάλι, χρήσιμο για χαρτογραφήσεις, ανίχνευση αλλαγών και ανάλυση εικόνας. Μαζί με τα τέσσερα τυπικά πολυφασματικά κανάλια, το μπλε, το πράσινο, το κόκκινο και το εγγύς υπέρυθρο, ο Worldview – 2 εισάγει τα επόμενα τέσσερα κανάλια για ενισχυμένη πολυφασματική ανάλυση και πληθώρα μοναδικών εφαρμογών.

Το κανάλι για τις παράκτιες ζώνες (Coastal Band, 400 – 450 nm) υποστηρίζει την αναγνώριση της βλάστησης, και βαθυμετρικές μελέτες βάσει της ευαισθησίας του δέκτη – σε αυτό το εύρος μήκους κύματος – στη χλωροφύλλη και τη διείσδυση της ακτινοβολίας στο νερό. Επιπλέον, το κανάλι αυτό εξαρτάται από τη σκέδαση της ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα και θα χρησιμοποιηθεί για να ερευνηθούν τεχνικές διορθώσεων λόγω ατμόσφαιρας. Το κίτρινο κανάλι (Yellow Band, 585 – 625 nm) είναι σημαντικό σε εφαρμογές βλάστησης. Επίσης, χρησιμοποιείται για να αναγνωριστεί το ποσοστό κίτρινου χρώματος («κιτρινίλα») σε χαρακτηριστικά των στόχων και βοηθάει στην απόδοση των «πραγματικών» αποχρώσεων για την αναπαράσταση της ανθρώπινης όρασης. Το Red Edge κανάλι (705 – 745 nm) βοηθά σε αναλύσεις που αφορούν στην κατάσταση της βλάστησης. Σχετίζεται άμεσα με την υγεία των φυτών η οποία διαφαίνεται από την παραγωγή χλωροφύλλης. Το εγγύς υπέρυθρο 2 (Near Infrared 2 Band, 860 – 1040 nm) είναι όμοιο με το τυπικό εγγύς υπέρυθρο, ωστόσο δεν επηρεάζεται από την επίδραση της ατμόσφαιρας. Υποστηρίζει αναλύσεις βλάστησης και μελέτες βιομάζας. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται τα 8 κανάλια του δορυφόρου με τα αντίστοιχα μήκη κύματος.



Σχήμα 2.2: Τα 8 κανάλια του Worldview-2 και τα αντίστοιχα μήκη κύματος.

Το δορυφορικό σύστημα του Worldview – 2 με την ακρίβεια, τη βελτιωμένη ευελιξία, τη μεγάλη χωρητικότητα δεδομένων επί του σκάφους (2199 Gbits) και τη φασματική ποικιλομορφία που διαθέτει, καθίσταται πολύ ανταγωνιστικό απέναντι στους υπόλοιπους υψηλής διακριτικής ικανότητας εμπορικούς δορυφόρους. Οι έγχρωμες απεικονίσεις του ενδείκνυνται για βελτιωμένη φασματική ανάλυση, ακριβή χαρτογράφηση και παρακολούθηση εφαρμογών, σχεδιασμό των χρήσεων γης, την εθνική άμυνα, τις εξερευνήσεις, τα περιβάλλοντα προσομοίωσης και την ανίχνευση αλλαγών με ακρίβεια.

ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ WORLDVIEW-2: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΡΟΧΙΑΣ	
Τύπος	Σύγχρονη με τον Ήλιο
Ημερομηνία εκτόξευσης	8/10/2009
Αναμενόμενη διάρκεια ζωής	7.25 χρόνια
Ταχύτητα πάνω από το έδαφος	7.56 km/ sec
Υψόμετρο	770 km
Περίοδος	100 min.
Διέλευση από τον Ισημερινό	10:30 π.μ. (ώρα Γκρίνουιτς)
Περίοδος επανάληψης τροχιάς	1.1 με 3.7 μέρες ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος

Πίνακας 2.11: Χαρακτηριστικά της τροχιάς του δορυφορικού συστήματος WORLDVIEW -2.

ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ WORLDVIEW-2: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ	
Πλάτος ζώνης	16.4 km (στο ναδίρ)
Χωρική ανάλυση (στο ναδίρ)	0.46 m (παγχρωματικά), 1.84 m (πολυφασματικά)
Χωρική ανάλυση (20° από το ναδίρ)	0.52 m (παγχρωματικά), 2.08 m (πολυφασματικά)
Δυναμικό εύρος (ραδιομετρική ανάλυση)	11 bits ανά pixel
Ακρίβεια μετρήσεων	6.5 m χωρίς επίγεια σημεία ελέγχου, 2 m με επίγεια σημεία ελέγχου
Μέγιστη γωνία θέασης	(+/-) 45° από το ναδίρ με πλάτος ζώνης 1355 km
Μέγιστη συνεχόμενη συλλεγόμενη περιοχή σε ένα πέρασμα	65.6 km x 110 km (mono)
	48 km x 110 km (stereo)
Εύρος φάσματος	450 – 800 nm (παγχρωματικό κανάλι)
	450 – 510 nm (μπλε κανάλι)
	510 – 580 nm (πράσινο κανάλι)
	630 – 690 nm (κόκκινο κανάλι)
	770 – 895 nm (εγγύς υπέρυθρο 1 κανάλι)
	400 – 450 nm (κανάλι παράκτιας ζώνης)
	585 – 625 nm (κίτρινο κανάλι)
	705 – 745 nm (κανάλι red edge)
	860 – 1040 nm (εγγύς υπέρυθρο 2 κανάλι)

Πίνακας 2.12: Χαρακτηριστικά του αισθητήρα του δορυφορικού συστήματος WORLDVIEW-2

Σύμφωνα με την DigitalGlobe ανάλογα με τον τύπο των δεδομένων, το κόστος των δορυφορικών απεικονίσεων WORLDVIEW-2 ποικίλει. Στον πίνακα που ακολουθεί παρατίθενται τα στοιχεία που συλλέχθηκαν για το σκοπό αυτό.

ΚΟΣΤΟΣ ΑΠΟΚΤΗΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ WORLDVIEW-2 ΑΝΑ ΤΥΠΟ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	
Παγχρωματικά (Basic) – Παραγγελία (Select Tasking)	24,3 \$/km ²
Παγχρωματικά (Basic) – Ειδική Παραγγελία (Select Plus Tasking)	48,6 \$/km ²
Πολυφασματικά (Basic) – Παραγγελία (Select Tasking)	42,5 \$/km ²
Πολυφασματικά (Basic) – Ειδική Παραγγελία (Select Plus Tasking)	66,8 \$/km ²
Παγχρωματικά και Πολυφασματικά (Basic Bundle) – Παραγγελία (Select Tasking)	46,1 \$/km ²
Παγχρωματικά και Πολυφασματικά (Basic Bundle) – Ειδική Παραγγελία (Select Plus Tasking)	70,4 \$/km ²
Παγχρωματικές Ορθοαπεικονίσεις (Standard Ortho Ready PAN) – Παραγγελία (Select Tasking)	20 \$/km ²
Παγχρωματικές Ορθοαπεικονίσεις (Standard Ortho Ready PAN) – Ειδική Παραγγελία (Select Plus Tasking)	40 \$/km ²
Πολυφασματικές Ορθοαπεικονίσεις (Standard Ortho Ready MS _{8 BAND}) – Παραγγελία (Select Tasking)	35 \$/km ²
Πολυφασματικές Ορθοαπεικονίσεις (Standard Ortho Ready MS _{8 BAND}) – Ειδική Παραγγελία (Select Plus Tasking)	55 \$/km ²
Pan-sharpened Ορθοαπεικονίσεις (Standard Ortho Ready PS ₃) – Παραγγελία (Select Tasking)	20 \$/km ²
Pan-sharpened Ορθοαπεικονίσεις (Standard Ortho Ready PS ₃) – Ειδική Παραγγελία (Select Plus Tasking)	40 \$/km ²
Pan-sharpened Ορθοαπεικονίσεις (Standard Ortho Ready PS ₄) – Παραγγελία (Select Tasking)	23 \$/km ²
Pan-sharpened Ορθοαπεικονίσεις (Standard Ortho Ready PS ₄) – Ειδική Παραγγελία (Select Plus Tasking)	43 \$/km ²
Παγχρωματικές και Πολυφασματικές Ορθοαπεικονίσεις (Standard Ortho Ready Bundle MS _{8 BANDS}) – Παραγγελία (Select Tasking)	38 \$/km ²
Παγχρωματικές και Πολυφασματικές Ορθοαπεικονίσεις (Standard Ortho Ready Bundle MS _{8 BANDS}) – Ειδική Παραγγελία (Select Plus Tasking)	58 \$/km ²

Παγχρωματικές Stereo (Basic Stereo PAN) – Παραγγελία (Select Tasking)	40 \$/km ²
Πολυφασματικές Stereo (Basic Stereo MS) – Παραγγελία (Select Tasking)	46 \$/km ²
Παγχρωματικές και Πολυφασματικές Stereo (Basic Stereo Bundle) – Παραγγελία (Select Tasking)	49 \$/km ²
Παγχρωματικά (Basic) – Αρχείου (Image Library)	17 \$/km ²
Παγχρωματικά (Basic) – Ετοιμοπαράδοτα αρχείου (Rush Image Library)	29,1 \$/km ²
Πολυφασματικά (Basic) – Αρχείου (Image Library)	35,2 \$/km ²
Πολυφασματικά (Basic) – Ετοιμοπαράδοτα αρχείου (Rush Image Library)	47,3 \$/km ²
Παγχρωματικά και Πολυφασματικά (Basic Bundle) – Αρχείου (Image Library)	38,9 \$/km ²
Παγχρωματικά και Πολυφασματικά (Basic Bundle) – Ετοιμοπαράδοτα αρχείου (Rush Image Library)	51 \$/km ²
Παγχρωματικές Ορθοαπεικονίσεις (Standard Ortho Ready PAN) – Αρχείου (Image Library)	14 \$/km ²
Παγχρωματικές Ορθοαπεικονίσεις (Standard Ortho Ready PAN) – Ετοιμοπαράδοτα αρχείου (Rush Image Library)	24 \$/km ²
Πολυφασματικές Ορθοαπεικονίσεις (Standard Ortho Ready MS _{8 BAND}) – Αρχείου (Image Library)	29 \$/km ²
Πολυφασματικές Ορθοαπεικονίσεις (Standard Ortho Ready MS _{8 BAND}) – Ετοιμοπαράδοτα αρχείου (Rush Image Library)	39 \$/km ²
Pan-sharpened Ορθοαπεικονίσεις (Standard Ortho Ready PS ₃) – Αρχείου (Image Library)	14 \$/km ²
Pan-sharpened Ορθοαπεικονίσεις (Standard Ortho Ready PS ₃) – Ετοιμοπαράδοτα αρχείου (Rush Image Library)	24 \$/km ²
Pan-sharpened Ορθοαπεικονίσεις (Standard Ortho Ready PS ₄) – Αρχείου (Image Library)	17 \$/km ²
Pan-sharpened Ορθοαπεικονίσεις (Standard Ortho Ready PS ₄) – Ετοιμοπαράδοτα αρχείου (Rush Image Library)	17 \$/km ²
Παγχρωματικές και Πολυφασματικές Ορθοαπεικονίσεις (Standard Ortho Ready Bundle MS _{8 BANDS}) – Αρχείου (Image Library)	32 \$/km ²
Παγχρωματικές και Πολυφασματικές Ορθοαπεικονίσεις (Standard Ortho Ready Bundle MS _{8 BANDS}) – Ετοιμοπαράδοτα αρχείου (Rush Image Library)	42 \$/km ²
Παγχρωματικές Stereo (Basic Stereo PAN) – Αρχείου (Image Library)	28 \$/km ²
Παγχρωματικές Stereo (Basic Stereo PAN) – Ετοιμοπαράδοτα αρχείου (Rush Image Library)	38 \$/km ²
Πολυφασματικές Stereo (Basic Stereo MS) – Αρχείου (Image Library)	34 \$/km ²
Πολυφασματικές Stereo (Basic Stereo MS) – Ετοιμοπαράδοτα αρχείου (Rush Image Library)	44 \$/km ²
Παγχρωματικές και Πολυφασματικές Stereo (Basic Stereo Bundle) – Αρχείου (Image Library)	37 \$/km ²
Παγχρωματικές και Πολυφασματικές Stereo (Basic Stereo Bundle) – Ετοιμοπαράδοτα αρχείου (Rush Image Library)	47 \$/km ²

Πίνακας 2.13: Κόστος απόκτησης δεδομένων WORLDVIEW-2 ανά τύπο δεδομένων. Πηγή: Eurimage, Ιούλιος 2010.

Όπως φαίνεται και στον πίνακα, οι τιμές που δίνονται είναι δολάρια/ km². Τα προϊόντα Basic είναι ραδιομετρικά διορθωμένα, αφορούν σε σκηνή 224 km² στο ναδίρ και το πολύγωνο παραγγελίας πρέπει να είναι τετράγωνο ή ορθογώνιο παραλληλόγραμμο με ελάχιστο πλάτος 12 km. Γι' αυτά τα προϊόντα η ελάχιστη παραγγελία είναι 1 σκηνή. Η επιλογή Bundle περιλαμβάνει και το παγχρωματικό και τα πολυφασματικά κανάλια. Οι επιλογές Image Library και Rush Image Library αφορούν σε απεικονίσεις αρχείου με τη διαφορά ότι οι Rush Image Library μπορούν από τη στιγμή της παραγγελίας σε 1 (για τα παγχρωματικά και τα πολυφασματικά δεδομένα) ή 2 ημέρες (για τα pan-sharpened) να παραδοθούν στον πελάτη. Οι επιλογές Tasking αφορούν σε ειδικές παραγγελίες και έχουν μέγιστη νεφοκάλυψη 15%. Τα προϊόντα Standard Ortho Ready είναι ραδιομετρικά και γεωμετρικά διορθωμένα και η ελάχιστη παραγγελία είναι 25 km² για τα προϊόντα αρχείου. Για τις Stereo απεικονίσεις η παραγγελία αφορά σε 2 σκηνές και το πολύγωνο παραγγελίας είναι μεταξύ των 15 x 14 km και 15 x 28 km.

Στη συνέχεια παρατίθεται συγκριτικός πίνακας των οικονομικών στοιχείων των δορυφορικών συστημάτων που παρουσιάστηκαν, για τα Basic και Archieve προϊόντα σε όλες τις ακρίβειες.

ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΠΟΚΤΗΣΗΣ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΑΝΑ ΤΥΠΟ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ				
	IKONOS	GEOEYE-1	QUICKBIRD	WORLDVIEW-2
	<i>1 m PAN/ 4 m MS</i>	<i>0,5 m PAN/ 2m MS</i>	<i>0,73 m PAN/ 2,88 m MS</i>	<i>0,5 m PAN/ 2 m MS</i>
Παραγγελία νέου προϊόντος – Παγχρωματικά	20 \$/km ²	25 \$/km ²	20 \$/km ²	24,3 \$/km ²
Παραγγελία νέου προϊόντος – Πολυφασματικά	20 \$/km ²	25 \$/km ²	20 \$/km ²	42,5 \$/km ²
Παγχρωματικά δεδομένα αρχείου	10 \$/km ²	12.50 \$/km ²	14 \$/km ²	17 \$/km ²
Πολυφασματικά δεδομένα αρχείου	10 \$/km ²	12.50 \$/km ²	14 \$/km ²	35,2 \$/km ²

Πίνακας 2.14: Συγκριτικά οικονομικά στοιχεία απόκτησης δορυφορικών δεδομένων ανάτυπο δεδομένων.

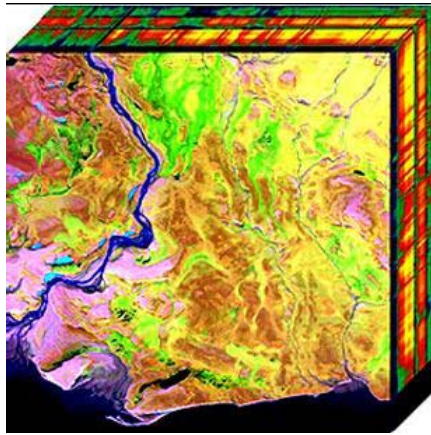
Από τον παραπάνω πίνακα, συμπεραίνουμε ότι υπάρχει μια σχετική ισορροπία ανάμεσα στην ανάλυση και στο κόστος των εικόνων. Τα δεδομένα του GEOEYE-1 είναι καλύτερης ακρίβειας και γι' αυτό είναι λίγο πιο ακριβά από τα IKONOS και QUICKBIRD. Τα δεδομένα QUICKBIRD διατίθενται σε καλύτερη ανάλυση και με τις ίδιες τιμές σε σχέση με τα IKONOS. Σημειώνεται ότι η σκηνή για τον QUICKBIRD είναι 272 km², ενώ η ελάχιστη παραγγελία για τα IKONOS και GEOEYE-1 δεδομένα είναι 100 km². Επομένως, η περιοχή μελέτης συμβάλλει στην επιλογή των κατάλληλων δεδομένων – παραγγελίας και αρχείου. Επίσης, συμφέρουν οικονομικά όσον αφορά στις απεικονίσεις αρχείου, σε σχέση με τον QUICKBIRD. Τα παγχρωματικά προϊόντα του WORLDVIEW-2 είναι λίγο πιο ακριβά για σκηνή 224 km², με περίπου 24 δολάρια/ km² – ωστόσο είναι πιο οικονομικά από τα GEOEYE-1 – και περίπου 17 δολάρια/ km² για τα δεδομένα αρχείου. Τα πολυφασματικά προϊόντα του WORLDVIEW-2 έχουν διπλάσια τιμή, το οποίο είναι λογικό γιατί παρέχουν και τα οκτώ κανάλια.

Συμπερασματικά, επειδή η διακριτική ικανότητα των δεδομένων που παρουσιάστηκαν δεν αποκλίνει, μπορεί κανείς να επιλέξει δεδομένα IKONOS που είναι τα πιο οικονομικά. Ωστόσο, τα προϊόντα QUICKBIRD αποτελούν το βέλτιστο συνδυασμό ανάλυσης και οικονομικότητας για παραγγελία νέων προϊόντων, ενώ για τα προϊόντα αρχείου η βέλτιστη επιλογή είναι η χρήση απεικονίσεων GEOEYE-1, εκτός εάν για μια εφαρμογή απαιτείται η ενισχυμένη πολυφασματική ανάλυση των οκτώ καναλιών που παρέχει ο WORLDVIEW-2. Τονίζεται ότι και η περιοχή μελέτης συμβάλλει στην επιλογή των κατάλληλων δεδομένων – παραγγελίας και αρχείου – καθώς τίθεται περιορισμός από τις ελάχιστες παραγγελίες.

2.2 Ανίχνευση χαρακτηριστικών σε υπερφασματικές απεικονίσεις

Τα υπερφασματικά δεδομένα αποτελούνται από μία ακολουθία μονοχρωματικών εικόνων, που λαμβάνονται σε πολλαπλές διαδοχικές ζώνες στο πεδίο της συχνότητας. Οι εικόνες αυτές δημιουργούν ένα κύβο δεδομένων (εικόνα 2.1), οι δύο πρώτες διαστάσεις του οποίου είναι οι χωρικές συντεταγμένες των

εικονοστοιχείων, ενώ η τρίτη διάσταση αναφέρεται στο πεδίο της συχνότητας (φασματική διάσταση). Συνήθως το πεδίο των συχνοτήτων κυμαίνεται από το ορατό φάσμα (400-800 nm), έως το υπέρυθρο (800-2500 nm). Οι σημερινοί υπερφασματικοί δέκτες έχουν τόσο μεγάλη ακρίβεια δειγματοληψίας στο πεδίο της συχνότητας, ώστε η φασματική διάσταση των εικόνων να αποτελείται από εκατοντάδες συνεχόμενες συχνοτικές ζώνες – κανάλια. Αυτό επιτρέπει την κατασκευή ενός αποτελεσματικού συνεχόμενου φάσματος ανακλαστικότητας για κάθε εικονοστοιχείο στην επιφάνεια κατόπτρευσης (Αργιαλάς, 1999).



Εικόνα 2.1: Ο υπερφασματικός κύβος. Πηγή:
http://rst.gsfc.nasa.gov/Sect13/HyMap_Zack_3D_cube.jpg

Ο σκοπός των υπερφασματικών τηλεπισκοπικών σαρωτών είναι να επιτρέψουν τη διάκριση μεταξύ των διάφορων καταγεγραμμένων χαρακτηριστικών, τα οποία παρουσιάζουν διαγνωστικά αναγνωριστικά στοιχεία απορρόφησης και ανάκλασης σε πολύ στενά εύρη μήκους κύματος, γεγονός που καθιστά αδύνατο τον διαχωρισμό τους στα σχετικά μεγάλα εύρη μηκών κύματος των φασματικών καναλιών των πολυφασματικών σαρωτών (Αργιαλάς, 1999). Στις υπερφασματικές απεικονίσεις, όπως και στις πολυφασματικές, γίνεται διακριτή καταγραφή της ακτινοβολίας που ανακλάται ή/ και εκπέμπεται από τα απεικονιζόμενα αντικείμενα. Η καταγραφή από έναν υπερφασματικό τηλεπισκοπικό δέκτη λεπτομερούς φασματικής απόκρισης για κάθε εικονοστοιχείο της απεικόνισης δίνει τη δυνατότητα εξαγωγής πολύ πιο ακριβούς και ορθής πληροφορίας σε σχέση με αυτήν που παρέχει ένας πολυφασματικός τηλεπισκοπικός δέκτης. Επομένως, αυξάνεται η φασματική διακριτική ικανότητα κι έτσι καθίσταται εφικτός ο διαχωρισμός αντικειμένων με μικρές φασματικές διαφορές. Λόγω του μεγάλου όγκου των δεδομένων, ένα σημαντικό στάδιο επεξεργασίας των υπερφασματικών εικόνων αποτελεί η μείωση της διάστασής τους. Προς την κατεύθυνση αυτή συνεχίζεται η έρευνα σήμερα.

2.2.1 Δορυφορικές απεικονίσεις ASTER

Ο ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) είναι ένας από τους ανιχνευτές που μεταφέρει, μεταξύ άλλων, ο δορυφόρος Terra της

NASA, ο οποίος εκτοξεύτηκε στις 18 Δεκεμβρίου του 1999 στην Καλιφόρνια των Η.Π.Α. και αποτελεί μέρος του συστήματος παρατήρησης της Γης της NASA, EOS (Earth Observing System). Ο ASTER αποτελεί μια προσπάθεια συνεταιρισμού της NASA, του υπουργείου οικονομικών, εμπορίου και βιομηχανίας της Ιαπωνίας και του ιαπωνικού κέντρου Τηλεπισκόπησης ERSDAC (Earth Remote Sensing Data Analysis Center).

Ο ASTER χρησιμοποιείται από το Φεβρουάριο του 2000 για την απόκτηση αναλυτικών χαρτών της θερμοκρασίας, του υψομέτρου και της ανάκλασης της γήινης επιφάνειας. Αποκτά δεδομένα μεσαίας γεωμετρικής διακριτικής ικανότητας από 90 έως 15 m, ραδιομετρικής διακριτικής ικανότητας 8bits, σε 14 κανάλια από το οπτικό μέχρι το θερμικό υπέρυθρο μέρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος και έχει στερεογραφικές δυνατότητες. Τα δεδομένα έχουν πολύ καλή φασματική διακριτική ικανότητα, λόγω της συνεχόμενης καταγραφής του φάσματος. Με τις στερεοαπεικονίσεις που παρέχει δίνει τη δυνατότητα δημιουργίας ψηφιακών μοντέλων εδάφους. Η ταχεία περίοδος του επιτρέπει τη δυναμική παρακολούθηση των φαινομένων της γήινης επιφάνειας. Τα χαρακτηριστικά της τροχιάς του Terra παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ TERRA: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΡΟΧΙΑΣ	
Ημερομηνία εκτόξευσης	18/12/1999
Τύπος	Σύγχρονη με τον Ήλιο
Υψόμετρο	705 km
Κλίση	98.3 deg.
Περίοδος	98.88 min.
Επανεπίσκεψη	16 ημέρες

Πίνακας 2.15: Χαρακτηριστικά της τροχιάς του δορυφορικού συστήματος TERRA.

Ο αισθητήρας αποκτά πληροφορίες με τα τρία όργανα που διαθέτει: VNIR (Visible and Near-Infrared Radiometer), SWIR (ShortWave Infrared Radiometer) και TIR (Thermal Infrared Radiometer). Κάθε υποσύστημα λειτουργεί σε μια διαφορετική περιοχή του φάσματος, έχει το δικό του τηλεσκόπιο και κατασκευάστηκε από διαφορετική ιαπωνική εταιρία. Το υποσύστημα VNIR λειτουργεί σε τρία κανάλια με μήκη κύματος στο ορατό και εγγύς υπέρυθρο μέρος του φάσματος, χωρικής ανάλυσης 15 m και παράγει μακράν το υψηλότερο ρυθμό δεδομένων των τριών υποσυστημάτων απεικόνισης του ASTER. Αποτελείται από δύο τηλεσκόπια δίνοντας δυνατότητα για στερεοαπεικονίσεις. Ο διαχωρισμός των καναλιών γίνεται μέσω του συνδυασμού διχροϊκών στοιχείων και φίλτρων παρεμβολής που επιτρέπουν και στα τρία κανάλια να «βλέπουν» την ίδια περιοχή του εδάφους ταυτόχρονα. Το υποσύστημα SWIR λειτουργεί σε έξι φασματικές ζώνες στην περιοχή του εγγύς υπέρυθρου, έχει ένα τηλεσκόπιο και λαμβάνει δεδομένα διακριτικής ικανότητας 30 m. Λόγω του μεγέθους του συνδυασμού ανιχνευτών – φίλτρων, οι ανιχνευτές θα πρέπει να είναι σε απόσταση μεταξύ τους δημιουργώντας σφάλμα παράλλαξης περίπου μισού εικονοστοιχείου ανά 900 m υψομέτρου. Αυτό το σφάλμα μπορεί να διορθωθεί εφόσον είναι διαθέσιμα τα υψομετρικά δεδομένα. Το υποσύστημα TIR

λειτουργεί σε πέντε κανάλια δέκα ανιχνευτών στο θερμικό υπέρυθρο, χωρικής ανάλυσης 90 m. Τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ TERRA: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ASTER							
		Μήκος Κύματος	Nadir ή Backward	Περιγραφή Καναλιού	Διακριτική ικανότητα	Ρυθμός απόκτησης δεδομένων	Λωρίδα
VNIR	Κανάλι 1	0.52-0.60 μm	Nadir	Πράσινο/ Κίτρινο	15 m	62 Mbits/sec	60 x 60 km ²
	Κανάλι 2	0.63-0.69 μm	Nadir	Κόκκινο			
	Κανάλι 3	0.76-0.86 μm	Nadir και Backward	Εγγύς υπέρυθρο			
SWIR	Κανάλι 4	1.6-1.7 μm	Nadir	Μέσο υπέρυθρο	30 m	23 Mbits/sec	
	Κανάλι 5	2.145-2.185 μm	Nadir				
	Κανάλι 6	2.185-2.225 μm	Nadir				
	Κανάλι 7	2.235-2.285 μm	Nadir				
	Κανάλι 8	2.295-2.365 μm	Nadir				
	Κανάλι 9	2.360-2.430 μm	Nadir				
TIR	Κανάλι 10	8.125-8.475 μm	Nadir	Θερμικό υπέρυθρο	90 m	4.2 Mbits/sec	
	Κανάλι 11	8.475-8.825 μm	Nadir				
	Κανάλι 12	8.925-9.275 μm	Nadir				
	Κανάλι 13	10.25-10.95 μm	Nadir				
	Κανάλι 14	10.95-11.65 μm	Nadir				

Πίνακας 2.16: Χαρακτηριστικά του αισθητήρα ASTER του δορυφορικού συστήματος TERRA.

Κάθε ένα από τα υποσυστήματα αυτά έχει μια μοναδική σειρά καναλιών με μοναδικά ραδιομετρικά χαρακτηριστικά. Η κατανόηση των χαρακτηριστικών αυτών μπορεί να βοηθήσει στον καθορισμό των καταλληλότερων εφαρμογών κάθε καναλιού ή συνδυασμού καναλιών. Για παράδειγμα, τα κανάλια 2 και 3 χρησιμοποιούνται συχνά για τον καθορισμό δεικτών βλάστησης, ενώ τα θερμικά κανάλια χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση ατμοσφαιρικών και θερμικών ανωμαλιών. Συγκρίνοντας με το παγχρωματικό κανάλι του Landsat 7 ETM+ διακριτικής ικανότητας 15 m, οι απεικονίσεις του ASTER είναι καλύτερες και όσον αφορά στη διακριτική ικανότητα και φασματικά.

Τα δεδομένα που παρέχει ο ASTER χρησιμοποιούνται σε ένα ευρύ πεδίο εφαρμογών και επιστημονικής έρευνας. Οι εφαρμογές αυτές περιλαμβάνουν το κλίμα της γήινης επιφάνειας, τη δυναμική της βλάστησης και των οικοσυστημάτων, την παρακολούθηση των ηφαιστειών, των πάγων και της νεφοκάλυψης, την παρακολούθηση της έκτασης και των συνεπειών επικίνδυνων φαινομένων όπως οι σεισμοί και τα τσουνάμι, την υδρολογία, τη γεωλογία, την αστική ανάπτυξη και τις αλλαγές στην εδαφοκάλυψη της γήινης επιφάνειας (π.χ. αλλαγές των δασών).

Σύμφωνα με την Eurimage ανάλογα με τον τύπο των δεδομένων, το κόστος των απεικονίσεων ASTER ποικίλει. Στον πίνακα που ακολουθεί παρατίθενται τα στοιχεία που συλλέχθηκαν για το σκοπό αυτό. Σημειώνεται ότι η σκηνή αφορά σε λωρίδα 60x60 km².

ΚΟΣΤΟΣ ΑΠΟΚΤΗΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ASTER	
Δεδομένα αρχείου (Archive level 1A, 1B and 2 imagery)	75 ευρώ/ σκηνή
Ορθοαπεικονίσεις αρχείου (Archive ortho-rectified imagery)	150 ευρώ/ σκηνή
DEM (Relative DEM)	75 ευρώ/ ζεύγος
Νέα παραγγελία ημέρας (New tasking package, day time observation)	300 ευρώ/ σκηνή
Νέα παραγγελία νύχτας (New tasking package, night time observation)	225 ευρώ/ σκηνή

Πίνακας 2.17: Κόστος απόκτησης δεδομένων ASTER ανά τύπο δεδομένων. Πηγή: Eurimage, Ιούλιος 2010.

Άλλο παράδειγμα υπερφασματικού δέκτη είναι ο HYPERION που είναι ένας από τους τρεις δέκτες που λειτουργούν στο διαστημικό σκάφος EO-1, το οποίο εκτοξεύθηκε το 2000. Ο Hyperion διαθέτει 220 μοναδικά φασματικά κανάλια τα οποία καλύπτουν ένα φάσμα 400-2500 nm, με χωρική ανάλυση 30 μέτρων σε όλες τις ζώνες.

2.3 Ανίχνευση χαρακτηριστικών σε απεικονίσεις radar

Το εύρος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας συνθέτει το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Το φάσμα αποτελείται από τα εξής τμήματα ακτινοβολίας: το υπεριώδες (ultraviolet), το ορατό (visible), το υπέρυθρο (infrared) και το μικροκυματικό (microwave). Το μικροκυματικό εύρος του φάσματος οριοθετείται μεταξύ του υπέρυθρου και των ραδιοκυμάτων, με μήκος κύματος από 3 mm έως 1 m, περίπου, και χρησιμοποιείται στην Τηλεπισκόπηση για την παροχή χρήσιμων πληροφοριών σχετικά με την ατμόσφαιρα, τις χερσαίες και τις υδάτινες επιφάνειες της Γης. Σημαντικό πλεονέκτημα της μικροκυματικής ακτινοβολίας είναι η ικανότητά της να διαπερνά τα σύννεφα και επιφανειακά αντικείμενα, ανάλογα με το μήκος κύματος που χρησιμοποιείται.

Οι μικροκυματικοί δέκτες διακρίνονται σε ενεργητικούς και παθητικούς και με τη χρήση τους ανιχνεύονται, αναγνωρίζονται και διερευνώνται αντικείμενα της γήινης επιφάνειας, βάσει των οπτικών ιδιοτήτων τους στη μικροκυματική περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.

Οι παθητικοί μικροκυματικοί δέκτες είναι ραδιόμετρα τα οποία ευαισθητοποιούνται στην περιοχή των μικροκυμάτων της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Καταγράφουν την εκπεμπόμενη από τα ίδια σώματα μικροκυματική ακτινοβολία ή/και την ανακλώμενη από τα σώματα ηλιακή μικροκυματική ακτινοβολία. Οι εφαρμογές αυτών των δεκτών στην Τηλεπισκόπηση εκτείνονται στους τομείς της υδρολογίας, της γεωργίας, των πόλων, των ωκεανών, της μετεωρολογίας, της κλιματολογίας κ.ά..

Οι ενεργητικοί μικροκυματικοί δέκτες είναι συστήματα που εκπέμπουν συγκεκριμένου τύπου ακτινοβολία και καταγράφουν την οπισθοσκέδασή της. Το RADAR (Radio Detection and Ranging) είναι χαρακτηριστικό μικροκυματικό ενεργητικό σύστημα το οποίο χρησιμοποιείται για την ανίχνευση, τον εντοπισμό,

την απεικόνιση και την παρακολούθηση αντικειμένων. Η αρχή λειτουργίας του στηρίζεται στην εκπομπή ενός ηλεκτρομαγνητικού σήματος/ παλμού ως δέσμη ακτινών και στη συνέχεια στη λήψη της ανακλώμενης από τα διάφορα αντικείμενα τα οποία φωτίζονται από το σήμα εκπομπής, ακτινοβολίας. Με τη μέτρηση του χρόνου εκπομπής – επιστροφής του παλμού καθώς επίσης και της ισχύος του, είναι δυνατή η ταυτόχρονη μέτρηση αφενός της απόστασης του στόχου από το δέκτη και αφετέρου της ανακλώμενης μικροκυματικής ακτινοβολίας από το στόχο. Άλλα ενεργά συστήματα είναι τα σκεδασόμετρα (scatterometers), LiDAR, Laser Altimeter και ηχοβολιστικά μηχανήματα (sounders).

Η μεγάλη σημασία του radar έγκειται στη δυνατότητά του να ανιχνεύει αντικείμενα χωρίς να επηρεάζεται από τις συνθήκες φωτισμού και τις καιρικές συνθήκες. Τα radar απεικονίσεων διακρίνονται στα radar πραγματικού ανοίγματος (RAR) και στα radar συνθετικού ανοίγματος (SAR). Και οι δύο τύποι radar είναι συστήματα πλευρικής όρασης με διεύθυνση όρασης κάθετη στη γραμμή πτήσης. Η διαφορά τους έγκειται στη χωρική διακριτική τους ικανότητα. Τα SAR χρησιμοποιούν επεξεργασία σήματος για να συνθέσουν ένα άνοιγμα κεραίας εκατοντάδες φορές μεγαλύτερο του πραγματικού. Η χωρική διακριτική ικανότητα αυτών των συστημάτων κατά μήκος της γραμμής πτήσης είναι ανεξάρτητη από την απόσταση στόχου – δέκτη, σε αντίθεση με τα RAR, στα οποία η χωρική διακριτική ικανότητα προσδιορίζεται από το εύρος δέσμης της κεραίας. Οι εφαρμογές των radar στην Τηλεπισκόπηση εκτείνονται στους τομείς της υδρολογίας, της γεωλογίας, της γεωργίας, των δασών, των ωκεανών κ.ά..

Διάφοροι τηλεπισκοπικοί δέκτες είναι οι ERS-1, ERS-2, Radarsat-1, Radarsat-2, A-SAR, Envisat, TerraSAR-X, ALOS κ.ά.. Η περιοχή των μικροκυμάτων στην οποία λειτουργούν οι τηλεπισκοπικοί δέκτες εκτείνεται στις ζώνες UHF, SHF και EHF και υποδιαιρείται στις περιοχές – κανάλια P, L, S, C, X, K, Q, V, W. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι συχνότητες των καναλιών αυτών.

ΚΑΝΑΛΙ	ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ (σε GHz)
P	0.225-0.390
L	0.390-1.550
S	1.550-4.200
C	4.200-5.750
X	5.750-10.90
K	10.90-36.0
Q	36.0-46.0
V	46.0-56.0
W	56.0-100

Πίνακας 2.18: Συχνότητες καναλιών radar τηλεπισκοπικών δεκτών (Καραθανάση Β., Ραδιομετρία – Μικροκυματική Τηλεπισκόπηση, 2001).

Οι ενεργητικοί μικροκυματικοί δέκτες παρακολούθησης της Γης λειτουργούν σε όλα αυτά τα κανάλια και ιδιαίτερα στα κανάλια X (αερομεταφερόμενοι δέκτες), C (ERS-1, ERS-2, SIR-C, Envisat, RADARSAT-1), S (Almaz), L (SEASAT, SIR-A, SIR-B, SIR-C, JERS-1, ALOS) και P (αερομεταφερόμενοι δέκτες AirSAR).

Στη συνέχεια παρατίθενται γνωστά συστήματα SAR απεικονίσεων και τα χαρακτηριστικά τους. Τα συστήματα αυτά έχουν το σαφές πλεονέκτημα ότι λειτουργούν ανεξάρτητα από τις συνθήκες φωτισμού και τις καιρικές συνθήκες. Επιπλέον, παρατίθενται και όλα τα οικονομικά στοιχεία που αφορούν στην αγορά αντίστοιχων δεδομένων.

2.3.1 Δορυφορικά συστήματα SAR απεικονίσεων

RADARSAT-1

Το RADARSAT-1 είναι ένα εξελιγμένο δορυφορικό σύστημα παρατήρησης της Γης το οποίο αναπτύχθηκε από τον Καναδά, και συγκεκριμένα από την CSA (Canadian Space Agency), για την παρακολούθηση των περιβαλλοντικών αλλαγών και των φυσικών πόρων του πλανήτη, και αποτελεί τον πρώτο εμπορικό δορυφόρο της χώρας. Εκτοξεύτηκε στις 4 Νοεμβρίου του 1995 στην Καλιφόρνια των Η.Π.Α. και παρέχει ένα σύστημα ικανό να παραδίδει έγκαιρα μεγάλες ποσότητες δεδομένων τόσο για εμπορικές όσο και για επιστημονικές εφαρμογές. Η προγραμματισμένη διάρκεια ζωής του ήταν 5 χρόνια, την οποία και έχει ξεπεράσει. Είναι σε τροχιά σύγχρονη με τον Ήλιο, 798 km πάνω από τη Γη. Τα χαρακτηριστικά της τροχιάς του παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΡΟΧΙΑΣ	
Υψόμετρο	793-821km
Κλίση	98.6 deg.
Διάρκεια τροχιάς	100.7 λεπτά
Τύπος τροχιάς	Σύγχρονη με τον Ήλιο (14 τροχιές ανά ημέρα)
Ταχύτητα	7 km/sec

Πίνακας 2.19: Χαρακτηριστικά της τροχιάς του δορυφορικού συστήματος RADARSAT-1.

Εξοπλισμένο με ένα ισχυρό radar συνθετικού ανοίγματος, αποκτά εικόνες της γήινης επιφάνειας μέρα και νύχτα, σε όλες τις καιρικές συνθήκες και εν μέσω νεφοκάλυψης, καπνού και ομίχλης. Ως ενεργητικός δέκτης, μεταδίδει έναν παλμό προς τη Γη και το SAR καταγράφει στο δορυφόρο την ανακλώμενη ενέργεια από τη γήινη επιφάνεια. Τα χαρακτηριστικά του συνθετικού ανοίγματος κεραίας παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ SAR	
Συχνότητα/ μήκος κύματος	5.3GHz/ C band 5.6 cm
Εύρος ζώνης ραδιοσυχνοτήτων	11.6, 17.3 ή 30.0 MHz
Μέγιστη ισχύς πομπού	5Kw
Μέσος όρος ισχύος πομπού	300W
Μέγιστο ποσοστό καταγραφόμενων δεδομένων	85Mb/s
Μέγεθος κεραίας	15m x 1.5m
Πόλωση κεραίας	HH

Πίνακας 2.20: Χαρακτηριστικά της κεραίας συνθετικού ανοίγματος του RADARSAT-1.

Το SAR του RADARSAT-1 μπορεί να διαμορφώσει και να κατευθύνει τη δέσμη του radar χρησιμοποιώντας το κανάλι C. Το εύρος των ακτινών καλύπτει ζώνες από 50 έως 500 km, με εύρος διακριτικής ικανότητας από 8 έως 100 m, ενώ το εύρος των γωνιών πρόσπτωσης κυμαίνεται από 20 έως περισσότερο από 50 μοίρες. Οι απεικονίσεις που παρέχει παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΛΗΨΗΣ ΑΝΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ			
Λειτουργία	Ονομαστική ανάλυση (m)	Πλάτος ζώνης (km)	Αριθμός θέσεων ακτίνων
Fine	8	50	15
Standard	30	100	7
Wide	30	150	3
ScanSAR narrow	50	300	2
ScanSAR wide	100	500	2
Extended high	18-27	75	3
Extended low	30	170	1

Πίνακας 2.21: Χαρακτηριστικά λήψης ανά λειτουργία απεικόνισης του RADARSAT-1.

Παρέχει καθημερινή κάλυψη της Αρκτικής, απεικονίσεις του Καναδά κάθε τρεις μέρες και πλήρη κάλυψη των περιοχών με ισημερινό γεωγραφικό πλάτος κάθε έξι ημέρες με εύρος ζώνης 500 km. Το μονοπάτι της τροχιάς του επαναλαμβάνεται κάθε 24 ημέρες, δηλαδή περνάει από ένα συγκεκριμένο σημείο λαμβάνοντας την ίδια εικόνα κάθε 24 ημέρες. Αυτό είναι χρήσιμο για τη συμβολομετρία και για την ανίχνευση των όποιων αλλαγών της περιοχής αυτής στο διάστημα των 24 ημερών. Επιπλέον, μπορεί να μεταδώσει δεδομένα σε γήινους σταθμούς σε διαφορετική στιγμή σε σχέση με άλλους δορυφόρους εκ των οποίων οι περισσότεροι χρησιμοποιούν μεσο-πρωινή τροχιά (mid-morning orbit).

Οι εφαρμογές του αφορούν στην παρακολούθηση του περιβάλλοντος και των πάγων, στην πλοήγηση, στη διαχείριση φυσικών καταστροφών, στη μελέτη των ωκεανών και του παράκτιου περιβάλλοντος, στην υδρολογία, στη γεωργία, στη γεωλογία και τη δασοκομία. Η ικανότητα του δορυφόρου για εποχιακές απεικονίσεις είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την παρακολούθηση και την ανίχνευση αλλαγών του περιβάλλοντος (π.χ. των πάγων και των ωκεανών). Επιπλέον, με τις

υψηλής ανάλυσης απεικονίσεις που διαθέτει χαρτογραφήθηκε η Ανταρκτική κατά το διάστημα 1996-1997.

Ο RADARSAT-2 εκτοξεύτηκε στις 14 Δεκεμβρίου 2007 από το Καζανκσάν. Σχεδιάστηκε με σημαντικά και ισχυρά χαρακτηριστικά τα οποία περιλαμβάνουν χωρική διακριτική ικανότητα 3 m, ευελιξία στην επιλογή της πόλωσης, επιλογές αριστερής και δεξιάς απεικόνισης (left and right-looking), ανώτερη αποθήκευση δεδομένων και ακριβέστερες μετρήσεις της θέσης και του ύψους των διαστημικών σκαφών.

Σύμφωνα με την MDA Geospatial Services ανάλογα με τον τύπο των δεδομένων, το κόστος των radar απεικονίσεων RADARSAT-1 ποικίλει. Στον πίνακα που ακολουθεί παρατίθενται τα στοιχεία που συλλέχθηκαν για το σκοπό αυτό.

ΠΑΡΑΓΓΕΛΙΑ ΝΕΟΥ ΠΡΟΪΟΝΤΟΣ	Fine	Standard	Wide	ScanSAR narrow	ScanSAR wide	Extended high	Extended low
ΑΝΑΛΥΣΗ (m)	8	30	30	50	100	18-27	30
ΚΑΛΥΨΗ (km)	50x50	100x100	150x150	300x300	500x500	75x75	170x170
Path Image, Signal Data	4.752 ευρώ/σκηνή						
Path Image Plus, Map Image, Single Look Complex	4.752 ευρώ/σκηνή			N/A		4.752 ευρώ/σκηνή	
Precision Map Image	5.940 ευρώ/σκηνή					5.940 ευρώ/σκηνή	
Archive Data	1.980 ευρώ/σκηνή						

Πίνακας 2.22: Κόστος απόκτησης δεδομένων RADARSAT-1 ανά τύπο δεδομένων. Πηγή: MDA Geospatial Services.

Όλες οι παραγγελίες αφορούν σε καναδέζικα δολάρια ανά σκηνή – εδώ αναγράφονται οι τιμές σε ευρώ ανά σκηνή – και τα προϊόντα αρχείου αφορούν σε δεδομένα του CDPF (Canadian Data Processing Facility) πριν την 1/1/2008. Ο προγραμματισμός μια λήψης επιφέρει επιπλέον χρεώσεις. Ένας τυπικός – basic προγραμματισμός κοστίζει επιπλέον 135 καναδέζικα δολάρια ανά σκηνή (ή 178,2 ευρώ). Τα δεδομένα Path Image αφορούν σε σκηνές παράλληλες με την τροχιά του δορυφόρου. Τα Signal Data χρήζουν επεξεργασίας ενώ τα Path Image Plus έχουν καλύτερη ανάλυση. Τα Map Image δεδομένα είναι προσανατολισμένα στο Βορρά και διορθωμένα σε μια χαρτογραφική προβολή. Τα Single Look Complex περιέχουν πληροφορίες γεωγραφικών συντεταγμένων και είναι διορθωμένα από σφάλματα λήψης. Τα Precision Map Image είναι προσανατολισμένα προϊόντα με επίγεια σημεία ελέγχου και χρήση χαρτογραφικής προβολής. Σημειώνεται ότι οι αναγραφόμενες τιμές είναι ανεξάρτητες από την ανάλυση και την κάλυψη των απεικονίσεων.

ERS-1/2

Στις 17 Ιουλίου 1991 εκτοξεύτηκε από την ESA (European Space Agency) ο πρώτος ευρωπαϊκός δορυφόρος Τηλεπισκόπησης με radar, ο ERS-1 (European Remote-Sensing Satellite). Ο δορυφόρος μπήκε σε πορεία 18 λεπτά μετά την εκτόξευση από τη βάση Kuru της Γουιάνας. Η τροχιά του είναι κοντά στους πόλους σε μέσο υψόμετρο 780 km και κλίση 98.5 deg. Αποτέλεσε τον πρόδρομο μιας νέας γενιάς διαστημικών αποστολών που σχεδιάστηκαν για τη δεκαετία του 90 και έπαψε να λειτουργεί στις 10 Μαρτίου 2000, ξεπερνώντας κατά πολύ την αναμενόμενη διάρκεια ζωής του. Τα χαρακτηριστικά της τροχιάς του δορυφόρου παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί.

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΡΟΧΙΑΣ	
Τύπος	Σύγχρονη με τον Ήλιο, πολική, σχεδόν κυκλική
Υψόμετρο	782-785 km
Περίοδος	Περίπου 100 min.
Τροχιές ανά ημέρα	14.3
Περίοδος επανάληψης τροχιάς	3, 35, 176 ημέρες

Πίνακας 2.23: Χαρακτηριστικά της τροχιάς του δορυφορικού συστήματος ERS-1.

Ο δορυφόρος διαθέτει όργανα τα οποία επιτρέπουν την παρατήρηση της Γης με υψηλή ακρίβεια ανεξαρτήτως καιρικών συνθηκών και συνθηκών φωτισμού. Διαθέτει ενεργητικούς και παθητικούς μικροκυματικούς δέκτες και ένα θερμικό υπέρυθρο ραδιόμετρο. Ο ERS-1 φέρει δύο ενεργητικούς δέκτες, τον ενεργητικό δέκτη μικροκυμάτων AMI (Active Microwave Instrument) και τον υψομετρητή radar (Radar Altimeter). Ο AMI συνδυάζει τις λειτουργίες του SAR με αυτές του σκεδασόμετρου ανέμου (Wind scatterometer) – όργανο με τρεις κεραίες το οποίο μετράει την ταχύτητα και τη διεύθυνση του ανέμου στην επιφάνεια της θάλασσας. Το SAR λειτουργεί στο κανάλι C, ανιχνεύοντας υψομετρικές αλλαγές. Ο υψομετρητής radar παρέχει ακριβείς μετρήσεις για τους πάγους, το υψόμετρο της επιφάνειας της θάλασσας, ύψη κυμάτων και εκτιμήσεις για την ταχύτητα του ανέμου πάνω από τους ωκεανούς. Μια ακόμα μεγάλη χρησιμότητα του ραδιοϋψομέτρου είναι η δημιουργία τοπογραφικών χαρτών. Με το AMI επιτυγχάνονται εικόνες υψηλής ανάλυσης πλάτους 100 km. Τα χαρακτηριστικά των αισθητήρων παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

ΑΙΣΘΗΤΗΡΑΣ	ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ	ΠΟΛΩΣΗ	ΧΩΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	ΠΛΑΤΟΣ ΖΩΝΗΣ
SAR Image mode	C-band (5,3GHz)	W	30 m	100 km
SAR Wave mode	C-band (5,3GHz)	W	10 m	5 km
Wind Scatterometer	C-band (5,3GHz)	W	50 m	500 km
Radar Altimeter	K-band (13,8GHz)		10 cm (ύψος)	1,3°
ATSR			1 km	500 km

Πίνακας 2.24: Χαρακτηριστικά των αισθητήρων του ERS-1.

Επιπλέον, ο ERS-1 διαθέτει τον παθητικό δέκτη Along Track Scanning Radiometer (ATSR), όργανο που διαθέτει τέσσερα φασματικά κανάλια 1.6, 3.7, 10.8 και 12 μm. Με αυτό είναι δυνατή η μέτρηση της θερμοκρασίας της επιφάνειας των θαλασσών και της ατμόσφαιρας, της νεφοκάλυψης και του περιεχομένου σε υγρασία της ατμόσφαιρας. Οι λειτουργίες αυτές γίνονται συνδυάζοντας ένα υπέρυθρο ραδιόμετρο και ένα μικροκυματικό ηχοβολιστικό μηχάνημα, το microwave sounder.

Ένα άλλο όργανο με το οποίο είναι εξοπλισμένος ο ERS-1 είναι ο ανακλαστήρας Laser (LRR, Laser Retro Reflectors). Αυτό το όργανο αντανakλά υπεριώδεις laser ακτινοβολίες, που εκπέμπονται από τους επίγειους κυμαινόμενους σταθμούς (ranging stations) laser και σκοπός του είναι ο καθορισμός και η μέτρηση της τροχιάς του δορυφόρου. Το PRARE (Precise Range and Range – Rate Equipment) είναι ένα ακόμη όργανο που χρησιμοποιείται για τον ακριβή προσδιορισμό των δορυφορικών χαρακτηριστικών θέσης και τροχιάς και για το γεωδαιτικό «καθορισμό» των επίγειων σταθμών.

Ο δορυφόρος πραγματοποιεί μετρήσεις μεταξύ των οποίων περιλαμβάνονται η κατάσταση της θάλασσας, τα χαρακτηριστικά των ανέμων πάνω από την επιφάνεια των θαλασσών, η κίνηση των θαλασσίων ρευμάτων και των πάγων, η θερμοκρασία της θάλασσας κ.ά.. Συνεισφέρει στην κατανόηση μιας σειράς παραμέτρων, όπως τη γνώση της κίνησης των ωκεανών και της μεταφοράς ενέργειας, την καλύτερη παρακολούθηση των παρακτίων δυναμικών εργασιών και της ρύπανσης τους, τη βελτιωμένη αναπαράσταση των αλληλεπιδράσεων θάλασσας – ατμόσφαιρας σε κλιματικά μοντέλα κ.ά.. Ως εκ τούτου προκύπτει ότι η ναυσιπλοΐα είναι αυτή που επωφελείται περισσότερο από τις πληροφορίες του ERS-1. Επίσης ο δορυφόρος δίνει και σημαντικά στοιχεία για τα ανανεώσιμα και μη αποθέματα ενέργειας της Γης.

Ο ERS-2 διαδέχτηκε τον ERS-1 στις 21 Απριλίου του 1995 και βρίσκεται ακόμη σε λειτουργία. Ο δορυφόρος είναι εξοπλισμένος με ένα πρόσθετο όργανο, το GOME, το οποίο επιτρέπει τη μέτρηση του όζοντος της ατμόσφαιρας και την παρατήρηση των αλλαγών στην κάλυψη της βλάστησης. Αυτό κάνει την αποστολή του ERS-2 μεγαλύτερη από του ERS-1. Επιπροσθέτως, διαθέτει ένα ATSR-2 με 3 κανάλια στην περιοχή του ορατού τμήματος του φάσματος, ειδικευμένο στην ανίχνευση της χλωροφύλλης και της βλάστησης. Όταν ξεκίνησε η αποστολή του ERS-2, ο δορυφόρος βρέθηκε για 9 μήνες στην ίδια τροχιά με τον ERS-1 επιτρέποντας μια παράλληλα αποστολή. Έτσι, ο ERS-2 περνούσε από το ίδιο σημείο μόλις μία μέρα μετά τον ERS-1. Ο διάδοχος του ERS-2 είναι ο Envisat, ο οποίος παρέχει βελτιωμένες εκδόσεις πολλών εκ των οργάνων του ERS-2. Η διάρκεια ζωής του ERS-2 έχει αυξηθεί μέχρι το 2011. Τα χαρακτηριστικά της τροχιάς και των αισθητήρων του ERS-2 είναι ίδια με αυτά που παρουσιάζονται στους πίνακες 2.23 και 2.24 αντίστοιχα.

Σύμφωνα με την Eurimage ανάλογα με τον τύπο των δεδομένων, το κόστος των radar απεικονίσεων ERS-1/2 ποικίλει. Στον πίνακα που ακολουθεί παρατίθενται τα στοιχεία που συλλέχθηκαν για το σκοπό αυτό.

ΚΟΣΤΟΣ ΑΠΟΚΤΗΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ERS-1/2	
ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΝΕΑΣ ΠΑΡΑΓΓΕΛΙΑΣ	Standard (ευρώ/σκηνή)
1 σκηνή	500
επόμενες 3 σκηνές κατά μήκος της ίδιας τροχιάς	400
επιπλέον σκηνές (από την 5 ^η)	425
παραγγελία: 4 πρώτες σκηνές κατά μήκος της ίδιας τροχιάς	100
παραγγελία: κάθε επιπλέον σκηνή	25
δεδομένα αρχείου	400

Πίνακας 2.25: Κόστος απόκτησης δεδομένων ERS-1/2. Πηγή: Eurimage, Ιούλιος 2010.

Όλα τα προϊόντα διατίθενται σε υψηλή ανάλυση (full resolution), περιλαμβάνουν τον προγραμματισμό της λήψης και την τιμή του προϊόντος. Οι τιμές παραγγελίας προστίθενται στο κόστος προγραμματισμού.

TerraSAR-X

Ο δορυφόρος TerraSAR-X εκτοξεύτηκε επιτυχώς στις 15 Ιουνίου 2007 από το Καζανκστάν. Είναι ο πρώτος γερμανικός δορυφόρος και βασίζεται σε σύμβαση δημοσίου και ιδιωτικού τομέα μεταξύ του γερμανικού κέντρου αεροδιαστημικής βιομηχανίας DLR και της EADS Astrium GmbH. Η υπεύθυνη εταιρία για την εμπορικότητα του δορυφόρου είναι η Infoterra GmbH, θυγατρική της Astrium GmbH από το 2001.

Βρίσκεται σε πολική τροχιά υψομέτρου 514 km και η διάρκεια ζωής του εκτιμάται στα πέντε χρόνια. Λαμβάνει εικόνες υψηλής ακρίβειας έως 1 m, ανεξαρτήτως καιρικών συνθηκών και συνθηκών φωτισμού και το SAR του λειτουργεί στο κανάλι X ($\lambda=31\text{mm}$) με ένα εύρος γωνιών πρόσπτωσης $20^\circ-40^\circ$.

Ο TerraSAR-X SAR (δέκτης) είναι ένα ενεργό σύστημα με κεντρική συχνότητα 9.65GHz και μέγιστο εύρος ζώνης 300 MHz. Η κεραία (FE) είναι σε θέση να λειτουργεί σε δύο πολώσεις, H και V. Η λειτουργία σε μια πειραματική Dual Receive Antenna (DRA) Mode – όπου η ηχώ λαμβάνεται από την κεραία του αζιμουθίου και στη συνέχεια διαχωρίζεται κατά την επεξεργασία στο έδαφος – επιτρέπει τη χρήση ενδιαφερόντων νέων χαρακτηριστικών, όπως το Along Track Interferometry, η πλήρης πολωσιμετρική απόκτηση δεδομένων και η enhancement of the stripmap azimuth resolution. Για να εκμεταλλευθεί αυτή τη δυνατότητα, το ινστιτούτο DLR, για την έρευνα των μεταφορών, έχει ξεκινήσει ένα έργο για να δημιουργήσει τη δυνατότητα ενός συστήματος παρακολούθησης της διαστημικής κυκλοφορίας, χρησιμοποιώντας την TerraSAR-X MTI-mode.

Ο μοναδικός σχεδιασμός της κεραίας του επιτρέπει ποικιλία πολωσιμετρικών σχεδιασμών. Μια από τις καινοτομίες του δορυφόρου είναι ένα είδος zoom shot, με την ανάλυση και το πεδίο σάρωσης να είναι μεγέθη αντιστρόφως ανάλογα 1:10. Επιπλέον, η κεραία μπορεί να ευθυγραμμιστεί ηλεκτρονικά σε ένα εύρος γωνιών, ούτως ώστε να είναι ρυθμιζόμενη η θέαση. Νωρίτερα, οι δορυφόροι μπορούσαν να

εκπέμπουν μόνο προς μια κατεύθυνση. Ο εξοπλισμός του δορυφόρου διαθέτει εκτός του SAR και τα Tracking, Occultation, and Ranging (TOR) package και Laser Communication Terminal (LCT).

Ο δορυφόρος επαναλαμβάνει την τροχιά του κάθε 11 ημέρες, αν και η πλατφόρμα του «βλέπει» κάθε σημείο της Γης το λιγότερο κάθε $2^{1/2}$ ημέρες και κάθε 2 ημέρες στο 95% των περιπτώσεων. Η αποθήκευση δεδομένων φτάνει τα 256Gbits. Τα χαρακτηριστικά του δορυφόρου και τα δεδομένα που λαμβάνει παρουσιάζονται στους πίνακες που επισυνάπτονται.

Ημερομηνία Εκτόξευσης	15/6/2007
Τοποθεσία Εκτόξευσης	Μπαϊκονούρ, Καζανκστάν
Μάζα Δορυφόρου	1230kg
Μέγεθος Δορυφόρου	5m ύψος επί 2,4m διάμετρο
Τύπος Τροχιάς	Χαμηλή, Σύγχρονη με τον Ήλιο
Υψόμετρο	514km
Κλίση	97,44°
Συχνότητα	9,65GHz
Διάρκεια	94,92min

Πίνακας 2.26: Χαρακτηριστικά του δορυφορικού συστήματος TerraSAR-X.

ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ	ΑΝΑΛΥΣΗ	ΛΩΡΙΔΑ (πλάτος x μήκος)
High Resolution SpotLight	έως 1m	5-10 x 5 km
SpotLight	έως 2m	10 x 10 km
StripMap	έως 3m	30 x 50 km
ScanSAR	έως 18m	100 x 150 km

Πίνακας 2.27: Χαρακτηριστικά λήψης ανά λειτουργία απεικόνισης του TerraSAR-X.

Το προηγμένο, υψηλής ανάλυσης X-band SAR με βάση την τεχνολογία που διαθέτει, επιτρέπει τις λειτουργίες αυτές και συνδυάζει υψηλή ανάλυση με εικόνες πλατιάς λωρίδας. Στη λειτουργία SpotLight η απόσταση μεταξύ δύο συνεχόμενων σκηρών είναι 20km, ενώ στις υπόλοιπες 7km. Τα προϊόντα του δορυφόρου παρέχονται σε τέσσερα επίπεδα ραδιομετρικής και γεωμετρικής διόρθωσης, Single Look Slant Range/ Complex (SSC), Multi Look Ground Range/ Detected (MGD), Geocoded Ellipsoid Corrected (GEC) και Enhanced Ellipsoid Corrected (EEC). Σημειώνεται ότι τα δεδομένα του δορυφόρου είναι εξαιρετικής ραδιομετρικής ακρίβειας και ασυναγώνιστης γεωμετρικής, σε σχέση με άλλα δορυφορικά συστήματα. Επιπλέον, διαθέτει μοναδική ευκινησία όσον αφορά στην ταχεία αλλαγή τρόπων απεικόνισης και πολώσεων.

Οι εφαρμογές του δορυφόρου εκτείνονται στους τομείς της εθνικής άμυνας, χαρτογραφίες, τοπογραφία, υδρολογία, ωκεανογραφία, πλοήγηση, ανίχνευση αλλαγών, γεωργία, δασοκομία, αστικός σχεδιασμός, κυκλοφορία οχημάτων, προστασία του περιβάλλοντος, διαχείριση παράκτιου περιβάλλοντος, εκτίμηση της

δομής της βλάστησης και βελτίωση των συμβατικών DEM, γεωλογία, διαχείριση κινδύνων, σχεδιασμός και εποπτεία αποθεμάτων κ.ά..

Ο «αδερφός» δορυφόρος του TerraSAR-X, TanDEM-X, εκτοξεύτηκε στις 21 Ιουνίου του 2010. Από τον Οκτώβριο του 2010 οι δυο δορυφόροι πετούν σε στενό σχηματισμό με απόσταση μόλις μερικές εκατοντάδες μέτρα μεταξύ τους και καταγράφουν δεδομένα συγχρονισμένα. Αυτό θα επιτρέψει τη δημιουργία πολλών παγκόσμιων DEMs – εντός τριών ετών – και μια πρωτοφανή ακρίβεια, κάλυψη και ποιότητα. Αυτό το DEM είναι δυνατό να διαθέτει κατακόρυφη ακρίβεια της τάξης των 2m (σχετική) και 10m (απόλυτη), μέσα σε ένα οριζόντιο raster περίπου 12x12 τετραγωνικών μέτρων, ελαφρώς διαφορετικό ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος.

Σύμφωνα με την Spotimage ανάλογα με τον τύπο των δεδομένων, το κόστος των radar απεικονίσεων TerraSAR-X ποικίλει. Στον πίνακα που ακολουθεί παρατίθενται τα στοιχεία που συλλέχθηκαν για το σκοπό αυτό.

ΚΟΣΤΟΣ ΑΠΟΚΤΗΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ TERRASAR-X ΑΝΑ ΤΥΠΟ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ (ευρώ/σκηνή)				
	High Resolution SpotLight	SpotLight	StripMap	ScanSAR
Archieve (>1 χρόνο)	3.375	3.375	2.625	1.925
Παραγγελία νέου προϊόντος	6.750	6.750	3.750	2.750

Πίνακας 2.28: Κόστος απόκτησης δεδομένων TerraSAR-X ανά τύπο δεδομένων. Πηγή: Spotimage, Ιανουάριος 2008.

Σημειώνεται ότι τα προϊόντα αρχείου High Resolution SpotLight και SpotLight τα οποία είναι παλαιότερα από 6 μήνες, έχουν τις τιμές αρχείου. Επιπλέον χρεώσεις τίθενται στην περίπτωση παραγγελίας προγραμματισμού λήψεων ανάλογα με χρονικούς περιορισμούς που δίνονται από την εταιρία.

Στη συνέχεια παρατίθεται συγκριτικός πίνακας των οικονομικών στοιχείων των δορυφορικών συστημάτων που παρουσιάστηκαν, για τα Basic και Archieve προϊόντα σε όλες τις ακρίβειες.

ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΠΟΚΤΗΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ RADAR ΑΝΑ ΤΥΠΟ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ					
		ΑΝΑΛΥΣΗ	ΛΩΡΙΔΑ	Παραγγελία νέου προϊόντος	Δεδομένα αρχείου
RADARSAT-1	Fine	8m	50x50 km ²	4.752 ευρώ/σκηνή	1.980 ευρώ/σκηνή
	Standard	30m	100x100 km ²		
	Wide	30m	150x150 km ²		
	ScanSAR narrow	50m	300x300 km ²		
	ScanSAR wide	100m	500x500 km ²		
	Extended high	18-27m	75x75 km ²		
	Extended low	30m	170x170 km ²		
ERS-1/2	SAR Image mode	30m	100x100 km ²	500 ευρώ/σκηνή	400 ευρώ/σκηνή
TerraSAR-X	High Resolution SpotLight	έως 1m	5-10 x 5 km ²	6750 ευρώ/σκηνή	3375 ευρώ/σκηνή
	SpotLight	έως 2m	10 x 10 km ²		
	StripMap	έως 3m	30 x 50 km ²	3750 ευρώ/σκηνή	2625 ευρώ/σκηνή
	ScanSAR	έως 18m	100 x 150 km ²	2750 ευρώ/σκηνή	1925 ευρώ/σκηνή

Πίνακας 2.29: Συγκριτικά οικονομικά στοιχεία απόκτησης δορυφορικών δεδομένων radar ανά τύπο δεδομένων.

Από τον παραπάνω πίνακα παρατηρούμε ότι τα δεδομένα μεγαλύτερης ακρίβειας του TerraSAR-X, χωρίς να αφορούν σε μεγάλες σκηνές, κοστίζουν πολύ περισσότερο από τα υπόλοιπα και ενδείκνυνται για εφαρμογές πολύ υψηλής ακρίβειας (1-3 m). Ωστόσο, οι απεικονίσεις μεσαίας ανάλυσης (18 m) του TerraSAR-X συμφέρουν κατά πολύ περισσότερο από τις αντίστοιχες του RADARSAT-1, καθώς κοστίζουν κατά πολύ λιγότερο και καλύπτουν μεγαλύτερη περιοχή (το εμβαδόν είναι σχεδόν τρεις φορές μεγαλύτερο). Τα προϊόντα των ERS-1/2, αν και δεν παρέχουν τις ποικιλίες λειτουργιών των άλλων δύο δορυφόρων, ενδείκνυνται για εφαρμογές μεσαίας ακρίβειας και μεγάλης κάλυψης λόγω του χαμηλού κόστους παροχής τους – ιδιαίτερα σε σχέση με τα αντίστοιχα προϊόντα του RADARSAT-1. Για εφαρμογές πολύ μεγάλης κάλυψης χωρίς ιδιαίτερα υψηλές απαιτήσεις ακρίβειας (50-100 m) συμφέρουν τα δεδομένα του RADARSAT-1. Οι παρατηρήσεις αυτές ισχύουν και για τους δύο τύπους αρχείων, Basic και Archive. Τελικά, παρατηρείται ότι και στην περίπτωση των radar απεικονίσεων, η βέλτιστη επιλογή εξαρτάται από την εφαρμογή και τις ακρίβειες που απαιτούνται.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

3 Διερεύνηση και ανάπτυξη αλγορίθμου για την αυτόματη ανίχνευση ακτογραμμής

Τα διαθέσιμα ψηφιακά συστήματα επεξεργασίας παρέχουν ολοένα και περισσότερες δυνατότητες *αυτοματισμών* για τη χαρτογράφηση και παρακολούθηση του παγκόσμιου περιβάλλοντος από τα διαθέσιμα τηλεπισκοπικά δεδομένα. Για το σκοπό αυτό, εκτός της φωτοερμηνείας των εναέριων και δορυφορικών απεικονίσεων, ημιαυτόματες και αυτόματες τεχνικές εξαγωγής πληροφοριών αναπτύσσονται και από τα πεδία της Επεξεργασίας Σημάτων και Εικόνας, της Αναγνώρισης Προτύπων, της Όρασης Υπολογιστών και της Τεχνητής Νοημοσύνης. Σκοπός των τεχνικών αυτών είναι αφενός η **βελτίωση της πληροφορίας** – καθώς τα περισσότερα δεδομένα που προέρχονται είτε από τηλεπισκοπικούς δέκτες είτε από σάρωση αναλογικών φωτογραφιών είναι χαμηλής φωτεινότητας (ιδιαίτερα οι δορυφορικές εικόνες) και ανεπαρκούς αντίθεσης ώστε να εμφανίσουν ένα αποδεκτό αποτέλεσμα – και αφετέρου η **χρήση της από αυτόνομα υπολογιστικά συστήματα**.

Καθώς η *εικόνα* και ο *ήχος* αποτελούν τα σημαντικότερα σήματα, κάθε επιστημονικό πεδίο έρευνας σχετικό με την επεξεργασία οπτικής πληροφορίας προσπαθεί να αποκτήσει τις λειτουργίες της ανθρώπινης όρασης. Οι Argialas και Harlow (1990), Γεωργόπουλος Α. (1998) και Καράντζαλος Κ. (2007) αναφέρουν ότι στο πλαίσιο της Όρασης Υπολογιστών οι τεχνικές επεξεργασίας μιας εικόνας μπορούν να διαχωριστούν σε τρία στάδια: (α) χαμηλού επιπέδου τεχνικές (low level techniques), (β) μεσαίου επιπέδου τεχνικές (medium level techniques) και (γ) υψηλού επιπέδου τεχνικές (high level techniques). Ο Καράντζαλος Κ. (2007) σημειώνει ότι η συσχέτιση αυτών με τα πεδία της Τηλεπισκόπησης και της Φωτογραμμετρίας αφορά στις μεθόδους εξαγωγής ποιοτικής και μετρητικής πληροφορίας (πρωταρχικών – σημεία, ακμές, περιγράμματα – ή και θεματικών αντικειμένων), κι επομένως στη γνώση για το σχήμα, τη φασματική υπογραφή και την αλληλεπίδραση των χαρακτηριστικών μιας απεικόνισης.

Βάσει των παραπάνω καθώς και της βιβλιογραφικής ανασκόπησης του Κεφαλαίου 1, τα τρία σημαντικά στάδια για την *εξαγωγή γεωπληροφοριών* είναι η **προ-επεξεργασία**, η **επεξεργασία** και η **μετα-επεξεργασία** των τηλεπισκοπικών δεδομένων. Στο πλαίσιο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας τα στάδια αυτά αφορούν στην ανίχνευση της θέσης της ακτογραμμής, κι επομένως ακμών, η οποία ενυπάρχει στο πρόβλημα της ανίχνευσης ορίων των πεδίων της Όρασης Υπολογιστών και Επεξεργασίας Εικόνας.

Η προ-επεξεργασία των δεδομένων γίνεται με χρήση φιλτραρισμάτων με σκοπό:

(α) την ενίσχυση των στοιχείων ενδιαφέροντος (συγκεκριμένα την ενίσχυση της αντίθεσης των τιμών φωτεινότητας γειτονικών χαρακτηριστικών).

(β) την ομαλοποίηση και απλοποίηση της εικόνας.

(γ) την απαλοιφή του θορύβου.

(δ) την απαλοιφή χαρακτηριστικών σε συγκεκριμένες κλίμακες και τη διατήρηση χαρακτηριστικών σε συγκεκριμένες επιθυμητές κλίμακες.

Τελικός στόχος της προ-επεξεργασίας είναι αφενός η βελτίωση της εμφάνισης και της φωτοερμηνείας της εικόνας, και αφετέρου η βελτίωση της ανιχνευσιμότητας των επιθυμητών χαρακτηριστικών της. Η βελτίωση της ανιχνευσιμότητας των επιθυμητών χαρακτηριστικών έγκειται στη διευκόλυνση των τεχνικών επεξεργασίας να τα «ανιχνεύσουν».

Η επεξεργασία των δεδομένων αφορά στην *εξαγωγή των χαρακτηριστικών ή περιοχών ενδιαφέροντος*, κι εν προκειμένω στην ανίχνευση των ακμών (edge detection). Η διαδικασία αυτή αφορά στον προσδιορισμό των ορίων μεταξύ γειτονικών περιοχών ή αντικειμένων, με βάση τη μεταβολή των τιμών φωτεινότητας των εικονοστοιχείων. Οι τελεστές που χρησιμοποιούνται για το σκοπό αυτό, και ονομάζονται τελεστές ανίχνευσης ακμών, αποτελούν γραμμικούς και μορφολογικούς φορμαλισμούς της πρώτης και της δεύτερης παραγώγου. Ωστόσο, επειδή είναι ευαίσθητοι σε όλες τις εναλλαγές των τιμών φωτεινότητας στο πεδίο της εικόνας, οδηγούν και στην ανίχνευση μη επιθυμητών ή μη πραγματικών ακμών, πρόβλημα τα οποίο λύνεται με τη μέτρηση της εναλλαγής της υφής, κατάτμηση, ταξινόμηση (classification) και συσταδοποίηση (clustering).

Οι μέθοδοι ανίχνευσης ακμών, αν και αποτελούν μια απλή διαδικασία εν συγκρίσει για παράδειγμα με τις μεθόδους κατάτμησης, υποφέρουν από το γεγονός ότι τα εικονοστοιχεία των ακμών που παράγονται από τους τελεστές είναι αρκετά *ασυνεχή* και σπάνια χαρακτηρίζουν εντελώς μια ακτογραμμή. Σε αυτό συμβάλλουν αρνητικά η παρουσία εναπομείναντος θορύβου και η σύνθετη υφή. Η αποκατάσταση αυτού του προβλήματος υπολογιστικά είναι μια απαιτητική διαδικασία ακόμα και σε μια χονδροειδή προσέγγιση. Το στάδιο αυτό είναι η μετα-επεξεργασία της εικόνας, κατά το οποίο *αποκαθίσταται η συνεκτικότητα* των ανιχνευμένων χαρακτηριστικών, με χρήση μορφολογικών μετασχηματισμών και αντίστοιχους αλγόριθμους, και είναι απαραίτητο για τη διαμόρφωση μιας συνεχούς καμπύλης. Τέλος, στάδιο της μετα-επεξεργασίας αποτελεί η ποιοτική αλλά και ποσοτική *αξιολόγηση* των αποτελεσμάτων, με χρήση κατάλληλων δεικτών.

Στο επόμενο εδάφιο αναλύεται το θεωρητικό υπόβαθρο των τεχνικών που αναφέρθηκαν και υλοποιήθηκαν κατά τη μεθοδολογία. Προηγουμένως όμως, περιγράφεται ο τρόπος συλλογής, οι ιδιότητες και η επεξεργασία των εικόνων, με έμφαση στις ψηφιακές εικόνες.

3.1 Θεωρητικό υπόβαθρο

Εικόνα (η) ουσ. [αρχ. *Εικών < είκω (=μοιάζω)*]: ομοίωμα, υλική αναπαράσταση πραγματικού ή φανταστικού αντικειμένου. Εξ' ορισμού, λοιπόν, μια εικόνα αποτελεί αναπαράσταση αντικειμένων του πραγματικού κόσμου, και περιγράφεται από ένα δισδιάστατο (αναλογική και ψηφιακή εικόνα) ή και τρισδιάστατο (video) σήμα. Η

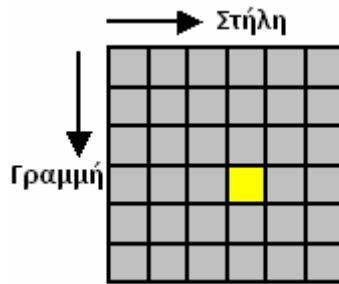
κατανόηση του σχηματισμού των εικόνων είναι απαραίτητη για τη χρήση τους για την εξαγωγή χαρακτηριστικών για τον κόσμο.

Σύμφωνα με τον Καραντζαλο Κ. (2000), η **αναλογική εικόνα** μπορεί να παρασταθεί από πραγματικές συναρτήσεις κι έχει πεπερασμένο μέγεθος. Στη μονόχρωμη μορφή της, μπορεί να παρασταθεί από μια πραγματική συνάρτηση δύο πραγματικών μεταβλητών $f(x, y)$, με $x < L_x$ και $y < L_y$. Η συνάρτηση f μετρά τη φωτεινότητα (τιμή έντασης) της εικόνας στο σημείο (x, y) . Αν η (μονόχρωμη) εικόνα είναι συνεχούς τόνου (grayscale εικόνα που μπορεί να περιέχει όλους τους τόνους του γκρι) οι τιμές της ανήκουν σε ένα διάστημα $[f_b, f_w]$, όπου f_b και f_w οι τιμές των ακραίων εντάσεων του μαύρου και άσπρου χρώματος. Αν έχει μόνο δύο ακραίες αποχρώσεις, τότε είναι δυαδική και παίρνει τιμές (f_b, f_w) . Μια έγχρωμη εικόνα αντιπροσωπεύεται από ένα συνδυασμό τριών πρωταρχικών χρωμάτων – κόκκινο, πράσινο, μπλε – κι επομένως απαιτούνται τρία σήματα (συναρτήσεις) $R(x, y)$, $G(x, y)$, $B(x, y)$ για την παράστασή της. Τέλος, αν η εικόνα είναι κινούμενη (video), τότε χρειάζεται μια ακόμη παράμετρος, η διάσταση του χρόνου, και τότε το σήμα της εικόνας είναι τρισδιάστατο $f(x, y, t)$.

Η **ψηφιακή εικόνα** μπορεί να προκύψει από μια δισδιάστατη δειγματοληψία μιας αναλογικής μονόχρωμης εικόνας. Η δειγματοληψία οδηγεί σε ένα σήμα «διακριτού χώρου» $f(m\Delta x, n\Delta y)$, όπου $m = 0, 1, \dots, M-1$, $n = 0, 1, \dots, N-1$ και Δx , Δy οι περίοδοι δειγματοληψίας στο χώρο. Ο κβαντισμός των εντάσεων των σημείων μιας εικόνας μετά τη δειγματοληψία σε διακριτές τιμές, οδηγεί σε μια ψηφιακή εικόνα, στην οποία το κάθε σημείο κωδικοποιείται χρησιμοποιώντας έναν ψηφιακό αριθμό bits ανά σημείο. Αυτό συμβαίνει γιατί, σύμφωνα με τη Θεωρία Πληροφορίας, είναι αδύνατο ένα μη πεπερασμένο αλφάβητο να κωδικοποιηθεί και να αποθηκευτεί σε ένα ψηφιακό μέσο. Αποφεύγοντας τη μαθηματική αυστηρότητα, μπορεί η αναφορά στην ψηφιακή εικόνα $f(m, n)$ να γίνει θεωρώντας τη ως δισδιάστατη ακολουθία $[f(m, n)]$, $m = 0, 1, \dots, M-1$ και $n = 0, 1, \dots, N-1$. Το σημείο (εικονοστοιχείο ή εικονοψηφίδα: pixel = picture element) εικόνας διαστάσεων $M \times N$ στη θέση (m_0, n_0) έχει τιμή φωτεινότητας $f(m_0, n_0)$, και αποτελεί το μικρότερο στοιχείο της εικόνας (εικόνα 3.1). Τα δύο αυτά στοιχεία καθιστούν δυνατή την αποθήκευση της ψηφιακής εικόνας σε ένα ψηφιακό αρχείο. Σε αντίθεση με την αναλογική εικόνα, όπου το πλήθος των εικονοστοιχείων (κόκκοι της φωτοευαίσθητης επιφάνειας) είναι πρακτικώς άπειρο, κυρίως λόγω του πολύ μικρού μεγέθους τους, στην ψηφιακή εικόνα το πλήθος τους είναι πεπερασμένο.

Κάθε εικονοστοιχείο, λοιπόν, «τακτοποιείται» σε γραμμές και στήλες και η επιφάνειά του αναπαριστά ένα μέρος της γήινης επιφάνειας. Η τιμή φωτεινότητας αναπαριστά τη μετρημένη φυσική ποσότητα, όπως η ηλιακή ακτινοβολία, σε ένα συγκεκριμένο εύρος μήκους κύματος (κανάλι) η οποία ανακλάται από το έδαφος ή το αντικείμενο. Η τιμή αυτή συνήθως είναι η μέση τιμή της περιοχής που καλύπτεται από το εικονοστοιχείο. Όπως αναφέρθηκε και στις αναλογικές εικόνες, ανάλογα με την τιμή φωτεινότητας των εικονοστοιχείων, μια ψηφιακή εικόνα

μπορεί να είναι δυαδική (binary), grayscale, έγχρωμη, ψευδέγχρωμη (false colour), πολυφασματική (multispectral) κ.ά..



Εικόνα 3.1: Ψηφιακή εικόνα.

Ο **τρόπος συλλογής** μιας ψηφιακής εικόνας γίνεται με χρήση δορυφορικών δεκτών, επίγειας λήψης με ψηφιακές μηχανές, αεροφωτογράφισης με συμβατικές (αναλογικές) φωτογραφίες και τη μετέπειτα σάρωσή τους κ.ά.. Οι ψηφιακές εικόνες που προέρχονται από αναλογικές, δημιουργούνται όπως αναφέρθηκε από μετατροπή της αναλογικής εικόνας σε διακριτή συνάρτηση, αρχικώς με μια δειγματοληψία και έπειτα με ένα κβαντισμό. Αυτή η μετατροπή ονομάζεται ψηφιοποίηση (digitization, quantization) και γίνεται συνήθως με σάρωση της εικόνας σε σαρωτές αναλογικών φωτογραφιών. Απευθείας ψηφιακές εικόνες μπορεί να προέρχονται από κάποιο ψηφιακό δέκτη, επίγειο ή δορυφορικό. Στην πρώτη περίπτωση συνήθως χρησιμοποιούνται ψηφιακές μηχανές με τη τεχνολογία CCD (Charge Coupled Device), όπου το ρόλο του κόκκου του φωτογραφικού φιλμ παίζει το φωτοευαίσθητο στοιχείο (sel).

Στην περίπτωση λήψης ψηφιακής εικόνας από δορυφορικό δέκτη, οι εικόνες λαμβάνονται σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα. Τα χαρακτηριστικά αυτά αφορούν στη χωρική, φασματική και ραδιομετρική διακριτική ικανότητα. Η **χωρική** διακριτική ικανότητα της εικόνας καθορίζει τις ελάχιστες διαστάσεις ενός αντικειμένου ικανού να αποτυπωθεί στην ψηφιακή εικόνα. Επομένως, περιγράφει το μέγεθος του εικονοστοιχείου σε πραγματικές διαστάσεις. Όσο μικρότερο είναι το εικονοστοιχείο μιας εικόνας, τόσο υψηλότερη είναι η χωρική διακριτική ικανότητα, καθώς η απεικόνιση των αντικειμένων γίνεται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια. Η **φασματική** διακριτική ικανότητα αναφέρεται στο εύρος του φάσματος που καταγράφει ο δέκτης (κεφάλαιο 2). Εικόνες με μικρό φασματικό εύρος είναι εικόνες υψηλής φασματικής ανάλυσης και προσφέρονται για λεπτομερή επεξεργασία. Η **ραδιομετρική** διακριτική ικανότητα αφορά στον αριθμό των τιμών που μπορεί να πάρει η καταγραφόμενη ακτινοβολία, κι επομένως αναφέρεται στη μικρότερη ανιχνεύσιμη διαφορά μεταξύ των τιμών φωτεινότητας. Η ραδιομετρική ανάλυση ενός τηλεπισκοπικού συστήματος εξαρτάται από το λόγο σήματος-προς-θόρυβο του αισθητήρα. Στην ψηφιακή εικόνα περιγράφεται από το διακριτό αριθμό εντάσεων των σημείων μιας εικόνας μετά τη δειγματοληψία και τον κβαντισμό, δηλαδή τα bits ανά σημείο. Η κατανομή των τιμών αυτών στην εικόνα – δηλαδή η συχνότητα εμφάνισής τους – απεικονίζεται στο ιστόγραμμα της εικόνας, το οποίο περιέχει ραδιομετρική και όχι χωρική πληροφορία, κι επιπλέον δίνει μια εκτίμηση της ποιότητας της εικόνας.

Οι εναέριες και δορυφορικές απεικονίσεις παρέχουν ένα πλούτο γεωπληροφοριών, οι οποίες αποτελούν ένα συνδυασμό πολλαπλών εντάσεων φωτεινότητας που αντιπροσωπεύουν τα διάφορα φυσικά – και μη – χαρακτηριστικά (π.χ. ανθρωπογενείς κατασκευές, βλάστηση, υδρολογικά χαρακτηριστικά, σκιές, κ.ά.). Ωστόσο, τα χαρακτηριστικά αυτά εμφανίζονται σε διάφορα μεγέθη και γεωγραφικές κλίμακες (π.χ. εθνική οδός – μονοπάτι, δάσος – δέντρο, θάλασσα – λίμνη κ.ά.). Σπανίως το επιθυμητό αντικείμενο προς αναγνώριση ανήκει σε μια συγκεκριμένη κλίμακα και όλα τα υπόλοιπα που θα απορριφθούν σε μια άλλη, ούτως ώστε να είναι δυνατή η χρήση της κατωφλίου κλίμακας (Meyer και Maragos, 1999). Στις περισσότερες περιπτώσεις ένα σημασιολογικό αντικείμενο προς ανίχνευση είναι υπαρκτό σε πολλές κλίμακες. Για το λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί *αναπαραστάσεις πολλαπλών κλιμάκων* (scale – space representations), όπου η αναγνώριση των αντικειμένων γίνεται χρησιμοποιώντας μεγάλες αναπαραστάσεις της ίδιας εικόνας (Meyer και Maragos, 1999). Η σημασία της προσέγγισης αυτής έχει αναγνωριστεί από τα αρχικά στάδια ανάπτυξης του πεδίου της Όρασης Υπολογιστών.

Στόχος των φιλτραρισμάτων χώρων κλίμακας είναι η *ενίσχυση, απλοποίηση και ομαλοποίηση* των τηλεσκοπικών δεδομένων με ταυτόχρονη *διατήρηση των ακμών* των αντικειμένων. Για το σκοπό αυτό έχουν αναπτυχθεί κλασσικές και προηγμένες τεχνικές φιλτραρισμάτων σε χώρους κλίμακας, οι οποίες και περιγράφονται στα επόμενα εδάφια. Κλασσικές τεχνικές αποτελούν η ιστροπική ομαλοποίηση και τα γκαουσιανά φιλτραρίσματα, καθώς και τα μορφολογικά φίλτρα (διαστολή – dilation, διάβρωση – erosion, άνοιγμα – opening, κλείσιμο – closing). Βασικό μειονέκτημα των ιστροπικών φιλτραρισμάτων είναι η ενιαία ομαλοποίηση των δεδομένων κι επομένως η ομαλοποίηση των ακμών. Παράλληλα, βασικό μειονέκτημα των μορφολογικών dilation και erosion είναι η μετατόπιση των ακμών κατά την αλλαγή κλίμακας (Jackway και Deriche, 1996), ενώ τα openings (σειριακές συνθέσεις διαστολών και διαβρώσεων) μετατοπίζουν τις οριζόντιες ακμές – αν και δεν μετατοπίζουν τις κατακόρυφες και δεν δημιουργούν ψευδή ακρότατα (δηλαδή ψευδή μέγιστα στις τιμές φωτεινότητας) (Meyer και Maragos, 1999).

Προς την κατεύθυνση ομαλοποίησης και ταυτόχρονα διατήρησης των ακμών και της θέσης τους, αναπτύχθηκαν οι **προηγμένες τεχνικές** της ανιστροπικής διάχυσης (anisotropic diffusion) και της μορφολογικής εξομάλυνσης (morphological levelings), καθώς και η ανιστροπική μορφολογική εξομάλυνση (anisotropic morphological leveling) που αποτελεί συνδυασμό των δύο τεχνικών.

3.1.1 Ανασκόπηση τεχνικών ιστροπικής και ανιστροπικής διάχυσης

Μια πολλαπλών κλιμάκων αναπαραστάση ορίζεται πλήρως όταν οριστεί ο μετασχηματισμός από τη μικρή στη μεγάλη κλίμακα (Meyer και Maragos, 1999). Αρχικά, ο **Witkin (1983)** εισήγαγε την ιδέα του φιλτραρίσματος σε χώρους κλίμακας συσχετίζοντας μια κλίμακα με μια άλλη, χρησιμοποιώντας **συνελίξεις** μιας εικόνας με κυμαινόμενα **γκαουσιανά** φίλτρα G , λόγω της συμμετρίας και της

σταθερότητάς τους στις κλίμακες (η γκαουσιανή συνέλιξη έχει «καλή συμπεριφορά» στα όρια της τυπικής απόκλισης),

$$G_{\sigma}(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

όπου σ η τυπική απόκλιση. Μεγάλο σ αντιστοιχεί σε εικόνα μεγαλύτερης κλίμακας. Απέδειξε, δε, ότι είναι ο μοναδικός τελεστής που ικανοποιεί τα κριτήρια αυτά.

Όπως σημειώνουν οι Perona και Malik (1990) και ο Καράντζαλος Κ. (2007), η αναπαράσταση πολλαπλών κλιμάκων αποτέλεσε μετέπειτα ένα σημαντικό κομμάτι έρευνας. Αναφέρουν ότι το **1984** ο **Koenderink** απέδειξε ότι η συνέλιξη μιας αρχικής εικόνας $I_0(x, y)$ με ένα γκαουσιανό φίλτρο G , ενσωματώνει την εικόνα σε μια οικογένεια βαθμιαία ομαλοποιημένων εικόνων $I(x, y, t)$,

$$I(x, y, t) = I_0(x, y) * G(x, y, t) \quad (2)$$

όπου t η παράμετρος κλίμακας. Επιπλέον, σημειώνουν ότι τόσο ο Koenderink όσο και ο Hummel το 1986 έδειξαν ότι η συνέλιξη αυτή είναι η γενική λύση της μερικής διαφορικής εξίσωσης:

$$\frac{\partial I(x, y, t)}{\partial t} = \text{div}(\nabla I) \quad (3)$$

όπου div (divergence) ο τελεστής προσδιορισμού της απόκλισης και ∇I η πρώτη παράγωγος της εικόνας. Η λύση αυτή ισοδυναμεί με τη λύση της εξίσωσης θερμότητας ή εξίσωση διάχυσης:

$$I_t = c \cdot \Delta I = c \cdot (I_{xx} + I_{yy}) \quad (4)$$

με αρχική συνθήκη την αρχική εικόνα ($I(x, y, 0) = I_0(x, y)$). Ο φορμαλισμός της εξίσωσης διάχυσης από τον Koenderink γίνεται με κριτήρια αιτιότητας, ομογένειας και ισοτροπικότητας. Σύμφωνα με το κριτήριο αιτιότητας, δεν μπορούν να δημιουργηθούν νέες λεπτομέρειες κατά την ελάττωση της χωρικής ανάλυσης (δηλαδή από τις μικρές στις μεγάλες κλίμακες). Το δεύτερο κριτήριο ομογένειας και ισοτροπικότητας του «θολώματος» (blurring) αντικατέστησαν αρχικά οι Perona και Malik (1990).

Τελικά, αν και η προσέγγιση της θεωρίας των γραμμικών χώρων κλίμακας έχει το πλεονέκτημα υπολογισμού παραγώγων, η γραμμικότητά της αποτελεί σημαντικό μειονέκτημα (Perona και Malik, 1990, Meyer και Maragos, 1999). Η ομαλοποίηση της εικόνας είναι ενιαία για όλα τα χαρακτηριστικά της, και των περιοχών ενδιαφέροντος όπως οι ακμές. Επιπλέον, η διατήρηση της θέσης των σημασιολογικών ακμών είναι δύσκολη στις μεγάλες κλίμακες, λόγω του υπερβάλλοντος «θολώματος» (blurring) και της παρουσίας ψευδών ακρότατων (spurious extrema) στις δυο διαστάσεις. Η ανάγκη ομαλοποίησης με ταυτόχρονη διατήρηση των ακμών οδήγησε στις **μη γραμμικές τεχνικές της ανισοτροπικής διάχυσης** (anisotropic diffusion) και της **μορφολογικής εξομάλυνσης** (morphological levelings).

Ο Καράντζαλος Κ. (2007) σημειώνει ότι αρχικά η τεχνική της ανιστροπικής διάχυσης είχε προταθεί από τους Cohen και Grossberg το 1984, για τη μοντελοποίηση, σε βιολογικά συστήματα όρασης, των διαδικασιών στον πρωταρχικό οπτικό φλοιό. Τέσσερα χρόνια αργότερα, οι **Perona και Malik (1990)** διατύπωσαν τη συγκεκριμένη τεχνική για την επεξεργασία εικόνων. Όπως σημειώθηκε, κύριος στόχος της ήταν η αντικατάσταση του δεύτερου κριτηρίου ομογένειας και ισοτροπικότητας της εξίσωσης διάχυσης του Koenderink (3), καθώς το γκαουσιανό blurring δεν «σέβεται» τα φυσικά όρια των αντικειμένων. Τα κριτήρια που πρέπει να ικανοποιούνται κατά την αναπαράσταση «σημασιολογικά σημαντικών» αντικειμένων σε πολλαπλές κλίμακες (multi-scale ‘semantically meaningful’ descriptions) είναι : **(α)** η αιτιότητα, **(β)** σε κάθε ανάλυση τα όρια των αντικειμένων είναι έντονα ορισμένα και γεωμετρικά ορθά με βάση την ανάλυση αυτή, και **(γ)** η ομαλοποίηση να γίνεται ιεραρχικά.

Η μη γραμμική **ανιστροπική εξίσωση διάχυσης** των Perona και Malik που ικανοποιεί τα παραπάνω κριτήρια και με την οποία αντικατέστησαν την εξίσωση θερμότητας, είναι η:

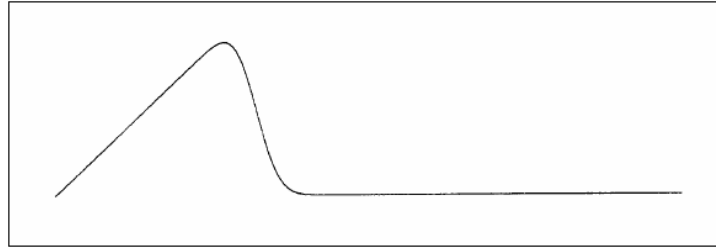
$$\frac{\mathcal{G}I(x, y, t)}{\mathcal{G}t} = \text{div}[g(\|\nabla I\|)\nabla I] \quad (5)$$

όπου $\|\nabla I\|$ είναι η ένταση της κλίσης των τιμών φωτεινότητας (gradient magnitude) και g είναι μια μη αρνητική φθίνουσα συνάρτηση «παύση ομαλοποίησης λόγω ακμής» – για την οποία ισχύει $g(0)=1$, $g(s) \geq 0$ και $\lim_{s \rightarrow \infty} g(s) = 0$ – ούτως ώστε η διάχυση να λαμβάνει χώρα εντός ενός αντικειμένου και να μην επηρεάζει το περίγραμμά του, το οποίο δίνεται από την ένταση της πρώτης παραγώγου $\|\nabla I\|$, διατηρώντας το και παράλληλα ενισχύοντάς το. Έτσι, εάν η ένταση $\|\nabla I\|$ είναι μικρή, η διάχυση είναι ισχυρή. Εάν είναι μεγάλη σε ένα εικονοστοιχείο, τότε σε αυτό είναι πιθανή η ύπαρξη ακμής και η διάχυση είναι ασθενής.

Οι Perona και Malik προτείνουν δύο συναρτήσεις g : $g(\nabla I) = e^{\left(-\left(\frac{\|\nabla I\|}{K}\right)^2\right)}$ (6) και

$$g(\nabla I) = \frac{1}{1 + \left(\frac{\|\nabla I\|}{K}\right)^2} \quad (7).$$

Ανάλογα με την τιμή του K , δεδομένου ενός κατωφλίου, η συνάρτηση ομαλοποιεί μικρές ασυνέχειες (αύξουσα) ή ενισχύει τις ακμές (φθίνουσα) (σχήμα 3.1).



Σχήμα 3.1: Η επιλογή της συνάρτησης g που οδηγεί στην ενίσχυση των ακμών (Perona and Malik, 1990).

Ωστόσο, όπως είχαν επισημάνει και οι Perona και Malik (1990), ο αλγόριθμος δεν είναι αποτελεσματικός σε εικόνες με πολύ θόρυβο, γιατί οι υψηλές τιμές της παραγώγου στα σημεία αυτά έχουν ως αποτέλεσμα την ανίχνευσή του. Τον αλγόριθμο ανισοτροπικής διάχυσης των Perona και Malik (1990), οι οποίοι εισήγαγαν την ανίχνευση ακμών κατά το φιλτράρισμα, βελτίωσαν σημαντικά οι **Alvarez et al. (1992)**, οι οποίοι σημειώνουν ένα ακόμα μειονέκτημα της μεθοδολογίας που περιγράφηκε και αφορά στη συνάρτηση g . Υποστηρίζουν ότι, αν και για την ύπαρξη και μοναδικότητα των λύσεων η g – της μορφής $g(s) = e^{-s}$ ή $g(s) = (1 + s^2)^{-1}$ – θα πρέπει να επαληθεύει ότι η $sg(s)$ είναι αύξουσα, ωστόσο υπάρχουν συναρτήσεις για τις οποίες η $sg(s)$ είναι φθίνουσα. Όταν μια τέτοια περίπτωση λειτουργεί ως αρχική συνθήκη, αυτό πρακτικά σημαίνει ότι πολύ κοντινές εικόνες εμφανίζουν διαφορετικές ακμές.

Ο αλγόριθμος των Alvarez et al. (1992) αποτελεί μια βελτίωση της (5), με βασική τροποποίηση την αντικατάσταση της πρώτης παραγώγου από την τοπική εκτίμησή της για την απαλοιφή του θορύβου, και είναι βασισμένη στη μερική διαφορική εξίσωση:

$$\frac{\partial I(x, y, t)}{\partial t} = g(|G_\sigma * \nabla I|) |\nabla I| \operatorname{div} \left(\frac{\nabla I}{|\nabla I|} \right) \quad (8)$$

όπου $I(x, y, 0) = I_0(x, y)$ η αρχική εικόνα με τιμές φωτεινότητας στην κλίμακα του γκρι (grayscale), $I(x, y, t)$ είναι η ομαλοποιημένη εικόνα βάσει της t παραμέτρου κλίμακας, $g(s)$ είναι η φθίνουσα συνάρτηση «παύση ομαλοποίησης λόγω ακμής» για την οποία $g(0) = 1$, $g(s) \geq 0$ και $\lim_{s \rightarrow \infty} g(s) = 0$, G_σ είναι ένας τελεστής ομαλοποίησης (π.χ. 2D γκαουσιανή συνάρτηση) κι επομένως ο όρος $G_\sigma * \nabla I$ είναι η τοπική προσέγγιση της παραγώγου για την απαλοιφή του θορύβου.

Ο όρος $|\nabla I| \operatorname{div} \left(\frac{\nabla I}{|\nabla I|} \right)$ ομαλοποιεί την εικόνα $I(x, y)$ σε κατεύθυνση κάθετα της κλίσης των τιμών φωτεινότητας $|\nabla I|$ και δεν την ομαλοποιεί καθόλου σε κατεύθυνση παράλληλα της κλίσης $|\nabla I|$. Ο σκοπός του όρου ομαλοποίησης είναι η ομαλοποίηση εκατέρωθεν της ακμής με ελάχιστη ομαλοποίηση της ίδιας της ακμής, κατά μήκος της οποίας η παράγωγος έχει μεγάλη τιμή. Ο όρος αντίθεσης $g(|G_\sigma * \nabla I|)$ χρησιμοποιείται για την ενίσχυση των ακμών, ελέγχοντας την

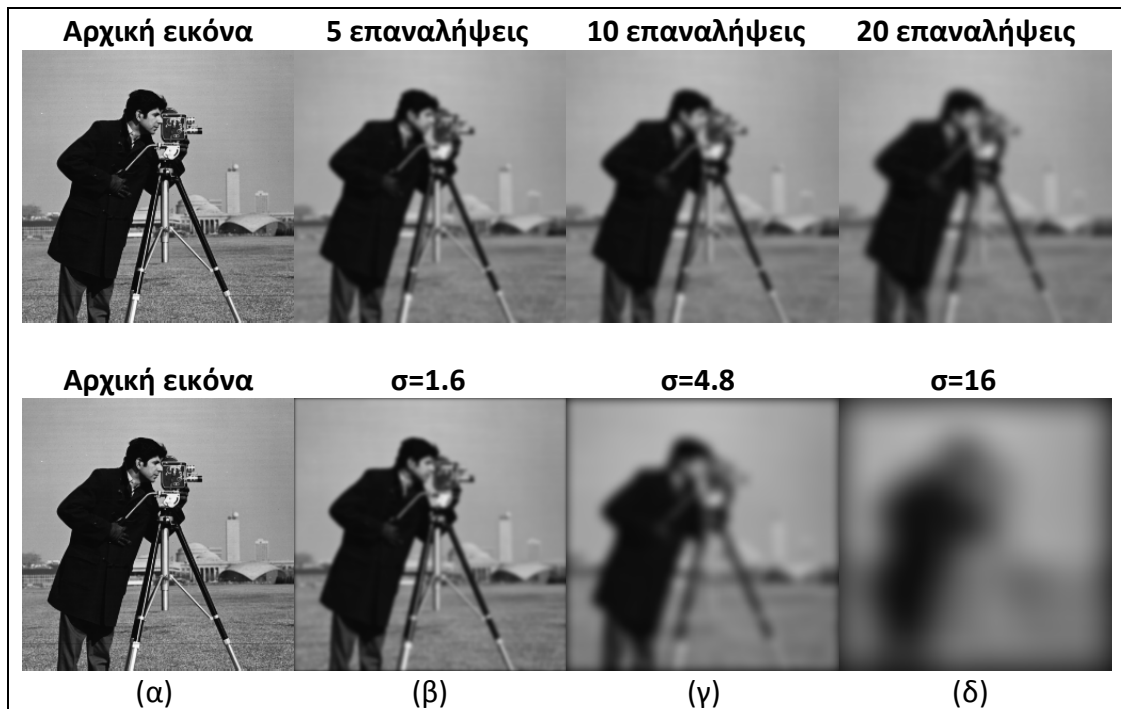
ταχύτητα της διάχυσης. Πράγματι, εάν η $|\nabla I|$ έχει χαμηλή μέση τιμή σε μια γειτονιά ενός εικονοστοιχείου x , το σημείο αυτό θεωρείται εσωτερικό μιας ομαλοποιημένης περιοχής και η διάχυση είναι ισχυρή. Εάν η $|\nabla I|$ έχει υψηλή μέση τιμή στη γειτονιά του x , το εικονοστοιχείο θεωρείται ως σημείο ύπαρξης ακμής, η ταχύτητα της διάχυσης μειώνεται – εφόσον η $g(s)$ είναι μικρή για μεγάλο s – κι επομένως η ομαλοποίηση είναι ασθενής.

Οι **Black et al. (1998)** αναφέρουν ότι μετά το φορμαλισμό της ανισοτροπικής διάχυσης από τους Perona και Malik (1990), ένα αξιοσημείωτο κομμάτι της έρευνας έχει αφιερωθεί στη θεωρητική και πρακτική κατανόηση μεθόδων ενίσχυσης εικόνας, ανάμεσα σε αυτές και ο αλγόριθμος των Alvarez et al. (1992). Αντικείμενο της έρευνας αποτέλεσαν η κατανόηση των μαθηματικών ιδιοτήτων του φιλτραρίσματος ανισοτροπικής διάχυσης και των σχετικών μεταβολικών φορμαλισμών, οι οποίοι αφενός αναπτύσσουν τις σχετικά καλά ορισμένες (well-posed) και σταθερές (stable) εξισώσεις ανισοτροπικής διάχυσης, αφετέρου επεκτείνουν και τροποποιούν τον αλγόριθμο για ταχείες και ακριβείς υλοποιήσεις, και μελετούν τις σχέσεις της ανισοτροπικής διάχυσης με άλλους τελεστές επεξεργασίας εικόνας.

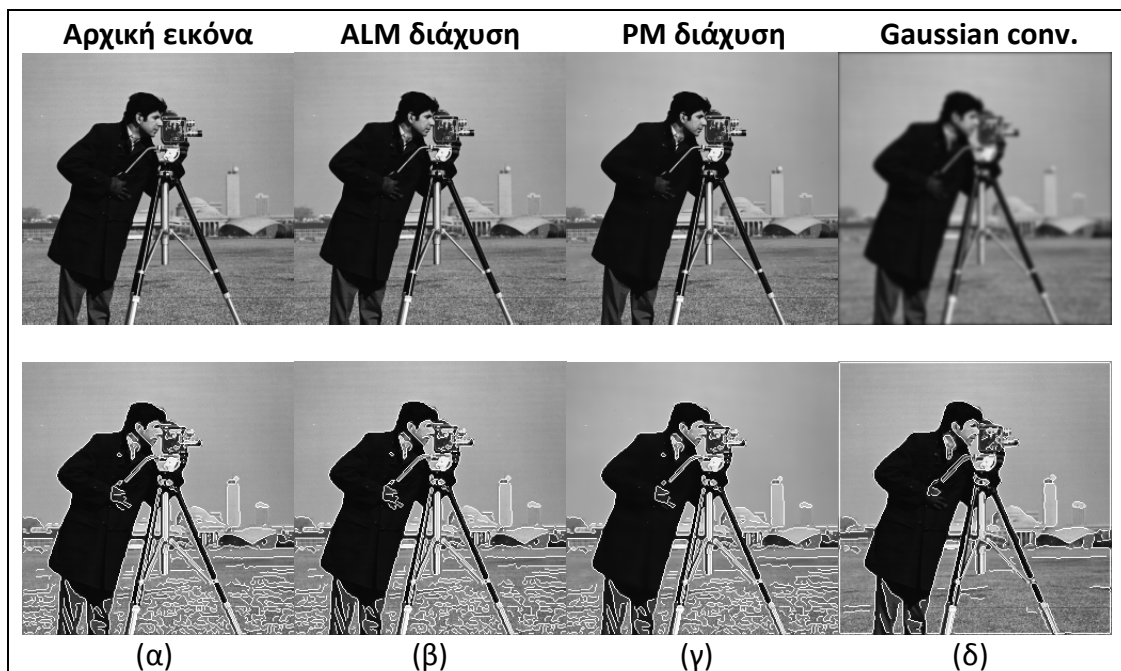
Οι Black et al. (1998) αναπτύσσουν μια ανθεκτική (robust) μεθοδολογία ανισοτροπικής διάχυσης από στατιστικής πλευράς, βάσει ανθεκτικών στατιστικών εκτιμητών. Σημειώνεται ότι το πεδίο των ανθεκτικών στατιστικών σχετίζεται με προβλήματα εκτίμησης δεδομένων που εμπεριέχουν μεγάλα σφάλματα (gross errors) ή ακραίες τιμές (outliers). Απέδειξαν ότι η ανισοτροπική διάχυση των Perona και Malik ισοδυναμεί με μια ανθεκτική διαδικασία εκτίμησης, η οποία υπολογίζει μια κατά τμήματα (piecewise) ομαλή εικόνα από μια θορυβώδη εικόνα εισόδου, κι επομένως ότι μια τέτοια εικόνα μπορεί να εκτιμηθεί χρησιμοποιώντας τα εργαλεία των ανθεκτικών στατιστικών. Επίσης, σημειώνουν ότι η συνάρτηση «παύση ομαλοποίησης λόγω ακμής» της ανισοτροπικής διάχυσης των Perona και Malik, σχετίζεται έμμεσα με τη νόρμα λάθους – ένας τρόπος υπολογισμού του σφάλματος που εμπεριέχεται σε ένα στοιχείο – και τη συνάρτηση επιρροής στο ανθεκτικό στατιστικό πλαίσιο εκτίμησης – μια συνάρτηση ανάλογη με την πρώτη παράγωγο της νόρμας λάθους, που χαρακτηρίζει τη «διαστρέβλωση» της λύσης από μια συγκεκριμένη μέτρηση.

Οι Black et al. (1998), επιλέγοντας εναλλακτικές ανθεκτικές νόρμες λάθους, καταλήγουν στην επιλογή διαφορετικών συναρτήσεων «παύση ομαλοποίησης λόγω ακμής», και συγκεκριμένα προτείνουν μια καινούργια συνάρτηση βασισμένη στο διβαρικό ανθεκτικό εκτιμητή Tukey, διατηρώντας πιο έντονες τις ακμές κατά την ομαλοποίηση σε σχέση με προηγούμενους φορμαλισμούς, βελτιώνοντας τη συνέχειά τους καθώς και την αυτόματη παύση της διάχυσης.

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται μια ποιοτική σύγκριση της γκαουσιανής συνέλιξης για ποικίλο αριθμό επαναλήψεων και τυπικών αποκλίσεων. Επιπλέον, παρατίθεται ποιοτική σύγκριση της ισοτροπικής ομαλοποίησης με τις τεχνικές ανισοτροπικής διάχυσης PM (Perona και Malik) και ALM (Alvarez et al.) για φιλτράρισμα 10 επαναλήψεων στην εικόνα cameraman.tif από τη βιβλιοθήκη του Matlab. Η ανίχνευση των ακμών έγινε με τον τελεστή Canny.

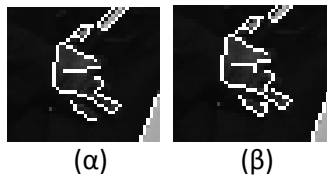


Εικόνα 3.2: Πρώτη σειρά (α) Αρχική εικόνα (β) Συνέλιξη με φίλτρο Gauss, τυπικής απόκλισης $\sigma=1.6$, για 5 επαναλήψεις (γ) 10 επαναλήψεις (δ) 20 επαναλήψεις. Δεύτερη σειρά (α) Αρχική εικόνα (β) Συνέλιξη με φίλτρο Gauss, για τυπική απόκλιση $\sigma=1.6$ (γ) $\sigma=4.8$ (δ) $\sigma=16$.



Εικόνα 3.3: Πρώτη σειρά (α) Αρχική εικόνα (β) Ανισοτροπική διάχυση ALM (γ) Ανισοτροπική διάχυση PM (δ) Συνέλιξη της αρχικής εικόνας με φίλτρο Gauss, με τυπική απόκλιση $\sigma=1.6$. Δεύτερη σειρά (α) Ανίχνευση ακμών στην αρχική εικόνα (β) Ανίχνευση ακμών στην ομαλοποιημένη εικόνα με ALM διάχυση (γ) Ανίχνευση ακμών στην ομαλοποιημένη εικόνα με PM διάχυση (δ) Ανίχνευση ακμών στην ομαλοποιημένη εικόνα με γκαουσιανή συνέλιξη.

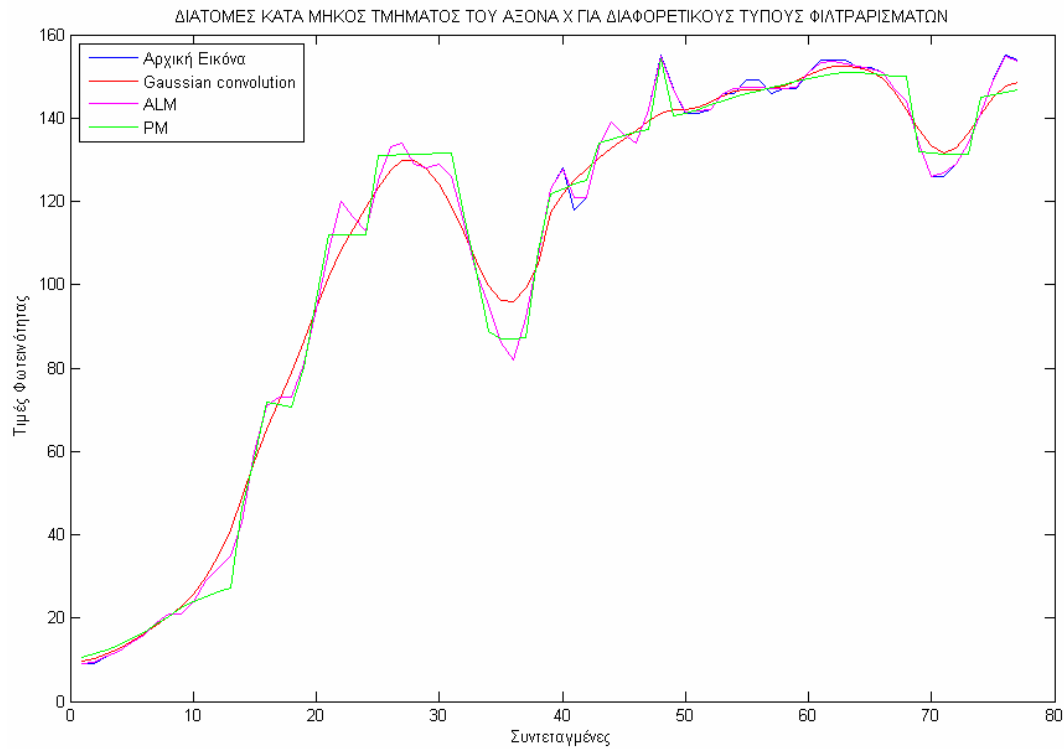
Είναι εμφανές ότι η εφαρμογή ενός φίλτρου Gauss σε μια εικόνα επιφέρει ομοιογενή ομαλοποίηση εξαιτίας της ιστροπικότητάς του, με αποτέλεσμα να διατηρούνται οι βασικές ακμές. Όσο αυξάνονται οι επαναλήψεις ή η τυπική απόκλιση, η εφαρμογή του συγκεκριμένου τελεστή δημιουργεί ακόμα πιο ενιαία ομαλοποιημένη εικόνα και οι ακμές εμφανίζονται μετατοπισμένες από τα ακριβή όρια των αντικειμένων (εικόνες 3.2 και 3.3). Παρατηρείται λοιπόν η εμφάνιση αντικειμένων που δεν αντιστοιχούν στην πραγματικότητα, μη οριοθετώντας κάποιο συγκεκριμένο χαρακτηριστικό της εικόνας. Η PM ανισοτροπική διάχυση οδηγεί σε πολύ καλύτερα αποτελέσματα διατηρώντας περισσότερες ακμές, αλλά ωστόσο λιγότερες από την ALM ανισοτροπική διάχυση, με σημαντικότερο μειονέκτημα την απαλοιφή μικρών αντικείμενων στην εικόνα. Η ALM ανισοτροπική διάχυση αποτελεί σαφώς ανώτερη μεθοδολογία, καθώς είναι γεωμετρικά καθοδηγούμενη. Ενισχύοντας και τις πιο μικρές ακμές, είναι δυνατή η ανίχνευση στοιχείων που ακόμα και στην αρχική εικόνα που δεν έχει υποστεί καμία προ-επεξεργασία δεν ανιχνεύονται (εικόνα 3.4). Τα αποτελέσματα χαρακτηρίζονται από μεγάλη χωρική ακρίβεια, καθώς ακόμα και σε ισχυρό φιλτράρισμα η ομαλοποίηση δεν είναι έντονη, ανιχνεύονται αντικείμενα με μικρές διαφορές φωτεινότητας και η θέση των ανιχνευμένων ακμών δεν αλλοιώνεται (σταθερά αποτελέσματα). Τέλος, παρατηρείται έντονη ομοιότητα όσον αφορά στη δομή της φιλτραρισμένης με ALM εικόνας με την αρχική.



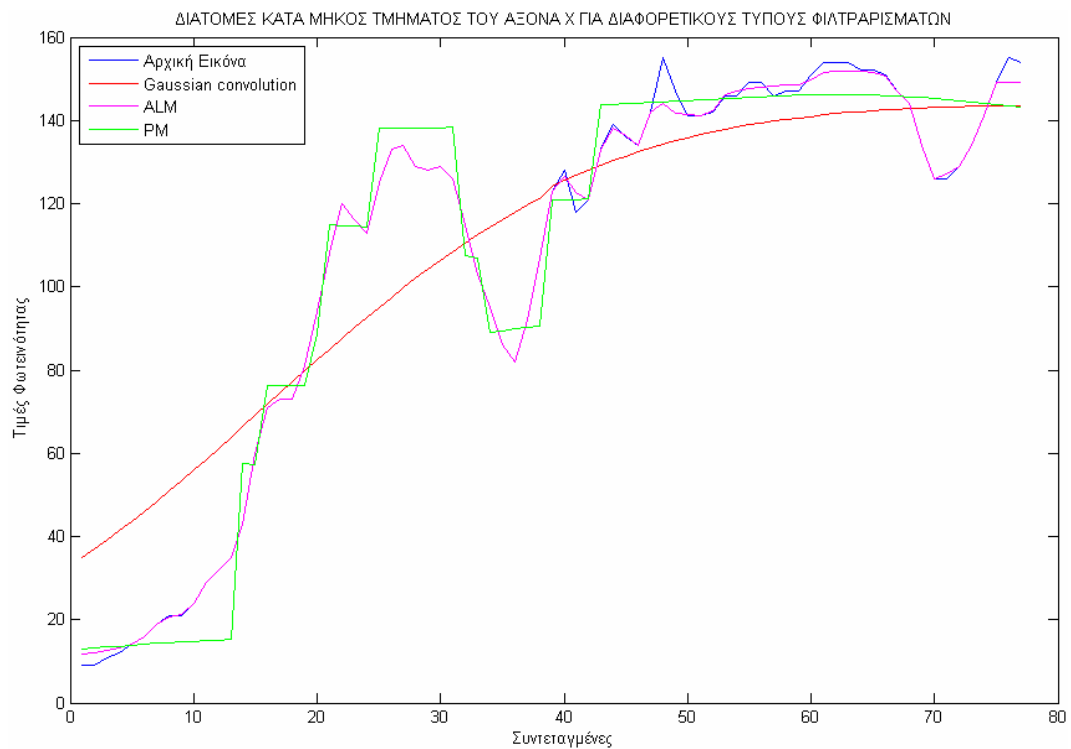
Εικόνα 3.4: (α) Ανίχνευση αντικειμένου της εικόνας *cameraman.tif* χωρίς προ-επεξεργασία, (β) Ανίχνευση του ίδιου αντικειμένου έπειτα από περιορισμένο φιλτράρισμα ALM (10 επαναλήψεις).

Στα σχήματα 3.2 και 3.3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα – σε διατομές κατά μήκος τμήματος του άξονα x – της εφαρμογής των φιλτραρισμάτων που παρουσιάστηκαν (γκουουσιανή συνέλιξη, PM ανισοτροπική διάχυση και ALM ανισοτροπική διάχυση) για περιορισμένο και μεγάλο αριθμό επαναλήψεων (20 και 300 επαναλήψεις, αντίστοιχα). Η εικόνα δοκιμών είναι μια δορυφορική εικόνα QUICKBIRD, και συγκεκριμένα το υπέρυθρο κανάλι. Οι ακμές οπτικοποιούνται από τις έντονες διαφορές στις τιμές φωτεινότητας. Είναι εμφανής η έντονη ιστροπική ομαλοποίηση χωρίς διατήρηση των ακμών (κόκκινη γραμμή) σε σχέση με την αρχική εικόνα (μπλε γραμμή). Η PM ανισοτροπική διάχυση (πράσινη γραμμή) για μεγάλο αριθμό επαναλήψεων φαίνεται ότι διατηρεί μόνο τις πιο ισχυρές ακμές, όπως και η γκουουσιανή συνέλιξη. Η ALM ανισοτροπική διάχυση, ωστόσο, διατηρεί όλες τις βασικές ακμές της εικόνας, ακολουθώντας τα ύψη των τιμών φωτεινότητας και τις μεταβολές τους. Παράλληλα, φαίνεται να ομαλοποιεί ομοιογενή στοιχεία της εικόνας που χαρακτηρίζονται από μικρές μεταβολές στις τιμές φωτεινότητας. Ακόμα και μετά από 300 επαναλήψεις, ο αλγόριθμος δίνει σταθερά αποτελέσματα, σε αντίθεση με τον PM που διατηρεί μόνο τις πιο ισχυρές ακμές, όπως τονίστηκε. Είναι

σαφές ότι και οι δύο μέθοδοι ανιστροπικής διάχυσης δίνουν καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με τη γκαουσιανή συνέλιξη.

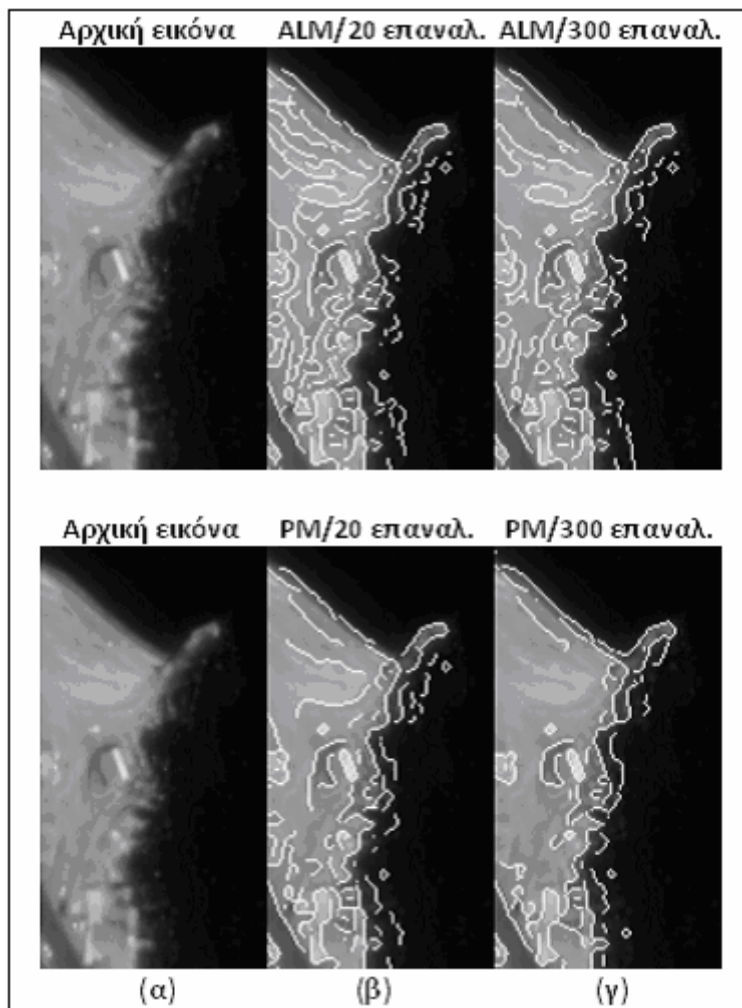


Σχήμα 3.2: Διατομές κατά μήκος τμήματος του άξονα χ εικόνας QUICKBIRD, για διάφορους τύπους περιορισμένων φιλτραρισμάτων διάχυσης.



Σχήμα 3.3: Διατομές κατά μήκος τμήματος του άξονα χ εικόνας QUICKBIRD, για διάφορους τύπους ισχυρών φιλτραρισμάτων διάχυσης.

Στην εικόνα 3.5 παρουσιάζεται ποιοτική σύγκριση των φιλτραρισμάτων ανισοτροπικής διάχυσης PM και ALM, σε ένα τμήμα της δορυφορικής εικόνας QUICKBIRD, για 20 και 300 επαναλήψεις. Η ανίχνευση των ακμών έγινε με τον τελεστή Canny. Παρατηρείται και σε αυτή την περίπτωση η σταθερότητα του ALM όσον αφορά στην ενίσχυση των ακμών και στην ακρίβεια της θέσης τους. Εν αντιθέσει, ο αλγόριθμος PM εντοπίζει πολύ λιγότερες ακμές, μεταβάλλει τις θέσεις τους μετά από μεγάλο αριθμό επαναλήψεων, ενώ απαλείφονται μικρά αντικείμενα της εικόνας που αποτελεί, όπως σημειώθηκε, και το μεγαλύτερο μειονέκτημά του. Φαίνεται ότι ο αλγόριθμος, μετά από ισχυρό φιλτράρισμα, τείνει να διατηρεί μόνο τις βασικές ακμές της εικόνας.



Εικόνα 3.5: Πρώτη σειρά (α) Αρχική εικόνα (β) Ανίχνευση ακμών με τον τελεστή Canny έπειτα από φιλτράρισμα ALM 20 επαναλήψεων (γ) Ανίχνευση ακμών με τον τελεστή Canny έπειτα από φιλτράρισμα ALM 300 επαναλήψεων. Δεύτερη σειρά (α) Αρχική εικόνα (β) Ανίχνευση ακμών με τον τελεστή Canny έπειτα από φιλτράρισμα PM 20 επαναλήψεων (γ) Ανίχνευση ακμών με τον τελεστή Canny έπειτα από φιλτράρισμα PM 300 επαναλήψεων.

3.1.2 Ανασκόπηση τεχνικών μορφολογικής εξομάλυνσης

Η εξαγωγή αντικειμένων από ψηφιακές εικόνες απαιτεί τεχνικές ανάλυσης εικόνας άμεσα συσχετισμένες με τη *δομή* της. Οι τεχνικές αυτές πρέπει να επεξεργάζονται τα «σχήματα» που εμπεριέχονται στην εικόνα. Τα εργαλεία της **Μαθηματικής Μορφολογίας** βοηθούν στη γνώση της δομής μιας εικόνας, με στόχο την εξαγωγή χαρακτηριστικών από αυτή.

Η Μαθηματική Μορφολογία «γεννήθηκε» το 1964 μέσα από τη συνεργασία των **Georges Matheron** και **Jean Serra**, οι οποίοι καθιέρωσαν το βασικό σκεπτικό και τα εργαλεία. Επινόησαν το όνομα «μαθηματική μορφολογία» το 1966 και το 1968 ίδρυσαν στο Ecole des Mines στο Παρίσι το τμήμα “Centre de Morphologie Mathématique”. Ωστόσο, μεγάλη αναγνώριση γνώρισε από το 1975 και μετά, όταν ο Georges Matheron πρότεινε την έννοια των μορφολογικών φιλτραρισμάτων συναρτήσεως κλίμακας για τη μελέτη και επεξεργασία γεωτεχνικών εικόνων (Mathematical Morphology: 40 Years On, 2005, Meyer και Maragos, 1999).

Η συγκεκριμένη τεχνική επεξεργασίας εικόνων, όπως παρουσιάστηκε μέσα από τη συνεργασία των Matheron και Serra τη δεκαετία του 1980, είναι μια μη γραμμική διαδικασία κατά την οποία με χρήση κατάλληλων τελεστών και πράξεων μετασχηματίζεται η μορφή ενός αντικειμένου ή εξαγονται κάποια χαρακτηριστικά της. Σημειώνεται ότι ως *αντικείμενο* ορίζεται ένα σύνολο σημείων, και οι τελεστές που ορίζονται χρησιμοποιούν ένα αντικείμενο αντίστοιχο του επιδιωκόμενου στόχου, που ονομάζεται *δομικό στοιχείο* (structuring element). Τελικά, οι μορφολογικές πράξεις ορίζονται με τη βοήθεια των κλασσικών πράξεων και σχέσεων μεταξύ συνόλων, ενώ η εφαρμογή τους γίνεται σε δυαδικά και gray-level σήματα.

Οι βασικές λειτουργίες της μαθηματικής μορφολογίας είναι αυτές που:

(α) διατηρούν τα πλήρη πλέγματα (complete lattices), δηλαδή τις σχέσεις διάταξης (ordering relations) όπως αυτές ορίζονται από τη δομή του πεδίου εργασίας, και

(β) αντιστοιχούν στα βασικά στοιχεία των complete lattices, το ‘supremum’ (το ελάχιστο άνω φράγμα) και το ‘infimum’ (το μέγιστο κάτω φράγμα) (J.R. Casas, 1996).

Ένα complete lattice είναι ένα σύνολο P , τέτοιο ώστε:

(α) ορίζεται η μερική σχέση διάταξης \leq :

$$A \leq A$$

$$A \leq B, B \leq A \Rightarrow A = B$$

$$A \leq B, B \leq C \Rightarrow A \leq C$$

(β) για κάθε οικογένεια των στοιχείων $\{X_i\} \in P$ (υποσύνολα του P) υπάρχει ένα ‘supremum’ και ένα ‘infimum’:

‘infimum’: μέγιστο άνω φράγμα $\wedge \{X_i\}$

‘supremum’: ελάχιστο άνω φράγμα $\vee \{X_i\}$

Οι βασικές λειτουργίες που διατηρούν τις σχέσεις διάταξης είναι οι **τελεστές** της *διαστολής*- dilation και της *διάβρωσης*-erosion (J.R. Casas, 1996):

Η διαστολή: $\delta(\vee \{X_i\}) = \vee \{\delta(X_i)\}$, αντιστοιχεί στο ‘supremum’.

Η διάβρωση: $\varepsilon(\wedge \{X_i\}) = \wedge \{\varepsilon(X_i)\}$, αντιστοιχεί στο ‘infimum’.

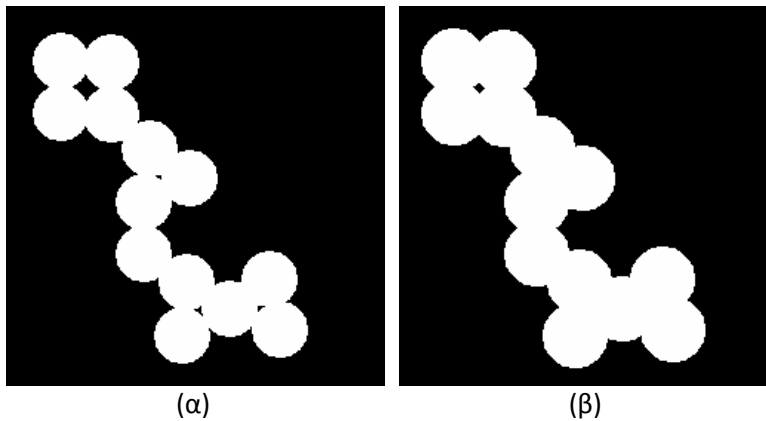
Στην ανάλυση εικόνας, ένα δυαδικό σήμα (binary signal) μπορεί να θεωρηθεί ως ένα σύνολο A , και η διαστολή και η διάβρωση αντιστοιχούν στην πρόσθεση και αφαίρεση Minkowski από ένα άλλο σύνολο B , το οποίο καλείται δομικό στοιχείο (structuring element) (Sternberg, 1986, Bosworth και Acton, 2003). Έτσι, ο ορισμός των δυο τελεστών είναι ο εξής:

$$\text{Διαστολή: } A \oplus B = \bigcup_{b \in B} A_b$$

$$\text{Διάβρωση: } A \ominus B = \bigcap_{b \in B} A_{-b}$$

Η διαστολή του A από το B μπορεί να κατανοηθεί ως το σύνολο των σημείων που καλύπτονται από το B , όταν το κέντρο του κινείται εντός του A . Επομένως, είναι το σύνολο των μετατοπίσεων κατά b ούτως ώστε τα σύνολα A και το συμμετρικό σύνολο του B , B^s , να επικαλύπτονται κατά ένα μη μηδενικό στοιχείο, κατ’ ελάχιστο. Δηλαδή, $A \oplus B = \{z \in E \mid (B^s)_z \cap A \neq \emptyset\}$, όπου $B^s = \{b \in E \mid -b \in B\}$.

Σε μια δυαδική εικόνα, η χρήση της διαστολής, τροποποιώντας το μέγεθος των αντικειμένων, επιφέρει «πλάτυνση» των αντικειμένων με τιμές φωτεινότητας 1 (άσπρων), όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.6:



Εικόνα 3.6: (α) Αρχική εικόνα (από τη βιβλιοθήκη του Matlab, circles.png), (β) Διαστολή αρχικής εικόνας με δομικό στοιχείο δίσκο ακτίνας 4 εικονοστοιχείων.

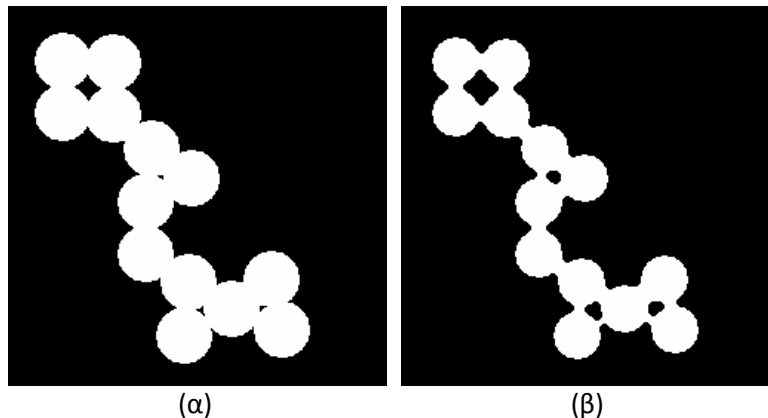
Με χρήση πινάκων, η διαδικασία της διαστολής φαίνεται παρακάτω:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \text{ (δίσκος ακτίνας 1 εικονοστοιχείου),}$$

$$A \oplus B = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

Αντίστοιχα, η διάβρωση του A από το B μπορεί να κατανοηθεί ως το σύνολο των σημείων του κέντρου του B , όταν το B κινείται εντός του A . Επομένως, $A \ominus B = \{z \in E \mid B_z \subseteq A\}$, όπου B_z η μετατόπιση του B κατά το διάνυσμα z , δηλαδή $B_z = \{b + z \mid b \in B\}, \forall z \in E$.

Σε μια δυαδική εικόνα, η χρήση της διάβρωσης, τροποποιώντας το μέγεθος των αντικειμένων, επιφέρει «σμίκρυνση» των αντικειμένων με τιμές φωτεινότητας 1 (άσπρων), όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.7:



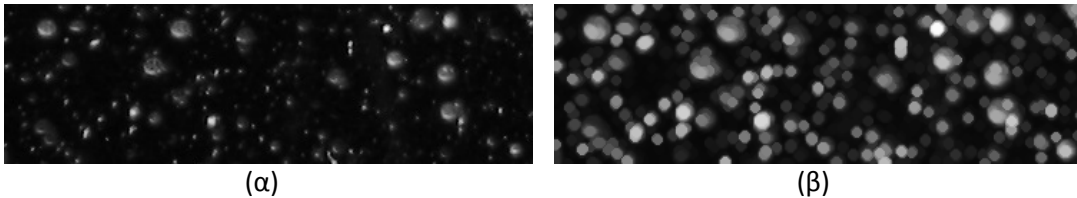
Εικόνα 3.7: (α) Αρχική εικόνα (από τη βιβλιοθήκη του Matlab, circles.png), (β) Διάβρωση αρχικής εικόνας με δομικό στοιχείο δίσκο ακτίνας 4 εικονοστοιχείων.

Με χρήση πινάκων, η διαδικασία της διάβρωσης φαίνεται παρακάτω:

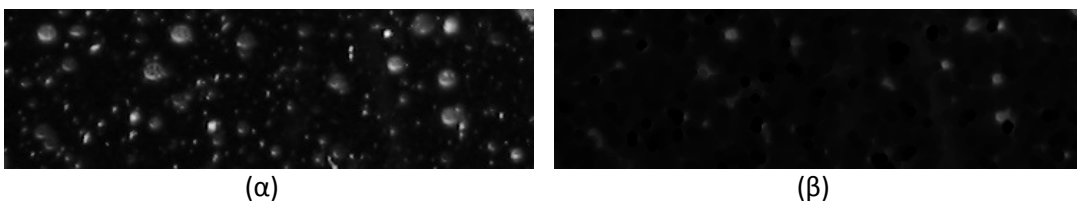
$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \text{ (γραμμικό στοιχείο μήκους 3 εικονοστοιχείων, γωνίας } 0^{\text{deg}}), A \ominus B = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Η διάβρωση αποτελεί τη συμπληρωματική λειτουργία (dual operator) της διαστολής, δηλαδή $A \ominus B = (A^c \oplus B)^c$, εξαιτίας της συμπληρωματικότητας των συνόλων A και A^c , και της συμμετρικότητας του δομικού στοιχείου B (Bosworth και Acton, 2003).

Στις gray-level εικόνες η διαστολή και η διάβρωση μπορούν να γενικευτούν στις συναρτήσεις των gray-level σημάτων (Sternberg, 1986). Επομένως, στην επεξεργασία εικόνας τα πιο χρήσιμα πλέγματα είναι τα σύνολα (binary image processing) και οι συναρτήσεις (gray-level image processing) (Salembier και Serra, 1995). Συγκεκριμένα, η διασταλμένη εικόνα υπολογίζεται ως το μέγιστο του αθροίσματος των επιπέδων του γκρι του εικονοστοιχείου $b(x, y)$ (η συνάρτηση που περιγράφει την επιφάνεια του B), με κάθε σημείο $a(x, y)$ του συνόλου A . Επομένως, η διαστολή $d(x, y)$ μιας εικόνας με τιμές φωτεινότητας επίπεδα του γκρι $a(x, y)$ από το δομικό στοιχείο $b(i, j)$, ορίζεται ως εξής: $d(x, y) = \max_{i,j} [a(x-i, y-j) + b(i, j)]$. Αντίστοιχα, η διάβρωση $e(x, y)$ ορίζεται ως το ελάχιστο της διαφοράς των γκρι επιπέδων του δομικού στοιχείου $b(i, j)$ από την γκρι επιπέδων εικόνα $a(x, y)$, δηλαδή: $e(x, y) = \min_{i,j} [a(x-i, y-j) - b(-i, -j)]$. Ο Sternberg (1986) σημειώνει, ότι οι παραπάνω εκφράσεις της διαστολής και της διάβρωσης για τις gray-level εικόνες είναι αντίστοιχες της γραμμικής συνέλιξης. Η σημασία της greyscale μορφολογίας, σύμφωνα με τον Sternberg (1986), είναι ότι «ενώνει» τη δυαδική με τη greyscale επεξεργασία εικόνας, που συνήθως αντιμετωπίζονταν διαφορετικά. Στις εικόνες 3.8 και 3.9 παρατίθενται οι δυο διαδικασίες.



Εικόνα 3.8: (α) Αρχική εικόνα (από τη βιβλιοθήκη του Matlab, snowflakes.png), (β) Διαστολή αρχικής εικόνας με δομικό στοιχείο δίσκο ακτίνας 4 εικονοστοιχείων.



Εικόνα 3.9: (α) Αρχική εικόνα (από τη βιβλιοθήκη του Matlab, snowflakes.png), (β) Διάβρωση αρχικής εικόνας με δομικό στοιχείο δίσκο ακτίνας 4 εικονοστοιχείων.

Σύμφωνα με τον J. Serra (1999), ένας τελεστής $\psi : L \rightarrow L$ καλείται **μορφολογικό φίλτρο** του L όταν:

(α) είναι αύξων: $a, b \in L, a \leq b \Rightarrow \psi(a) \subseteq \psi(b)$

(β) και ισοδύναμος: $\psi(\psi(a)) = \psi(a)$

Η αύξουσα ιδιότητα δηλώνει, ότι εάν ισχύει σχέση διάταξης για δύο στοιχεία X_i και X_j τα οποία υπόκεινται σε ένα μετασχηματισμό ψ , η ίδια σχέση διάταξης ισχύει και για το αποτέλεσμα του μετασχηματισμού: εάν $X_i < X_j \Rightarrow \psi(X_i) < \psi(X_j)$ (J.R. Casas, 1996). Η σχέση ισοδυναμίας μειώνει την απώλεια πληροφορίας εξαιτίας του μετασχηματισμού (J.R. Casas, 1996).

Δύο κλασσικά παραδείγματα μορφολογικών φίλτρων είναι το μορφολογικό *άνοιγμα* (opening) και το μορφολογικό *κλείσιμο* (closing) και ορίζονται ως εξής:

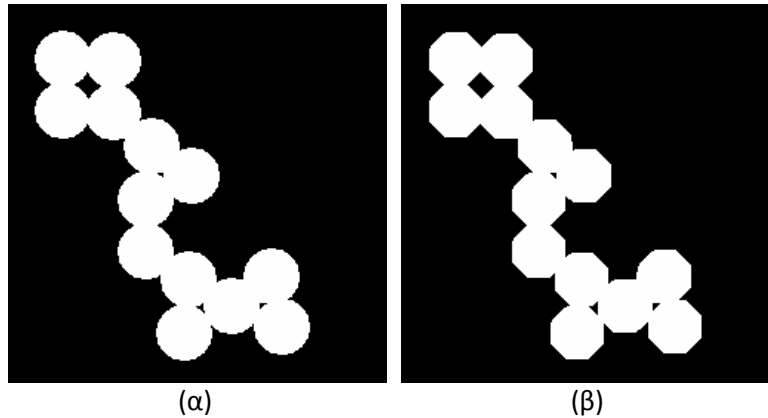
Άνοιγμα: $A \circ B = (A \ominus B) \oplus B$

Κλείσιμο: $A \bullet B = (A \oplus B) \ominus B$

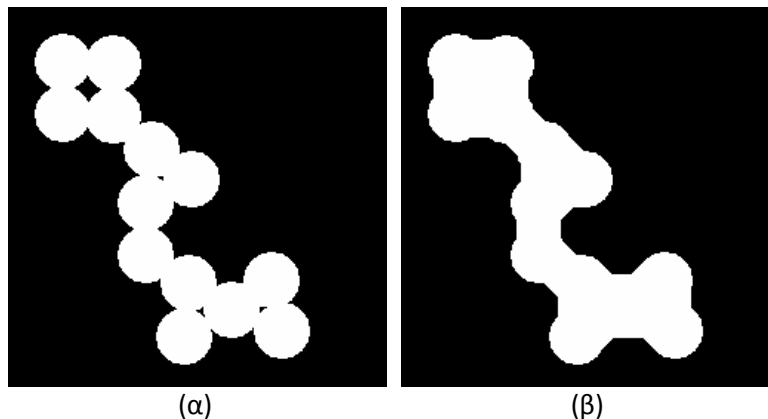
Βάσει των παραπάνω ορισμών, φαίνεται ότι το άνοιγμα είναι η διαστολή της διάβρωσης ίδιου δομικού στοιχείου, και το κλείσιμο είναι η διάβρωση της διαστολής ίδιου δομικού στοιχείου. Σύμφωνα με τους Bosworth και Acton (2003), τα συγκεκριμένα μορφολογικά φίλτρα αποτελούν πεπερασμένες λειτουργίες, έτσι ώστε εφόσον εφαρμόζονται σε ένα σήμα, η επαναληπτική εφαρμογή τους δεν μεταβάλλει το ήδη φιλτραρισμένο σήμα. Παράλληλα, οι λειτουργίες τους είναι συμπληρωματικές.

Όσον αφορά στη γεωμετρική ερμηνεία του ανοίγματος και του κλεισίματος, (J.R. Casas, 1996), το άνοιγμα (αντ. κλείσιμο) απλοποιεί το αρχικό σήμα απαλείφοντας τα μικρά φωτεινά-foreground (αντ. σκοτεινά-background) αντικείμενα, όπου το δομικό στοιχείο δεν ταιριάζει. Επιπλέον, τα περιγράμματα των αντικειμένων τροποποιούνται κατά τέτοιο τρόπο ούτως ώστε να ταιριάζουν στο σχήμα του δομικού στοιχείου. Για την ακριβή διατήρηση της πληροφορίας των περιγραμμάτων, απαιτείται μια ανακατασκευή (γεωδαιτική διαστολή και γεωδαιτική διάβρωση) για να αποκατασταθούν τα περιγράμματα που έχουν διατηρηθεί. Σημειώνεται ότι σε gray-level εικόνες οι ορισμοί παραμένουν οι ίδιοι, στο πλαίσιο της gray-level διαστολής και διάβρωσης (Bosworth και Acton, 2003).

Άλλες συχνά χρησιμοποιούμενες διαδικασίες είναι το *άνοιγμα αμέσως ακολουθούμενο από κλείσιμο*, και το *κλείσιμο αμέσως ακολουθούμενο από άνοιγμα*. Στις εικόνες 3.10 και 3.11 παρουσιάζονται οι διαδικασίες του ανοίγματος και του κλεισίματος.



Εικόνα 3.10: (α) Αρχική εικόνα (από τη βιβλιοθήκη του Matlab, circles.png), (β) Άνοιγμα αρχικής εικόνας με δομικό στοιχείο δίσκο ακτίνας 15 εικονοστοιχείων.

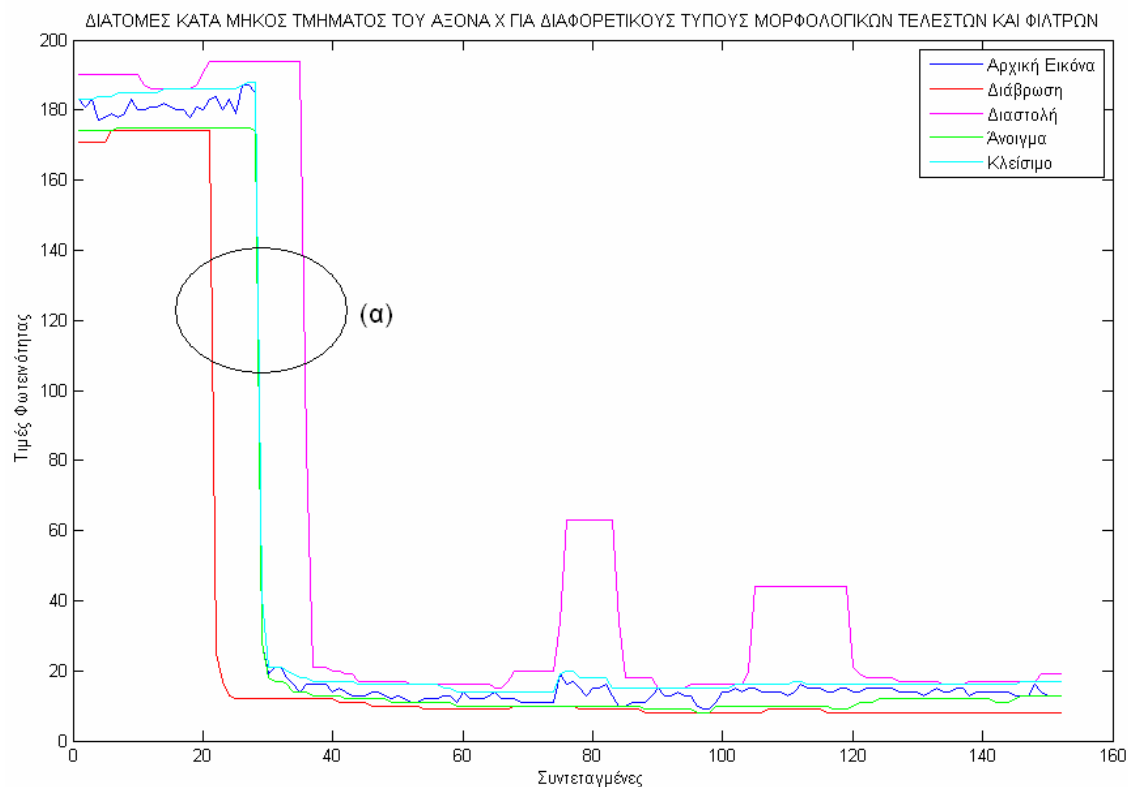


Εικόνα 3.11: (α) Αρχική εικόνα (από τη βιβλιοθήκη του Matlab, circles.png), (β) Κλείσιμο αρχικής εικόνας με δομικό στοιχείο δίσκο ακτίνας 15 εικονοστοιχείων.

Τελικά, ενώ οι γραμμικές τεχνικές φιλτραρίσματος επεμβαίνουν στις τιμές φωτεινότητας των αντικειμένων της εικόνας – κι επομένως στις εκτιμώμενες θέσεις των περιγραμμάτων τους – τα μορφολογικά φίλτρα εξετάζουν τη γεωμετρική δομή της εικόνας, με βάση το δομικό στοιχείο. Επομένως, η ανάλυση είναι φύσει γεωμετρική, και από αυτή την οπτική προκύπτουν ποσοτικές πληροφορίες οι οποίες είναι επεξεργάσιμες (J.R. Casas, 1996).

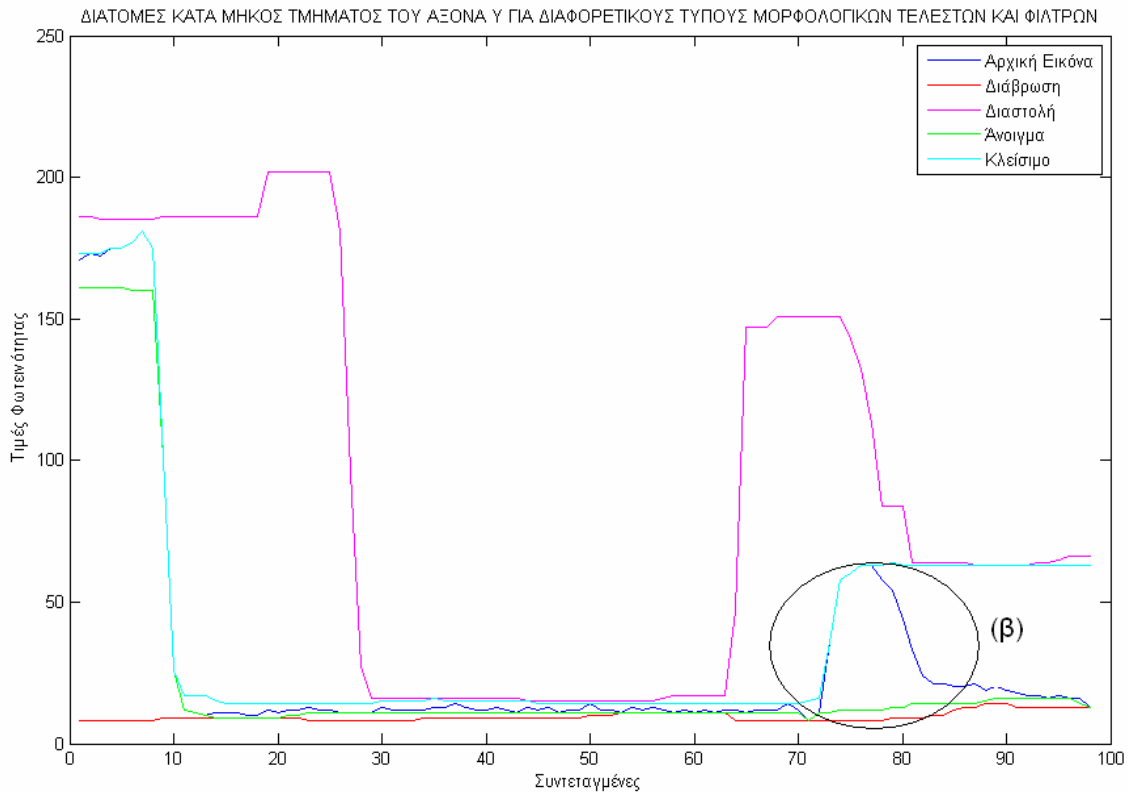
Σύμφωνα με τους **Bosworth και Acton (2003)**, χαρακτηριστικό όλων των κλασικών μορφολογικών τελεστών πολλαπλών κλιμάκων (morphological scale-spaces), είναι οι διαστολές και οι διαβρώσεις με συνεχώς αυξανόμενου μεγέθους δομικά στοιχεία. Ωστόσο, οι **Jackway και Deriche (1996)** υποστηρίζουν ότι οι κλασικοί τελεστές της διαστολής και της διάβρωσης δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε αναπαραστάσεις πολλαπλών κλιμάκων – η σημασία των οποίων έχει ήδη τονιστεί – καθώς μετατοπίζουν τα όρια των αντικειμένων. Αυτό προκύπτει επειδή οι τελεστές αυτοί δρουν στη γεωμετρική δομή της εικόνας. Επιπλέον, και τα κλασικά μορφολογικά ανοίγματα, αν και δεν δημιουργούν ψευδή μέγιστα στις τιμές φωτεινότητας και διατηρούν καλά τις κατακόρυφες ακμές (άξονας χ) στην εικόνα, μετατοπίζουν τις οριζόντιες (Meyer και Maragos, 1999).

Στο σχήμα 3.4 παρουσιάζονται διατομές κατά μήκος τμήματος του άξονα x της εικόνας *cameraman.tif* της βιβλιοθήκης του Matlab, για τους τελεστές της διαστολής και της διάβρωσης, και για τα φίλτρα του ανοίγματος και του κλεισίματος (σημειώνεται ότι σε όλες τις περιπτώσεις το δομικό στοιχείο ήταν δίσκος ακτίνας 8 εικονοστοιχείων). Στο σημείο (α) φαίνεται η μετατόπιση των ακμών έπειτα από την εφαρμογή διαστολής και διάβρωσης και η διατήρηση της κατακόρυφης ακμής τόσο κατά το άνοιγμα όσο και κατά το κλείσιμο.



Σχήμα 3.4: Διατομές κατά μήκος τμήματος του άξονα x της εικόνας *cameraman.tif*, για διάφορους τύπους μορφολογικών τελεστών και φίλτρων.

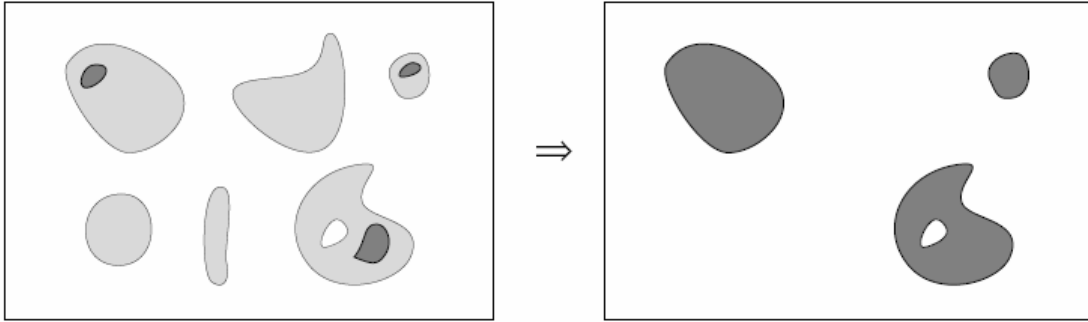
Στο σχήμα 3.5 παρουσιάζεται για την ίδια εικόνα μια διατομή κατά μήκος τμήματος του άξονα y . Στο σημείο (β) παρατηρείται η σημείωση των Meyer και Maragos (1999) για τη μετατόπιση ορισμένων οριζόντιων ακμών κατά το άνοιγμα.



Σχήμα 3.5: Διατομές κατά μήκος τμήματος του άξονα y της εικόνας *cameraman.tif*, για διάφορους τύπους μορφολογικών τελεστών και φίλτρων.

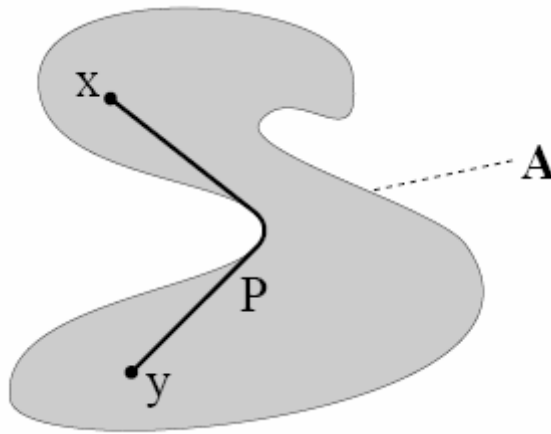
Η μαθηματική μορφολογία, εκτός των τελεστών και των φίλτρων που παρουσιάστηκαν, παρέχει κι έναν άλλο πολύ σημαντικό τελεστή, την ανακατασκευή (reconstruction). Η ανακατασκευή συχνά παρουσιάζεται ως μέρος ενός συνόλου τελεστών που καλούνται γεωδαιτικοί (geodesic). Ο μετασχηματισμός σε δυαδικές εικόνες εξαγάγει τα συνδεδεμένα αντικείμενα (connected components) μιας εικόνας τα οποία «μαρκάρονται» από μια άλλη εικόνα. Ο **Vincent L. (1993)** γενικεύει την ανακατασκευή σε grey-level εικόνες.

Όσον αφορά στη δυαδική ανακατασκευή (binary reconstruction), έστω δύο δυαδικές εικόνες I και J οι οποίες ορίζονται στον ίδιο διακριτό χώρο D , έτσι ώστε $J \subseteq I$. Η εικόνα J καλείται μάρκα και η εικόνα I μάσκα. Έστω I_1, I_2, \dots, I_n τα συνδεδεμένα αντικείμενα της μάσκας I . Η ανακατασκευή $\rho_I(J)$ της μάσκας I από τη μάρκα J , είναι η ένωση των συνδεδεμένων αντικειμένων της I που περιέχουν τουλάχιστον ένα εικονοστοιχείο της J : $\rho_I(J) = \bigcup_{J \cap I_k \neq \emptyset} I_k$. Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται ο ορισμός.



Εικόνα 3.12: Δυαδική ανακατασκευή της μάσκας I από τη μάσκα J (Vincent L., 1993).

Πολύ συχνά η ανακατασκευή παρουσιάζεται χρησιμοποιώντας τη γνώση της γεωδαιτικής απόστασης (geodesic distance), και συγκεκριμένα με όρους γεωδαιτικής διαστολής και διάβρωσης. Ως γεωδαιτική απόσταση δύο εικονοστοιχείων p και q μιας μάσκας X , ορίζεται η ελάχιστη απόστασή τους (εικόνα 3.13).

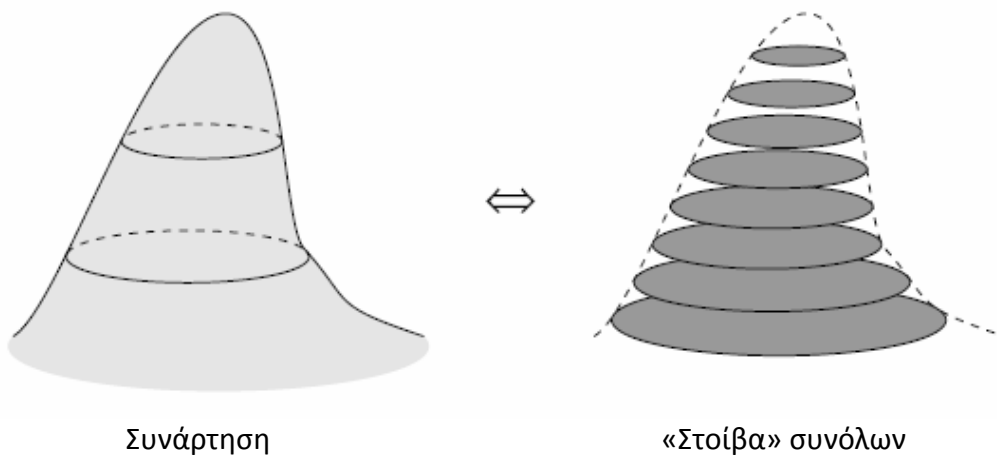


Εικόνα 3.13: Γεωδαιτική απόσταση $d_G(x, y)$ εντός του συνόλου A (Vincent L., 1993).

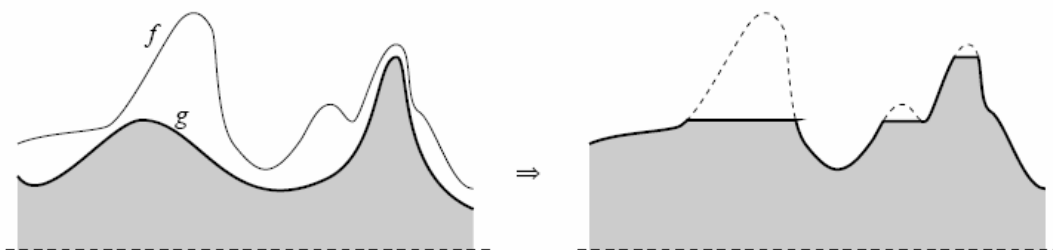
Έστω $X \subset \mathbb{Z}^2$ ένα διακριτό σύνολο του \mathbb{Z}^2 και $Y \subseteq X$. Η γεωδαιτική διαστολή μεγέθους $n \geq 0$ του Y εντός του X , είναι το σύνολο των εικονοστοιχείων του X των οποίων η γεωδαιτική απόσταση από το Y είναι μικρότερη ή ίση του n , δηλαδή: $\delta_X^{(n)}(Y) = \{p \in X \mid d_X(p, Y) \leq n\}$. Ως εκ τούτου, η γεωδαιτική διαστολή μεγέθους n μπορεί να προκύψει επαναλαμβάνοντας n αρχικές γεωδαιτικές διαστολές, δηλαδή: $\delta_X^{(n)}(Y) = \underbrace{\delta_X^{(1)} \circ \delta_X^{(1)} \circ \dots \circ \delta_X^{(1)}}_{n \text{ φορές}}(Y)$.

Τελικά, η ανακατασκευή του X από το $Y \subseteq X$ προκύπτει επαναλαμβάνοντας αρχικές γεωδαιτικές διαστολές του Y εντός του X έως ότου υπάρχει σταθερότητα, δηλαδή: $\rho_X(Y) = \bigcup_{n \geq 1} \delta_X^{(n)}(Y)$.

Σύμφωνα με τον αρχικό ορισμό του Vincent για την ανακατασκευή grayscale εικόνων βάσει κατωφλίωσης (εικόνα 3.14), εξάγονται οι κορυφές της μάσκας οι οποίες μαρκάρονται από τη μάσκα, όπως ακριβώς στη δυαδική ανακατασκευή εξάγονται τα συνδεδεμένα αντικείμενα της μάσκας. Έστω, λοιπόν, J και I δύο grayscale εικόνες οι οποίες ορίζονται στον ίδιο χώρο, με τιμές στο διακριτό σύνολο $\{0, 1, \dots, N-1\}$, και τέτοιες ώστε $J \leq I$. Η grayscale ανακατασκευή $\rho_I(J)$ της I από την J δίνεται από τη σχέση: $\rho_I(J)(p) = \max \{k \in [0, N-1] \mid p \in \rho_{T_k(I)}(T_k(J))\}$, $\forall p \in D_I$, όπου $T_k(I)$ κατώφλι. Στην εικόνα 3.15 παρουσιάζεται η απεικόνιση του ορισμού.



Εικόνα 3.14: Αποσύνθεση grayscale εικόνας με χρήση κατωφλίων (threshold decomposition) (Vincent L., 1993).



Εικόνα 3.15: Grayscale ανακατασκευή της μάσκας f από τη μάσκα g (Vincent L., 1993).

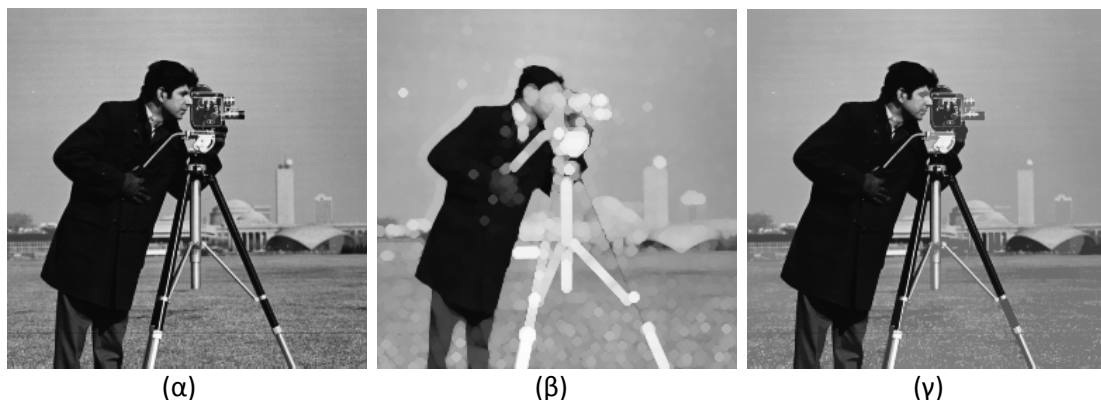
Ο δεύτερος, περισσότερο «υπολογιστικός», ορισμός του Vincent δίνεται με επαναληπτικές grayscale γεωδαιτικές διαστολές της J μάσκας υπό την I μάσκα, έως ότου υπάρχει σταθερότητα: $\rho_I(J) = \bigvee_{n \geq 1} \delta_I^{(n)}(J)$. Χρησιμοποιώντας γεωδαιτικές διαβρώσεις, η ανακατασκευή ορίζεται ως $\rho_I^*(J) = \bigwedge_{n \geq 1} \varepsilon_I^{(n)}(J)$.

Μια σημαντική εφαρμογή της ανακατασκευής είναι το φιλτράρισμα-ομαλοποίηση όλων των συνδεδεμένων αντικειμένων στα οποία δεν χωράει η μάσκα, με ταυτόχρονη διατήρηση των υπολοίπων (Vincent L., 1993, Salembier και Serra, 1995, Serra J., 1999). Τέτοιοι μετασχηματισμοί καλούνται *μορφολογικό άνοιγμα και*

κλείσιμο με ανακατασκευή (opening και closing by reconstruction). Έτσι, είναι δυνατή η ανακατασκευή ολόκληρων αντικειμένων με ακριβή διατήρηση των ορίων και των ακμών τους (Salembier και Serra, 1995). Η ιδιότητα αυτά καθιστά ελκυστικά τα συγκεκριμένα φιλτραρίσματα για μια πληθώρα εφαρμογών, όπως η απαλοιφή θορύβου, κατάτμηση, ανίχνευση χαρακτηριστικών, ομαλοποίηση και ενίσχυση εικόνων. Παράλληλα, καθώς ενώνουν και απαλείφουν flat zones (σύνολο συνδεδεμένων αντικειμένων σταθερής συχνότητας, Salembier και Serra, 1995) εφόσον δεν επεμβαίνουν στη φασματική πληροφορία – όπως τα γραμμικά φίλτρα – και στο σχήμα των αντικειμένων – όπως τα απλά μορφολογικά ανοίγματα και κλεισίματα – αποτελούν μια πιο ισχυρή κατηγορία μορφολογικών φίλτρων. Στις επόμενες εικόνες εφαρμόζονται άνοιγμα και κλείσιμο με ανακατασκευή, με μάσκα την εικόνα cameraman.tif από τη βιβλιοθήκη του Matlab και μάσκα τη διαβρωμένη και διασταλμένη αντίστοιχα εικόνα, υπό δίσκο ακτίνας 4 εικονοστοιχείων.



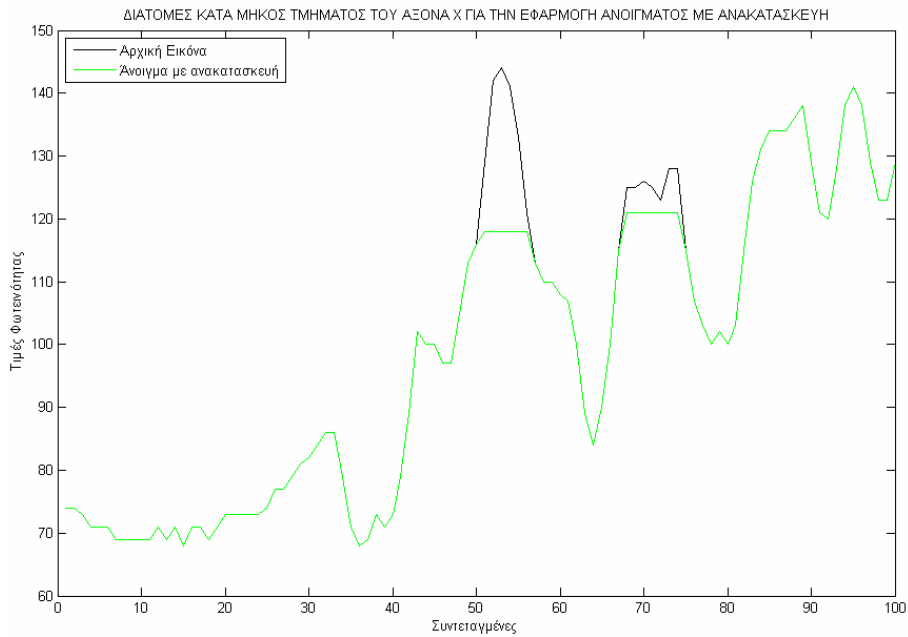
Εικόνα 3.16: (α) Αρχική εικόνα (από τη βιβλιοθήκη του Matlab, cameraman.tif), (β) Διάβρωση αρχικής εικόνας με δομικό στοιχείο δίσκο ακτίνας 4 εικονοστοιχείων, (γ) Τελική εικόνα έπειτα από το μορφολογικό άνοιγμα με ανακατασκευή.



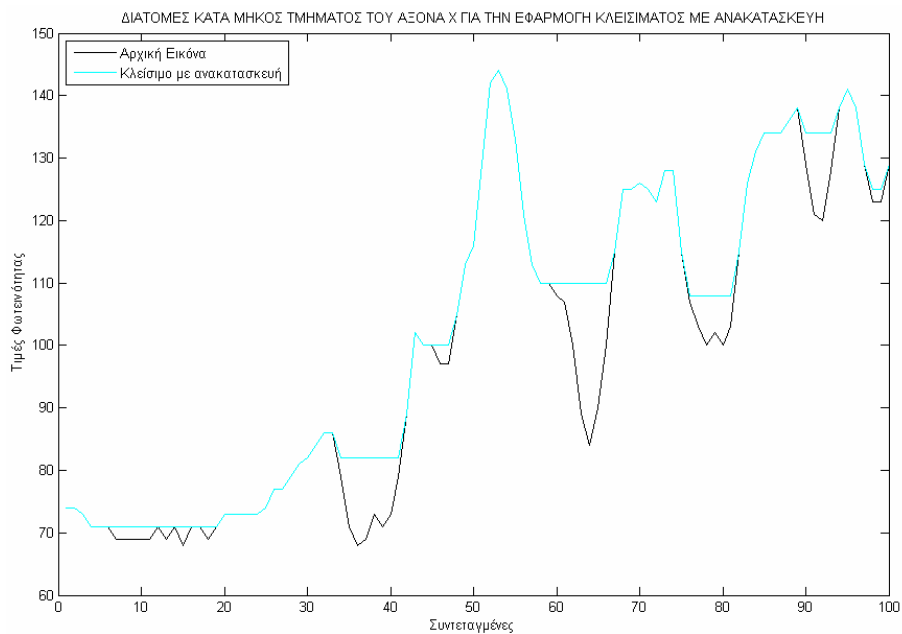
Εικόνα 3.17: (α) Αρχική εικόνα (από τη βιβλιοθήκη του Matlab, cameraman.tif), (β) Διαστολή αρχικής εικόνας με δομικό στοιχείο δίσκο ακτίνας 4 εικονοστοιχείων, (γ) Τελική εικόνα έπειτα από το μορφολογικό κλείσιμο με ανακατασκευή.

Παρατηρείται ότι η εφαρμογή του ανοίγματος με ανακατασκευή εξαλείφει φωτεινά αντικείμενα μικρότερα από το δομικό στοιχείο, ενώ η εφαρμογή του κλεισίματος με ανακατασκευή εξαλείφει σκοτεινά αντικείμενα μικρότερα από το δομικό στοιχείο.

Αυτό ακριβώς είναι και το σημαντικότερο μειονέκτημά τους, καθώς συμπεριφέρονται διαφορετικά στις περιοχές με μεγάλες τιμές φωτεινότητας (foreground-κορυφές) και στο υπόβαθρο (background-κοιλιάδες) (Meyer και Maragos, 1999), και παρουσιάζεται και στα σχήματα 3.6 και 3.7 με διατομές κατά μήκος τμήματος του άξονα χ. Σημειώνεται ότι οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε τμήμα εικόνας QUICKBIRD, και συγκεκριμένα στο υπέρυθρο κανάλι, με χρήση δομικού στοιχείου δίσκου ακτίνας 4 εικονοστοιχείων.



Σχήμα 3.6: Διατομές κατά μήκος τμήματος του άξονα χ εικόνας QUICKBIRD, για την εφαρμογή ανοίγματος με ανακατασκευή.



Σχήμα 3.7: Διατομές κατά μήκος τμήματος του άξονα χ εικόνας QUICKBIRD, για την εφαρμογή κλεισίματος με ανακατασκευή.

Κατά την εφαρμογή ανοίγματος με ανακατασκευή (σχήμα 3.6), είναι εμφανές ότι, οι μεταβολές των τιμών φωτεινότητας διατηρούνται κυρίως για τα στοιχεία του υποβάθρου, εφόσον η τεχνική χρησιμοποιείται για την απαλοιφή φωτεινών αντικειμένων. Στο σχήμα 3.7, ωστόσο, όπου εφαρμόζεται κλείσιμο με ανακατασκευή, συμβαίνει το αντίθετο και διατηρείται η δομή των αντικειμένων που ενδιαφέρουν κι όχι του υποβάθρου. Είναι σαφής επομένως η ασυμμετρία όσον αφορά στη διατήρηση των ακμών. Επιπλέον, και στις δυο περιπτώσεις ούτε η ομαλοποίηση είναι συμμετρική ως προς τη δομή των τιμών φωτεινότητας της εικόνας. Οι συγκεκριμένοι τύποι φίλτρων, λοιπόν, δεν αποτελούν κατάλληλες τεχνικές για προ-επεξεργασία ανίχνευσης ακμών, κατά την οποία είναι απαραίτητη η συμμετρική ομαλοποίηση της εικόνας με ενίσχυση των ακμών.

Συμμετρική αντιμετώπιση των αντικειμένων που ενδιαφέρουν και του υποβάθρου, επιτυγχάνεται με χρήση *σειριακών εναλλασσόμενων φιλτραρισμάτων ASF* (alternating sequential filters). Τα συγκεκριμένα φιλτραρίσματα προτάθηκαν αρχικά από τον **Sternberg (1986)** και υλοποιούνται με τη σύνθεση σειριακών ανοιγμάτων και κλεισιμάτων, εναλλασσόμενα στο προσκήνιο και στο υπόβαθρο της εικόνας (**Heijmans, 1997**). Τα δομικά στοιχεία είναι αυξανόμενου μεγέθους. Έτσι, η μέθοδος εξαγωγής χαρακτηριστικών από τις εικόνες πραγματοποιείται ιεραρχικά ανάλογα με το μέγεθος του δομικού στοιχείου (Pei et al., 1997), ενώ η χρήση τους επιφέρει μικρότερες παραμορφώσεις στα αντικείμενα, σε σχέση με την εφαρμογή των κλασσικών μορφολογικών ανοιγμάτων και κλεισιμάτων μέγιστου δομικού στοιχείου άμεσα (Sternberg, 1986).

Υπάρχουν πολλοί τρόποι σύνθεσης εναλλασσόμενων φίλτρων (Afs), και επομένως σειριακών εναλλασσόμενων φίλτρων (ASFs), κάποιιοι από τους οποίους περιγράφονται στη συνέχεια (Heijmans, 1995, Pei et al., 1997). Έστω X μια δυαδική εικόνα και B ένα δυαδικό δομικό στοιχείο. Ένα AF ορίζεται ως το κλείσιμο του ανοίγματος ή το άνοιγμα του κλεισίματος της X από το B :

$$AF_B(X) = (X \circ B) \bullet B \quad \text{ΤΥΠΟΣ I}$$

$$AF_B(X) = (X \bullet B) \circ B \quad \text{ΤΥΠΟΣ II}$$

Ένας άλλος τύπος AF ορίζεται ως εξής:

$$AF_B(X) = ((X \circ B) \bullet B) \circ B \quad \text{ΤΥΠΟΣ III}$$

$$AF_B(X) = ((X \bullet B) \circ B) \bullet B \quad \text{ΤΥΠΟΣ IV}$$

Το ASF αποτελεί μια επαναληπτική εφαρμογή $AF_B(X)$ με αυξανόμενου μεγέθους δομικά στοιχεία, δηλαδή:

$$ASF(X) = AF_{B_N} AF_{B_{N-1}} \dots AF_{B_1}$$

Σύμφωνα με τον **Serra J. (1999)** και τους **Maragos και Vachier (2008)**, είναι δυνατή η χρήση *ανοιγμάτων και κλεισιμάτων με ανακατασκευή* για τη σύνθεση των ASFs –

λόγω των πλεονεκτημάτων τους σε σχέση με τα κλασικά μορφολογικά ανοίγματα και κλεισίματα – και παρέχονται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$ASF_{rec}(f) = \bigvee_h h \cdot rec[\chi_h(f) | \phi_h \gamma_h \dots \phi_2 \gamma_2 \phi_1 \gamma_1(\chi_h(f))], \text{ ή}$$

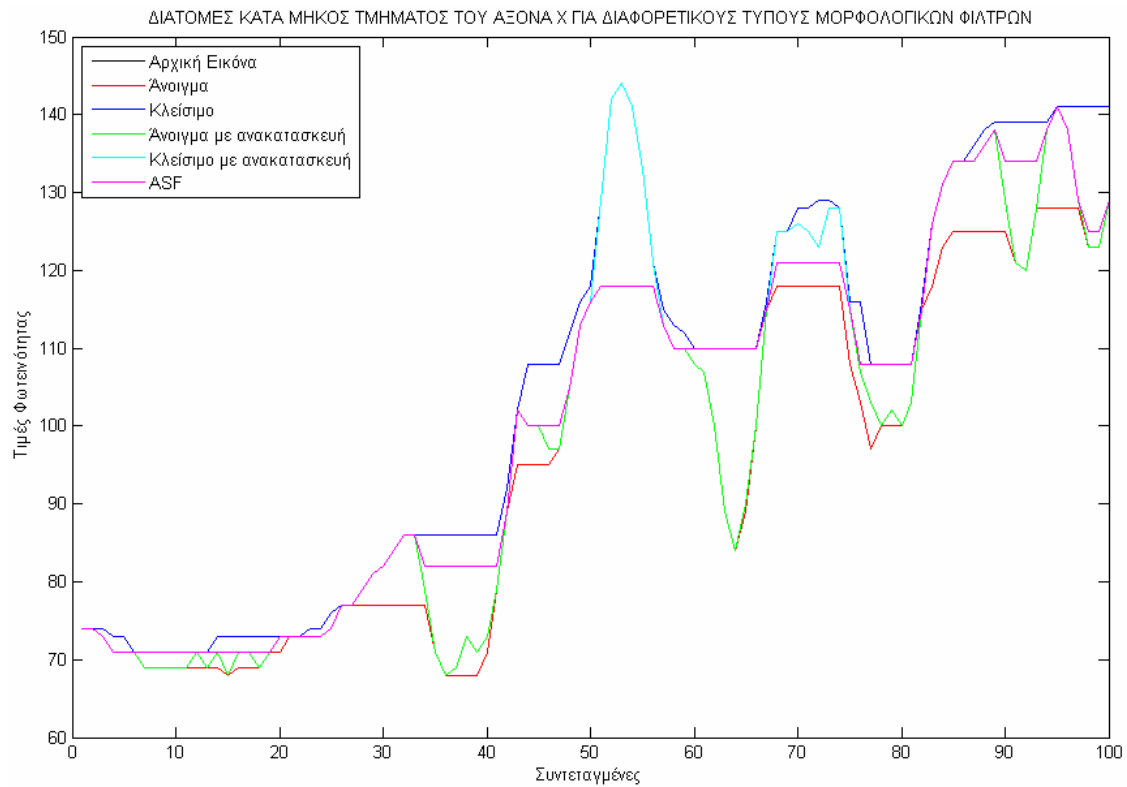
$$ASF_{rec}(f) = \bigvee_h h \cdot rec[x_h(f) | \gamma_h \phi_h \dots \gamma_2 \phi_2 \gamma_1 \phi_1(x_h(f))], \text{ όπου}$$

(1) f , η gray-level εικόνα επιπέδων $X_h = \{x \in E : f(x) \geq h\}$, η οποία μπορεί να ανακατασκευαστεί από αυτά: $f = \bigvee_h h \cdot \chi_h(f)$. Ο E δηλώνει το χώρο της εικόνας και χ_h είναι η συνάρτηση κάθε επιπέδου $X_h : \forall x \in E, \chi_h(x) = 1$ εάν $x \in X_h$, αλλιώς $\chi_h(x) = 0$,

(2) $rec(A|B)$ η δυαδική ανακατασκευή του A , όταν $A \cap B \neq \emptyset$, αλλιώς \emptyset , και

(3) $\gamma_h = \delta_h \varepsilon_h$, το μορφολογικό άνοιγμα και $\phi_h = \varepsilon_h \delta_h$ το μορφολογικό κλείσιμο, δομικού στοιχείου δίσκου ακτίνας h , όπου h μια παράμετρος κλίμακας.

Έχει αποδειχτεί ότι τα ASFs λειτουργούν ικανοποιητικά στη συντήρηση των κρίσιμων δομών των αντικειμένων κατά την εφαρμογή τους σε δυαδικές εικόνες (Pei et al., 1997, Καράντζαλος, Κ., 2007). Στο σχήμα 3.8 παρουσιάζεται αξιολόγηση της τεχνικής με χρήση διατομών, σε σύγκριση και με άλλα μορφολογικά φίλτρα. Σημειώνεται ότι οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε τμήμα εικόνας QUICKBIRD, και συγκεκριμένα στο υπέρυθρο κανάλι, με χρήση δομικού στοιχείου δίσκου ακτίνας 4 εικονοστοιχείων.



Σχήμα 3.8: Διατομές κατά μήκος τμήματος του άξονα χ εικόνας QUICKBIRD, για διάφορους τύπους μορφολογικών φίλτρων.

Η εφαρμογή ανοίγματος και κλεισίματος, όπως έχει ήδη σημειωθεί, μεταβάλλει το σχήμα των αντικειμένων της εικόνας, όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.8. Παράλληλα το άνοιγμα και κλείσιμο ανακατασκευής αντιμετωπίζει ασύμμετρα τις δομές της εικόνας. Η χρήση ASF φαίνεται πως διατηρεί πιο πιστά τις μεταβολές των τιμών φωτεινότητας και παράλληλα ομαλοποιεί συμμετρικά την εικόνα. Το συμπέρασμα αυτό φαίνεται και στην εικόνα 3.18, όπου εφαρμόζεται σειριακό εναλλασσόμενο φιλτράρισμα στην εικόνα cameraman.tif, με δομικό στοιχείο δίσκο ακτίνας 3 εικονοστοιχείων. Αρχικά ομαλοποιούνται τα αντικείμενα με υψηλές τιμές φωτεινότητας και στη συνέχεια τα αντικείμενα με χαμηλές τιμές φωτεινότητας. Ποιοτικά, φαίνεται ότι κατά το φιλτράρισμα διατηρούνται οι περισσότερες μεταβολές των τιμών φωτεινότητας κι επομένως οι ακμές.



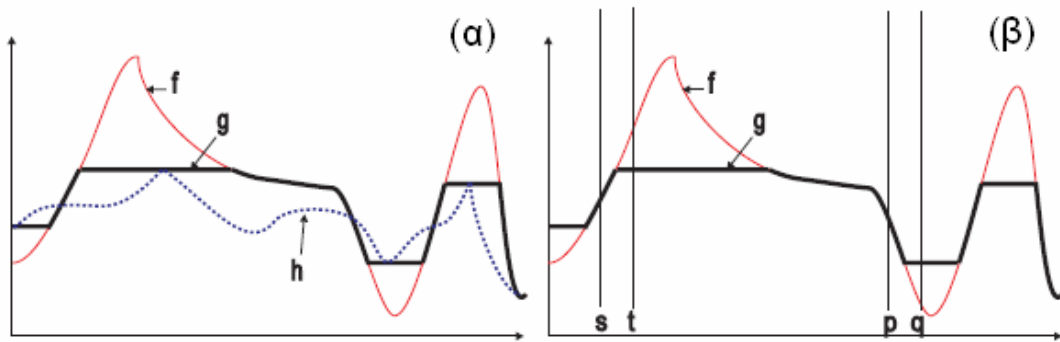
Εικόνα 3.18: ASF με δομικό στοιχείο δίσκο ακτίνας 3 εικονοστοιχείων (α) Αρχική εικόνα (από τη βιβλιοθήκη του Matlab, cameraman.tif), (β) Άνοιγμα με ανακατασκευή της αρχικής εικόνας, (γ) Τελική εικόνα έπειτα από μορφολογικό κλείσιμο με ανακατασκευή στην εικόνα (β).

Ωστόσο, οι Pei et al. (1997) σημειώνουν ότι τα συγκεκριμένα φιλτραρίσματα είναι πολύ χρονοβόρα υπολογιστικά, και συγκεκριμένα για δομικό στοιχείο μεγέθους n η πολυπλοκότητα της υπολογιστικής διαδικασίας αγγίζει την τέταρτη δύναμη του n για τη χρήση ανοιγμάτων και κλεισμάτων, οδηγώντας σε πολύ μεγάλο αριθμό επαναλήψεων. Οι Meyer και Maragos (1999) σημειώνουν ότι η χρήση ανοιγμάτων και κλεισμάτων με ανακατασκευή αποτελεί ακόμη πιο χρονοβόρα υπολογιστικά διαδικασία.

Μια πιο πρόσφατη λύση στο πρόβλημα του ασύμμετρου φιλτραρίσματος έδωσε το 1998 ο Meyer παρουσιάζοντας μια πιο γενική τάξη μορφολογικών φίλτρων, τα *levelings*, τα οποία μελετήθηκαν και από τους Matheron και Serra (Meyer και Maragos, 1999). Τα *levelings* είναι μετασχηματισμοί κλίμακας $\Lambda(f, g)$ που βασίζονται σε δύο σήματα, το σήμα αναφοράς f και τη μάρκα g , και περιλαμβάνουν ως ειδικές κατηγορίες το άνοιγμα και το κλείσιμο με ανακατασκευή. Μια εικόνα g είναι *leveling* μιας εικόνας f αν και μόνο αν $\forall(p, q)$ γειτονικά εικονοστοιχεία ισχύει:

$$g_p > g_q \Rightarrow f_p \geq g_p \text{ και } g_q \geq f_q$$

Η σχέση $\{g \text{ leveling της } f\}$ γράφεται $g \prec f$ και παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα, όπου f το αρχικό σήμα, h η μάρκα και g το σχετικό leveling:



Σχήμα 3.9: Απεικόνιση της λειτουργίας των levelings στις ζώνες αλλαγής των τιμών φωτεινότητας της εικόνας (Meyer and Maragos, 1999).

Στο σχήμα 3.9 περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο μετασχηματίζεται η μάρκα h μέχρι να γίνει η συνάρτηση g , η οποία είναι leveling της f . Στις περιοχές όπου $\{h < f\}$, το leveling αυξάνει την h τόσο, έως ότου να δημιουργηθεί μια ζώνη με ενιαίες τιμές φωτεινότητας ή η συνάρτηση g να «χτυπήσει» την f . Επομένως, στις περιοχές όπου $\{g < f\}$, η g είναι flat. Αντίστοιχα, στις περιοχές όπου $\{h > f\}$, το leveling μειώνει την h τόσο, έως ότου να δημιουργηθεί μια ζώνη με ενιαίες τιμές φωτεινότητας ή η συνάρτηση g να «χτυπήσει» την f . Επομένως, στις περιοχές όπου $\{g > f\}$, η g είναι flat (με ενιαίες τιμές φωτεινότητας). Στην περίπτωση περισσότερο γενικευμένων levelings, δημιουργούνται ζώνες quasi-flat (ψευδο-flat, π.χ. παραβολικές επιφάνειες).

Ανάμεσα στις αλγεβρικές και χώρων-κλίμακας ιδιότητες που κατέχουν, τα levelings δεν δημιουργούν ψευδή ακρότατα στις μεγαλύτερες κλίμακες και επαληθεύουν την αρχή της αιτιότητας, σύμφωνα με την οποία δεν μπορούν να δημιουργηθούν νέα αντικείμενα κατά τη μετάβαση από μικρές σε μεγαλύτερες κλίμακες.

Οι Meyer και Maragos (1999) παρουσίασαν μια πολύ γενική μη γραμμική αναπαράσταση χώρων-κλίμακας βασισμένη στα levelings, με πολύ ενδιαφέρουσες ιδιότητες, ανάμεσα στις οποίες η διατήρηση των περιγραμμάτων και το γεγονός ότι δεν εμφανίζονται ψευδή ακρότατα. Η περιγραφή των σχέσεων μεταξύ πολλαπλών κλιμάκων γίνεται με τη χρήση πλεγμάτων (lattices). Η ιδιότητα $\{g \text{ leveling της } f\}$ είναι μια σχέση διάταξης – συγκεκριμένα είναι αντι-συμμετρική, μεταβατική και ανακλαστική. Επομένως, είναι δυνατή η αναπαράσταση πολλαπλών κλιμάκων. Από τη μια κλίμακα στην επόμενη, οι δομές της εικόνας σταδιακά εξαφανίζονται και δημιουργούνται ζώνες flat ή quasi-flat. Αυτό προκύπτει γιατί, όπως έδειξαν οι Meyer και Maragos (1999), τα levelings αποτελούν υποκατηγορία των συνδεδεμένων τελεστών, το οποίο σημαίνει ότι διευρύνουν τις flat ζώνες και δεν δημιουργούν νέα περιγράμματα – τα πιο γενικά levelings επεκτείνουν ζώνες quasi-flat. Ωστόσο, όσο οι δομές της εικόνας παραμένουν ορατές, διατηρούν ακριβώς την ίδια θέση που έχουν και στην αρχική εικόνα.

Τα levelings μπορούν να διακριθούν στις εξής δύο κατηγορίες:

- Κατώτερα levelings (lower levelings): Μια συνάρτηση g είναι κατώτερο όριο μιας συνάρτησης f αν και μόνο αν για κάθε ζεύγος γειτονικών εικονοστοιχείων $(p, q): g_p > g_q \Rightarrow g_q \geq f_q$. Τα εικονοστοιχεία με αυτή την ιδιότητα είναι αυτά για τα οποία η διαστολή δ αυξάνει την τιμή τους. Επομένως, ισοδύναμα, μια συνάρτηση g είναι κατώτερο όριο μιας συνάρτησης f αν και μόνο αν $g_q < \delta_q g \Rightarrow g_q \geq f_q$ ή $g \geq f \wedge \delta g$ (απόδειξη, βλ. Meyer και Maragos, 1999).
- Ανώτερα levelings (upper levelings): Μια συνάρτηση g είναι ανώτερο όριο μιας συνάρτησης f αν και μόνο αν για κάθε ζεύγος γειτονικών εικονοστοιχείων $(p, q): g_p > g_q \Rightarrow g_p \leq f_p$. Τα εικονοστοιχεία με αυτή την ιδιότητα είναι αυτά για τα οποία η διάβρωση ε μειώνει την τιμή τους. Επομένως, ισοδύναμα, μια συνάρτηση g είναι ανώτερο όριο μιας συνάρτησης f αν και μόνο αν $g_p > \varepsilon_p g \Rightarrow g_p \leq f_p$ ή $g \leq f \vee \varepsilon g$.

Επομένως, μια συνάρτηση g είναι leveling μιας συνάρτησης f αν και μόνο αν $f \wedge \delta g \leq g \leq f \vee \varepsilon g$, δηλαδή αν και μόνο αν είναι ταυτόχρονα ανώτερο και κατώτερο leveling της f . Οι συγκεκριμένες σχέσεις συνδέουν τα levelings με τα ανοίγματα και κλεισίματα ανακατασκευής.

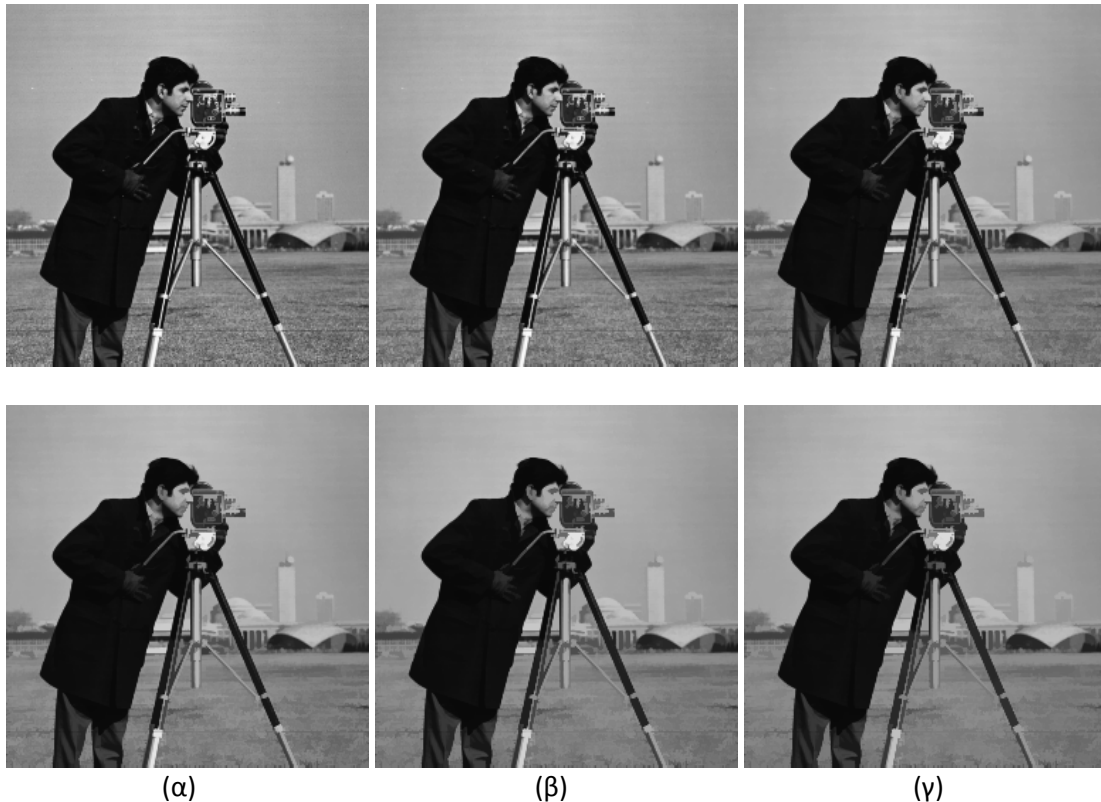
Έστω, λοιπόν, f η αρχική εικόνα. Τα levelings υλοποιούνται βάσει μιας αυθαίρετης οικογένειας από συναρτήσεις σηματοδευτών (marker functions) $g_i, i=1,2,3,\dots$, οι οποίοι συνδέονται με μια συνεχώς αυξανόμενη παράμετρο κλίμακας, i . Οι Meyer και Maragos (1999) επιλέγουν να χρησιμοποιήσουν σαν μάρκα τη συνέλιξη της f με ένα δισδιάστατο γκαουσιανό φίλτρο, αυξανόμενης τυπικής απόκλισης σ_i , για την αναπαράσταση πολλαπλών κλιμάκων. Ως εκ τούτου, η παράμετρος κλίμακας i αντιστοιχεί στην τυπική απόκλιση σ της κατανομής του Gauss.

Το leveling της f βασισμένο σε αυτούς τους σηματοδευτές είναι το $\Lambda_{g_i} f$. Ο ακόλουθος μηχανισμός δημιουργεί μια αναπαράσταση πολλαπλής κλίμακας βάσει της οικογένειας των γκαουσιανών σηματοδευτών:

$$l_1 = \Lambda_{g_1} f, l_2 = \Lambda_{g_2} \Lambda_{g_1} f, \dots, l_n = \Lambda_{g_n} \Lambda_{g_{n-1}} \dots \Lambda_{g_2} \Lambda_{g_1} f$$

Η ακολουθία αυτή διασφαλίζει ότι το l_j είναι leveling του l_i για $j > i$, εξαιτίας της μεταβατικής ιδιότητας των levelings.

Στην εικόνα 3.19 παρουσιάζεται η εφαρμογή των μορφολογικών levelings στην εικόνα cameraman.tif, κλίμακας $i = 5$.



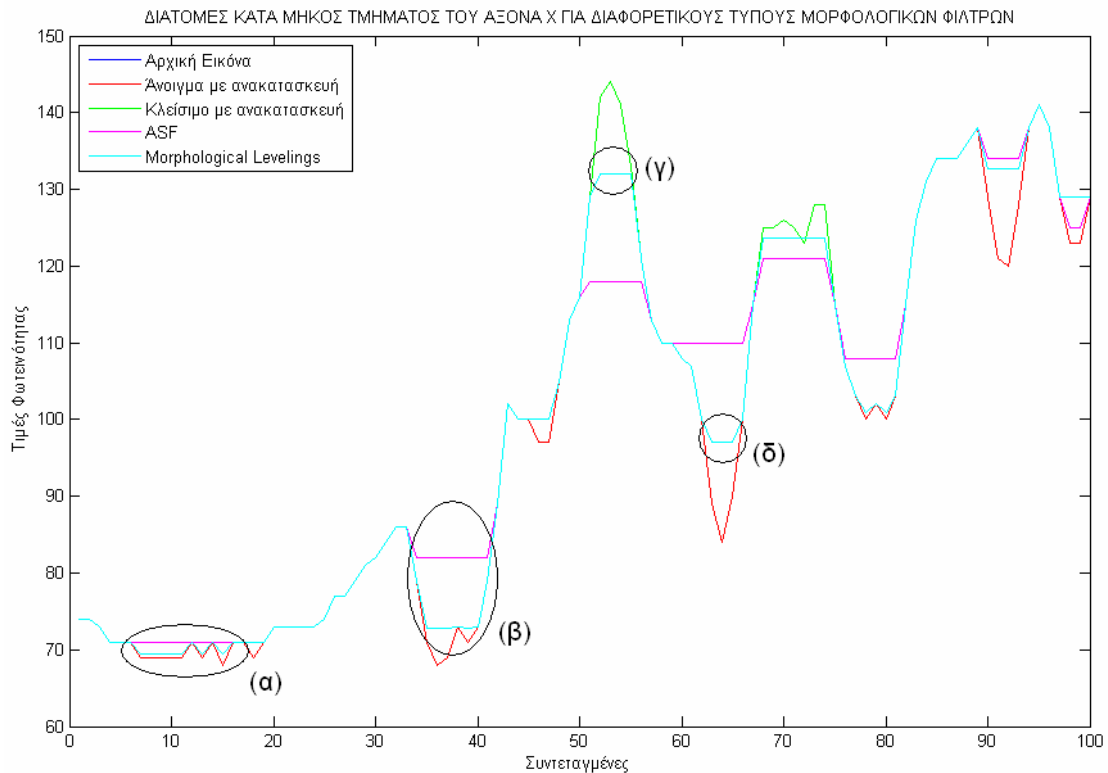
Εικόνα 3.19: Πρώτη σειρά (α) Αρχική εικόνα (cameraman.tif), (β) Leveling 1, (γ) Leveling 2. Δεύτερη σειρά (α) Leveling 3, (β) Leveling 4, (γ) Leveling 5.

Η παρουσίαση των μορφολογικών levelings στην εικόνα 3.19 φανερώνει τη σταδιακή συμμετρική ομαλοποίηση των αντικειμένων της εικόνας από τη μικρότερη στη μεγαλύτερη κλίμακα με τη δημιουργία ζωνών με ενιαίες τιμές φωτεινότητας. Ποιοτικά διαπιστώνεται διατήρηση των ακμών – όχι όμως και η ενίσχυσή τους.

Στο σχήμα 3.10 παρουσιάζεται αξιολόγηση των levelings με χρήση διατομών, σε σύγκριση και με άλλα μορφολογικά φίλτρα. Σημειώνεται ότι οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε τμήμα εικόνας QUICKBIRD, και συγκεκριμένα στο υπέρυθρο κανάλι, με χρήση δομικού στοιχείου δίσκου ακτίνας 4 εικονοστοιχείων και αντίστοιχης κλίμακας για τα levelings. Παρατηρείται ότι τα levelings διατηρούν πιο πιστά τις ακμές σε σύγκριση το ASF, και ως προς τις μεταβολές των τιμών φωτεινότητας και ως προς τη χωρική ακρίβειά τους (σημείο β). Παράλληλα, δεν παράγουν ψευδή ακρότατα, η ομαλοποίηση είναι συμμετρική όσον αφορά στα αντικείμενα χαμηλών και υψηλών τιμών φωτεινότητας (σημεία γ και δ) και διατηρούνται περισσότερα μικρά αντικείμενα (σημείο α). Τέλος, είναι σαφής η δημιουργία ζωνών με ενιαίες τιμές φωτεινότητας (flat zones), χωρίς τη δημιουργία νέων περιγραμμάτων.

Σημειώνεται, ωστόσο, ότι στα σημεία γ και δ, όπου καταγράφονται δύο από τις πιο έντονες ακμές, φαίνεται ότι οι γκαουσιανοί σημαδευτές επηρεάζουν έντονα τη θέση τους. Στο πλαίσιο της προ-επεξεργασίας της εικόνας για την ανίχνευση των ακμών, είναι σημαντική η ενίσχυσή τους. Για το λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί τεχνικές που συνδυάζουν τη συμμετρική ομαλοποίηση των levelings με την

ενίσχυση των ακμών που παρέχουν τα φίλτρα ανισοτροπικής διάχυσης (Καράντζαλος Κ., 2007).



Σχήμα 3.10: Διατομές κατά μήκος τμήματος του άξονα χ εικόνας QUICKBIRD, για διάφορους τύπους μορφολογικών φίλτρων.

Με την ανάλυση των μορφολογικών levelings ολοκληρώνεται η παρουσίαση του θεωρητικού υποβάθρου των τεχνικών προ-επεξεργασίας μιας ψηφιακής εικόνας, στο πλαίσιο της ανίχνευσης ακμών. Στο εδάφιο της περιγραφής μεθοδολογίας (παράγραφος 3.2) παρουσιάζονται περαιτέρω συγκρίσεις και συνδυασμοί των τεχνικών, στο πλαίσιο διερεύνησης εφαρμογής μιας ενιαίας μεθοδολογίας σε τηλεπισκοπικά δεδομένα ίδιου τύπου, βέλτιστης κατά το δυνατόν στην ομαλοποίηση των εικόνων με ταυτόχρονη ενίσχυση των ακμών τους.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι τεχνικές επεξεργασίας και αφορούν σε τελεστές ανίχνευσης ακμών, συσταδοποίηση (clustering) και φίλτρα υψής. Προηγουμένως, κρίνεται σκόπιμο να τονιστεί η **σημασία της προ-επεξεργασίας** μιας εικόνας προκειμένου να χρησιμοποιηθεί για οποιαδήποτε εφαρμογή. Η απαλοιφή του θορύβου που μπορεί να εμπεριέχει μια εικόνα – και πολλές φορές είναι εγγενής με το σύστημα της απεικόνισης, όπως στα radar – είναι καθοριστικής σημασίας για την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων και προηγείται των υπολοίπων τεχνικών. Όπως πριν την επεξεργασία τους οι δορυφορικές εικόνες διορθώνονται ραδιομετρικά για την απαλοιφή του θορύβου εξαιτίας των συνθηκών φωτισμού, της ατμόσφαιρας, του αναγλύφου κ.ά., έτσι και οι ψηφιακές εικόνες πρέπει να απαλλάσσονται από το θόρυβο που προκαλείται από ηλεκτρονικές παρεμβολές στο τηλεπισκοπικό σύστημα ή εξαιτίας δυσλειτουργιών του ανιχνευτή, και τελικά οδηγούν σε

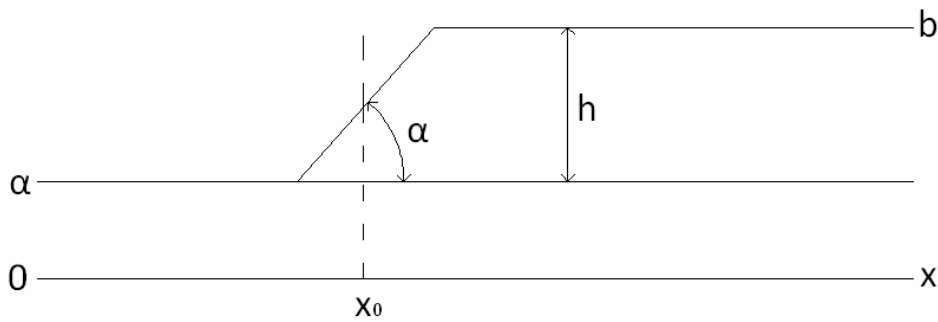
σφάλματα στην εκπομπή (εσωτερικός θόρυβος). Ο θόρυβος υποβιβάζει το εγγραφόμενο σήμα ή εξαλείφει όλη τη ραδιομετρική πληροφορία. Έτσι, η απαλοιφή του οδηγεί σε καλύτερη οπτική ερμηνεία των εικόνων, δεν υπάρχει απώλεια ποιότητας και τα τελικά αποτελέσματα κατά την επεξεργασία είναι περισσότερο αξιόπιστα. Παράλληλα, τεχνικές ομαλοποίησης των εικόνων, ενίσχυσης των στοιχείων ενδιαφέροντος και διατήρησης χαρακτηριστικών σε συγκεκριμένες επιθυμητές κλίμακες, διευκολύνουν τους τελεστές ανίχνευσης ακμών και τις τεχνικές μετα-επεξεργασίας.

3.1.3 Ανασκόπηση τεχνικών ανίχνευσης ακμών και άλλες τεχνικές επεξεργασίας

Η αυτόματη εξαγωγή της ακτογραμμής από ψηφιακά δεδομένα, αφορά στο πρόβλημα της *ανίχνευσης ορίων* των πεδίων της Όρασης Υπολογιστών και Επεξεργασίας Εικόνας, στα οποία η ανίχνευση ακμών είναι συνήθης προσέγγιση της ανίχνευσης ορίων (άλλη προσέγγιση είναι η κατάτμηση). Αυτό προκύπτει γιατί σύμφωνα με πολλές νευροφυσιολογικές και ψυχοφυσικές ενδείξεις, στο πιο τέλειο βιολογικό σύστημα όρασης που γνωρίζουμε, δηλαδή στο ανθρώπινο – αλλά και σε άλλα όπως του πιθήκου και γάτας – τα πρώτα στάδια επεξεργασίας πληροφορίας περιλαμβάνουν διεργασίες ανίχνευσης ακμών (Καράντζαλος Κ., 2000). Το γεγονός αυτό υπογραμμίζει τη σημαντικότητα των ακμών για την ερμηνεία των εικόνων.

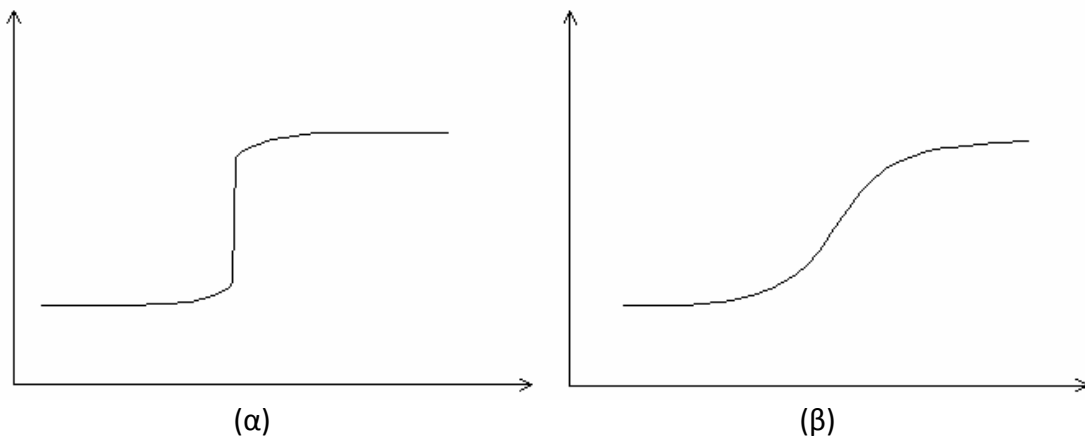
Η προσέγγιση της ανίχνευσης ορίων με την ανίχνευση ακμών βασίζεται στη θεμελιώδη παρατήρηση της *ασυνέχειας*. Δηλαδή, οι τιμές φωτεινότητας του γκρι της εικόνας στις οριογραμμές, ή κοντά σε αυτές, μεταβάλλονται απότομα. Επομένως, κάθε απότομη ασυνέχεια στις τιμές φωτεινότητας της εικόνας συνιστά ακμή. Ωστόσο, ακμή συνιστά και μια ομαλή μετάβαση από ένα επίπεδο φωτεινότητας σε ένα άλλο. Τεχνικά, οι μέθοδοι ανίχνευσης ακμών εντοπίζουν την ουσιώδη ασυνέχεια στις τιμές φωτεινότητας χρησιμοποιώντας λειτουργίες χωρικής διαφοροποίησης ή πρότυπα ακμών, και βρίσκουν εφαρμογή σε πολλά προβλήματα υπολογιστικής όρασης (π.χ. ανίχνευση χαρακτηριστικών).

Μια **ακμή** χαρακτηρίζεται γενικά από το ύψος της – διαφορά γκρίζων τόνων των εικονοστοιχείων που τη συνιστούν – την κλίση της και την τετμημένη της στο μέσο του κεκλιμένου τμήματος (αν υπάρχει) (σχήμα 3.11). Θεωρούμε ότι ακμή υπάρχει, όταν το ύψος της είναι μεγαλύτερο από μια προκαθορισμένη τιμή. Ο ιδανικός ανιχνευτής ακμών, θα ήταν αυτός ο οποίος θα μπορούσε να εντοπίσει και να δώσει με ακρίβεια το πλάτος ενός και μόνο εικονοστοιχείου, το οποίο θα ήταν στο μέσο ακριβώς της κλίσης (Καράντζαλος Κ., 2000). Η ανάλυση και μελέτη του σχήματος και της θέσης των ακμών δίνει χρήσιμες πληροφορίες για την υφή, τον προσανατολισμό και την κίνηση των αντικειμένων σε μια εικόνα, ενώ στη φωτογραμμετρία η ταύτιση των ομόλογων ακμών οδηγεί στη στερεοσκοπία (Γεωργόπουλος Α., 1998).



Σχήμα 3.11: Μονοδιάστατο μοντέλο ακμής τύπου ράμπας.

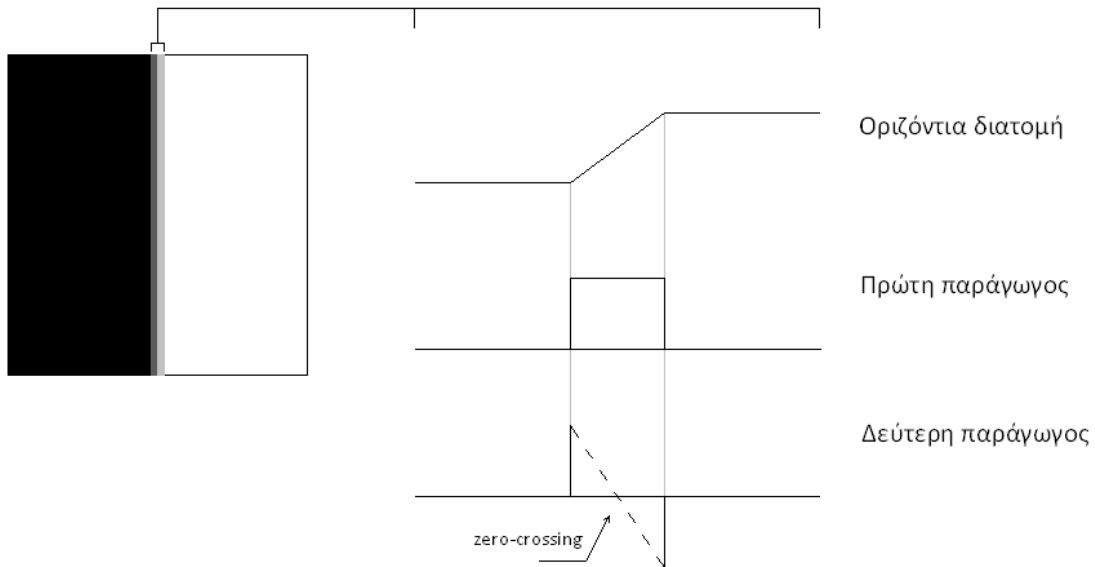
Εφόσον η ψηφιακή εικόνα αναπαρίσταται με τη μορφή πίνακα, η θέση μιας ακμής σε αυτήν βρίσκεται στη μετάβαση από ένα επίπεδο φωτεινότητας σε ένα άλλο. Σύμφωνα με τον Καράντζαλο Κ. (2000), η διατομή μιας ιδανικής ακμής σε μια grayscale εικόνα θα ήταν αυτή του σχήματος 3.12 (α). Ωστόσο, η διαβάθμιση των τόνων της φωτεινότητας στην περιοχή των ακμών εξαιτίας της δειγματοληψίας των γκρίζων τόνων, στην πραγματικότητα δημιουργούν ένα προφίλ όπως αυτό του σχήματος 3.12 (β).



Σχήμα 3.12: (α) Ιδανική ακμή (β) Ακμή σε grayscale εικόνες (Καράντζαλος Κ., 2000).

Η βασική ιδέα πίσω από τις περισσότερες τεχνικές ανίχνευσης ορίων (στο πεδίο του χώρου) είναι ο υπολογισμός και προσδιορισμός των *τοπικών παραγώγων*. Η χρήση τους προκύπτει από το γεγονός ότι η ψηφιακή εικόνα είναι μια *διακριτή* συνάρτηση και για τον εντοπισμό των ακμών χρησιμοποιούνται οι διαφορές των τιμών φωτεινότητας, δηλαδή οι παράγωγοι της συνάρτησης της εικόνας. Οι τελεστές που χρησιμοποιούνται για το σκοπό αυτό, και ονομάζονται **τελεστές ανίχνευσης ακμών**, αποτελούν γραμμικούς και μορφολογικούς φορμαλισμούς της πρώτης και της δεύτερης παραγώγου. Η πρώτη παράγωγος μιας ακμής είναι μηδέν για όλες τις περιοχές όπου η ένταση του γκρίζου τόνου είναι σταθερή και παίρνει μια σταθερή τιμή όπου η ένταση αυξάνεται ή μειώνεται γραμμικά. Η δεύτερη παράγωγος είναι μηδέν για όλες τις θέσεις, εκτός από εκεί που αρχίζει (ή τελειώνει) η αύξηση (ή μείωση) της έντασης. Επομένως, το μέγεθος της πρώτης παραγώγου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση μιας ακμής – καθώς το σήμα στις ακμές

μεταβάλλεται με ταχύτερο ρυθμό από εκείνον των υπολοίπων σημείων της εικόνας, κι επομένως σε αυτές μεγιστοποιείται η παράγωγος της εικόνας – ενώ το πρόσημο της δεύτερης παραγώγου προσδιορίζει εάν το εικονοστοιχείο της ακμής βρίσκεται στη «σκοτεινή» ή στη «φωτεινή» πλευρά και τα zero-crossings δηλώνουν την ύπαρξη ακμής (σχήμα 3.13).



Σχήμα 3.13: Πρώτη και δεύτερη παράγωγος ακμής τύπου ράμπας.

Ο υπολογισμός της πρώτης παραγώγου της διακριτής συνάρτησης f μιας ψηφιακής εικόνας περιγράφεται από τη διαφοροποίηση της έντασης σε κάθε σημείο της εικόνας. Η διαφοροποίηση της έντασης σε μια εικόνα $f(x, y)$ στη θέση (x, y) ορίζεται ως το δισδιάστατο διάνυσμα:

$$G[f(x, y)] = \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{bmatrix}$$

Ωστόσο, για την ανίχνευση των ακμών χρησιμοποιείται το μέγεθος του διανύσματος, που καλείται κλίση (gradient) και συμβολίζεται $mag(G) = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}$. Από τις πρώτες προσεγγίσεις γραμμικών φορμαλισμών της πρώτης παραγώγου με χρήση πινάκων συνέλιξης αποτελούν οι τελεστές ανίχνευσης ακμών του Roberts (1965), του Prewitt (1970) και του Sobel (1970).

Ωστόσο, επειδή οι συγκεκριμένες τεχνικές μειονεκτούν κατά την εφαρμογή τους σε εικόνες με θόρυβο λόγω της ύπαρξης πολλών κορυφών, είναι δυνατή η χρήση της *δεύτερης παραγώγου* κατά την οποία, όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.13, οι θέσεις των ακμών παρουσιάζονται στις μηδενικές διασταυρώσεις (zero-crossings). Είναι σαφές ότι ο υπολογισμός των συγκεκριμένων σημείων είναι πολύ πιο εύκολος από τον υπολογισμό των μεγίστων της πρώτης παραγώγου, κυρίως ως προς τη δυνατότητα ανίχνευσης αληθούς ακμής κι όχι θορύβου υψηλής συχνότητας.

Ο υπολογισμός της δεύτερης παραγώγου δίνεται με προσέγγιση της Λαπλασιανής:

$$L[f(x, y)] = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2}$$

Επειδή και η δεύτερη παράγωγος είναι ευαίσθητη στην παρουσία θορύβου, αναπτύχθηκαν γραμμικοί φορμαλισμοί αυτής που αντιμετωπίζουν το συγκεκριμένο μειονέκτημα με βάση τη συνέλιξη της εικόνας με ένα Laplacian of Gaussian (LoG).

Ο αλγόριθμος του **Canny (1986)** είναι γνωστός ως ο βέλτιστος ανιχνευτής ακμών και αποτελεί γραμμικό φορμαλισμό της πρώτης παραγώγου. Οι στόχοι οι οποίοι τέθηκαν από τον Canny, στο πλαίσιο της ενίσχυσης των ήδη υπαρχόντων τελεστών ανίχνευσης ακμών, ήταν τα εξής τρία κριτήρια. Καθώς είναι σημαντικό να ανιχνεύονται όλες οι αληθείς και μόνον ακμές, το πρώτο κριτήριο που τέθηκε ήταν ο *χαμηλός δείκτης σφάλματος*. Το δεύτερο κριτήριο ήταν ο *σωστός εντοπισμός* των ακμών, δηλαδή η ελαχιστοποίηση της απόστασης μεταξύ των εικονοστοιχείων που ανιχνεύονται από τον τελεστή και του «κέντρου» της αληθούς ακμής. Το τρίτο κριτήριο που έθεσε ο Canny ήταν η *μοναδικότητα* μιας ακμής σε μια θέση.

Βάσει των παραπάνω, ο αλγόριθμος αρχικά ομαλοποιεί την εικόνα για την απαλοιφή του θορύβου. Η ομαλοποίηση γίνεται με γκαουσιανή συνέλιξη παράλληλη στη διεύθυνση των ακμών και με μικρή τιμή τυπικής απόκλισης. Το μέγεθος της μάσκας επηρεάζει την ευαισθησία του τελεστή στο θόρυβο. Στη συνέχεια υπολογίζεται η κλίση των τιμών φωτεινότητας (gradient) στην ομαλοποιημένη εικόνα, για μια πρώτη εκτίμηση των ακμών σε όλες τις διευθύνσεις (οριζόντια, κάθετα, διαγώνια). Η κλίση μπορεί να υπολογιστεί για παράδειγμα με χρήση των τελεστών Roberts, Prewitt ή Sobel. Έτσι, από τις εκτιμήσεις των παραγώγων, απαλείφεται όποιο εικονοστοιχείο δεν έχει μέγιστη τιμή, εφόσον η κλίση δίνει τοπικό μέγιστο στη διεύθυνση του gradient. Με χρήση κατωφλίωσης υστέρησης (hysteresis) στα εναπομείναντα εικονοστοιχεία, επιτυγχάνεται η τελική επιλογή των ακμών.

Εκτός από γραμμικούς φορμαλισμούς της πρώτης και της δεύτερης παραγώγου, έχουν αναπτυχθεί και διαδικασίες βασισμένες στη μη γραμμική μορφολογική *διαστολή* και *διάβρωση*. Οι **Beucher και Lantuejoul (1979)** έδειξαν ότι το μέτρο της πρώτης παραγώγου δίνεται από τη διαφορά διαστολής-διάβρωσης προς δύο φορές την ακτίνα του δομικού στοιχείου, όταν αυτή τείνει στο μηδέν, δηλαδή:

$$|\text{grad } f(x)| = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\text{dilation}(f, B_r) - \text{erosion}(f, B_r)}{2r}$$

Στις ψηφιακές εικόνες η παραπάνω εξίσωση επεκτείνεται με τη διαφορά $\text{dilation}(f, B) - \text{erosion}(f, B)$ για δισδιάστατη διακριτή f και δομικό στοιχείο B . Σημειώνεται ότι η εφαρμογή γίνεται σε ομαλοποιημένη εικόνα.

Το **1989**, οι **Van Vliet et al.** συμπλήρωσαν τη θεωρία των Beucher και Lantuejoul (1979) με το *μορφολογικό φορμαλισμό της δεύτερης παραγώγου*. Ο αλγόριθμος που προτείνουν βασίζεται στο μη γραμμικό Laplace του Beckers:

$$\nabla^2 f = \text{dilation}(f, B) + \text{erosion}(f, B) - 2f$$

Υποστηρίζουν ότι ο συγκεκριμένος υπολογισμός της λαπλασιανής πλεονεκτεί επειδή προσανατολίζεται στις πιο σχετικές θέσεις ύπαρξης ακμών, βάσει της πρώτης παραγώγου. Επεκτείνοντας το LoG των Marr και Hildreth, ανέπτυξαν το παρακάτω μοντέλο. Αρχικά η εικόνα φιλτράρεται με ένα γκαουσιανό φίλτρο (έστω {εικόνα 1}) και στην ομαλοποιημένη εικόνα υπολογίζονται το μη γραμμικό Laplace (έστω {εικόνα 2}) κι ένας τελεστής ενίσχυσης ακμών (έστω {εικόνα 3}), ο οποίος δίνεται από την παρακάτω εξίσωση του Lee:

$$I_{edge-strength}(x, y) = \min \{ I_{blurred} - erosion(I_{blurred}), dilation(I_{blurred}) - I_{blurred} \}$$

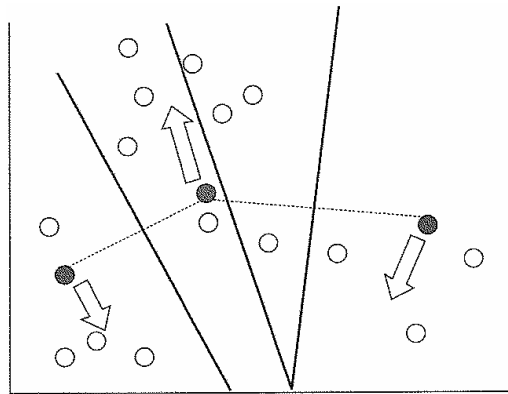
Στη συνέχεια εντοπίζονται τα zero-crossings στην {εικόνα 2} και η εικόνα που προκύπτει πολλαπλασιάζεται με την {εικόνα 3}. Τελικά, με την εφαρμογή κατάλληλης κατωφλίωσης προκύπτει η τελική εικόνα ακμών.

Στο πλαίσιο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας εφαρμόστηκαν ο αλγόριθμος του Canny και ο μορφολογικός φορμαλισμός της δεύτερης παραγώγου έπειτα από υλοποίησή του σύμφωνα με τον αλγόριθμο των Van Vliet et al. (1989). Τα αποτελέσματά τους παρουσιάζονται στο εδάφιο 3.2.

Επειδή όλοι οι τελεστές ανίχνευσης ακμών είναι ευαίσθητοι σε όλες τις εναλλαγές των τιμών φωτεινότητας στο πεδίο της εικόνας, οδηγούν και στην ανίχνευση *μη επιθυμητών ή μη πραγματικών ακμών*, πρόβλημα τα οποίο λύνεται με τη μέτρηση της εναλλαγής της υφής, κατάτμηση, ταξινόμηση (classification) και συσταδοποίηση (clustering). Στο πλαίσιο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας εφαρμόστηκαν οι αλγόριθμοι K-μέσου (συσταδοποίηση) και εντροπίας (ανάλυση υφής), οι οποίοι υπάρχουν στο περιβάλλον του Matlab. Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε βάσει των συγκεκριμένων αλγορίθμων, περιγράφεται στο εδάφιο 3.2, ενώ τα αποτελέσματά τους επισυνάπτονται στο κεφάλαιο 4. Στη συνέχεια, αναπτύσσεται το θεωρητικό υπόβαθρων των συγκεκριμένων τεχνικών.

Στη στατιστική και την αυτόματη εκμάθηση, η **συσταδοποίηση K-μέσου** (k-means clustering) είναι από τους απλούστερους μη επιβλεπόμενους αλγορίθμους που αντιμετωπίζει το γνωστό πρόβλημα κατηγοριοποίησης σε κλάσεις, δηλαδή ομάδες εικονοστοιχείων που αντιπροσωπεύουν ένα αντικείμενο της εικόνας. Ο όρος 'k-means', δηλαδή K-μέσος, χρησιμοποιήθηκε αρχικά το 1967 από τον James MacQueen, ωστόσο η αρχική ιδέα ανήκει στον Hugo Steinhaus από το 1956 και ο αλγόριθμος προτάθηκε αρχικά το 1957 από τον Stuart Lloyd ως μια τεχνική ψηφιακής αναπαράστασης δειγμάτων αναλογικών σημάτων (pulse-code modulation). Η συσταδοποίηση είναι μια από τις πιο χρήσιμες διεργασίες στη διαδικασία εξόρυξης δεδομένων (data mining) για την ανακάλυψη συστάδων και για τον προσδιορισμό κατανομών και προτύπων (Χαλκίδη και Βαζιργιάννης, 2005). Το πρόβλημα της συσταδοποίησης σχετίζεται με την τμηματοποίηση (partitioning) ενός συνόλου δεδομένων σε συστάδες, έτσι ώστε τα στοιχεία του συνόλου των δεδομένων που ανήκουν σε μια συστάδα να είναι περισσότερο όμοια μεταξύ τους από ότι είναι με τα στοιχεία των υπολοίπων συστάδων (Χαλκίδη και Βαζιργιάννης, 2005). Έτσι, το βασικό μέλημα της διαδικασίας είναι η οργάνωση προτύπων σε «λογικές» συστάδες, οι οποίες επιτρέπουν τον προσδιορισμό ομοιοτήτων και διαφορών, καθώς και την εξαγωγή συμπερασμάτων γι' αυτά (Χαλκίδη και Βαζιργιάννης, 2005).

Ο K-μέσος ανήκει στην κατηγορία της διαιρετικής συσταδοποίησης (partitional clustering) καθώς βασίζεται στην άμεση αποσύνθεση του συνόλου των δεδομένων σε ένα σύνολο ασυσχέτιστων συστάδων (Χαλκίδη και Βαζιργιάννης, 2005). Ακολουθεί μια τεχνική επαναληπτικής δομής που χρησιμοποιείται για να χωρίσει μια εικόνα σε K κλάσεις. Η διαδικασία που ακολουθεί, αποτελεί έναν απλό και εύκολο τρόπο συσταδοποίησης ενός δοσμένου συνόλου δεδομένων σε ορισμένου πλήθους κλάσεις. Η κεντρική ιδέα, λοιπόν, είναι ο καθορισμός K κέντρων βάρους (centroids), ένα για κάθε κλάση (σχήμα 3.14). Επειδή η διαφορετική θέση των αρχικών κέντρων δημιουργεί και διαφορετικό αποτέλεσμα, η τοποθέτησή τους πρέπει να γίνεται με έναν έξυπνο τρόπο. Έτσι, η καλύτερη επιλογή είναι να τοποθετηθούν όσο το δυνατόν πιο μακριά γίνεται το ένα κέντρο από το άλλο. Ο αριθμός K μπορεί να δοθεί είτε από τον χρήστη, είτε τυχαία, είτε ευρετικά (heuristic).



Σχήμα 3.14: Αρχικοποίηση K-μέσου (Χαλκίδη και Βαζιργιάννης, 2005).

Η αντικειμενική συνάρτηση την οποία προσπαθεί να ελαχιστοποιήσει ο αλγόριθμος είναι η μέση τετραγωνική απόσταση κάθε παρατήρησης από τα πλησιέστερα κέντρα των συστάδων (Αργιαλάς, 1998). Δεδομένου ενός συνόλου παρατηρήσεων (x_1, x_2, \dots, x_n) , όπου κάθε παρατήρηση είναι ένα d-διάστατο πραγματικό διάνυσμα, η συσταδοποίηση K-μέσου ορίζει τη συμμετοχή τους σε k σύνολα $S = \{S_1, S_2, \dots, S_k\}$, $k \leq n$ ούτως ώστε να ελαχιστοποιείται εντός της εκάστοτε κλάσης το άθροισμα των τετραγώνων της απόστασης κάθε παρατήρησης από τα κέντρα βάρους, μέσω της συνάρτησης εύρεσης απόκλισης. Δηλαδή

$\arg \min_S \sum_{i=1}^k \sum_{x_j \in S_i} \|x_j - \mu_i\|^2$, όπου μ_i το κέντρο βάρους της κλάσης S_i . Με χρήση του

μέσου όρου των παρατηρήσεων κάθε κλάσης υπολογίζονται τα νέα κέντρα των συστάδων και ο αλγόριθμος επαναλαμβάνεται έως ότου συγκλίνει.

Τα βήματα που εκτελεί ο αλγόριθμος με μορφή ψευδοκώδικα είναι τα εξής:

(1) Εύρεση των αρχικών κέντρων μ_i , $i = 1, 2, \dots, k$, για τις k συστάδες. Για κάθε επανάληψη $r = 1, \dots, r_{\max}$:

(2) Υπολογισμός της απόστασης κάθε στοιχείου του συνόλου δεδομένων από το κέντρο κάθε συστάδας.

- (3) Κάθε στοιχείο αντιστοιχίζεται στη συστάδα για την οποία ελαχιστοποιείται η απόστασή του από το κέντρο βάρους της.
- (4) Υπολογισμός των νέων κέντρων των συστάδων.
- (5) Επανάληψη έως ότου συγκλίνει ο αλγόριθμος (ελαχιστοποίηση ολικού τετραγωνικού σφάλματος).

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα του αλγορίθμου είναι η απλότητα και η ταχύτητά του, επιτρέποντας την εφαρμογή του σε μεγάλες βάσεις δεδομένων. Επειδή όμως η επιλογή των συστάδων είναι τυχαία, ο αλγόριθμος δεν εγγυάται βέλτιστα αποτελέσματα καθώς αυτά εξαρτώνται από τις αρχικές συστάδες. Παράλληλα δεν είναι επιτεύξιμος ο υπολογισμός του ελαχίστου (global minimum), γιατί οι προς συσταδοποίηση παρατηρήσεις είναι διακριτές, οπότε το ελάχιστο που «φτάνει» ο αλγόριθμος δεν μπορεί να ειπωθεί «τοπικό ελάχιστο».

Η συσταδοποίηση K-μέσου βρίσκει εφαρμογές στην Όραση Υπολογιστών, και συγκεκριμένα στην κατάτμηση εικόνας, συνδράμοντας στην ανίχνευση περιγραμμάτων και στην αναγνώριση αντικειμένων. Επειδή όμως στις συγκεκριμένες εφαρμογές ο υπολογισμός της ευκλείδειας απόστασης είναι αναποτελεσματικός (καθώς υποθέτει ότι η διαφορά είναι ένα κατάλληλο μέτρο της διασποράς συστάδων), συνήθως χρησιμοποιούνται αποστάσεις με βάρη αξιοποιώντας εικονοσυντεταγμένες, τιμές φωτεινότητας και υφή.

Μια διαφορετική λύση στο πρόβλημα της ανίχνευσης μη επιθυμητών ή μη πραγματικών ακμών από τους τελεστές ανίχνευσης ακμών είναι η **μέτρηση της εναλλαγής της υφής**. Η υφή αποτελεί μια έκφραση των μεμονωμένων σχημάτων, μεγεθών, προτύπων, σκιών και τόνων ως προς τη συχνότητα των αλλαγών τους. Καθορίζει την «ομαλότητα» ή την «τραχύτητα» των αντικειμένων της εικόνας. Ο φωτοερμηνευτής συχνά μπορεί να διακρίνει χαρακτηριστικά εικόνων με παρόμοιες ανακλαστικότητες, στηριζόμενος σε διαφορές στην υφή (Αργιαλάς, 1999).

Υπάρχουν διάφοροι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται για το σκοπό αυτό και διακρίνονται σε στατιστικούς, γεωμετρικούς, επεξεργασίας σήματος και βάσει μοντέλων. Παραδείγματα τέτοιων αλγορίθμων είναι ο υπολογισμός της τυπικής απόκλισης, η υφή του Haralick, τα τυχαία μαρκοβιανά πεδία, ο μετασχηματισμός Fourier, τα φίλτρα Gabor και η εντροπία. Οι συγκεκριμένες τεχνικές αναγνώρισης αντικειμένων είναι απαραίτητες σε μια πληθώρα εφαρμογών σε τομείς, όπως οι Γεωεπιστήμες, η Ιατρική, η Ρομποτική, η Επεξεργασία Εικόνας, η Τηλεπισκόπηση κ.ά..

Η ανάλυση υφής αναφέρεται στο χαρακτηρισμό των περιοχών μιας εικόνας βάσει του περιεχομένου της υφής τους. Έχει σκοπό να ποσοτικοποιήσει έννοιες διαισθητικές, όπως «απαλό» ή «τραχύ», ως συνάρτηση της τυπικής απόκλισης των τιμών φωτεινότητας των εικονοστοιχείων της εικόνας. Για παράδειγμα, σε περιοχές με απαλή υφή, το εύρος των γειτονικών τιμών φωτεινότητας ενός εικονοστοιχείου, είναι μικρό. Αντίθετα, σε τραχείες περιοχές, το εύρος αυτό είναι μεγάλο. Η ανάλυση υφής ενδείκνυται όταν τα αντικείμενα περιγράφονται περισσότερο από την υφή τους παρά από τις τιμές φωτεινότητας (π.χ. SAR εικόνες).

Στο πλαίσιο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, η ανάλυση υφής έγινε με μέτρηση της *εντροπίας*, η οποία αποτελεί στατιστική μέθοδο. Στη Θεωρία Πληροφορίας, η εντροπία αποτελεί μια μέτρηση της μέσης αβεβαιότητας που σχετίζεται με μια τυχαία μεταβλητή. Επομένως, αποτελεί μια μέτρηση «αταξίας» ή, για την ακρίβεια, μη-προβλεψιμότητας. Για παράδειγμα, μια σειρά ρίψεων ενός αληθούς νομίσματος έχει μέγιστη εντροπία, εφόσον δεν υπάρχει τρόπος πρόβλεψης μιας επόμενης ρίψης.

Ο όρος συχνά αναφέρεται στην εντροπία του Shannon, η οποία ποσοτικοποιεί – συνήθως σε bits – την αναμενόμενη αβεβαιότητα μιας τυχαίας μεταβλητής να έχει ως περιεχόμενο την πληροφορία που εμπεριέχεται στο μήνυμα. Ισοδύναμα, η εντροπία του Shannon είναι η μέτρηση της μέσης τιμής του περιεχομένου της πληροφορίας που δεν λαμβάνει κάποιος, όταν δεν γνωρίζει την τιμή της τυχαίας μεταβλητής. Επομένως, κατά μία έννοια, η εντροπία ενός μηνύματος είναι η *μέτρηση της πληροφορίας που αληθινά εμπεριέχει*.

Η εντροπία H μιας διακριτής τυχαίας μεταβλητής X με πιθανές τιμές $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ δίνεται από τη σχέση $H = E(I(X))$, όπου E η αναμενόμενη τιμή και I η πληροφορία της μεταβλητής X . Η $I(X)$ είναι κι αυτή μια τυχαία μεταβλητή. Έστω p η συνάρτηση πιθανότητας της X , τότε η εντροπία δίνεται από τη σχέση:

$$H(X) = \sum_{i=1}^n p(x_i) I(x_i) = -\sum_{i=1}^n p(x_i) \log_b p(x_i)$$

όπου b η βάση του λογαρίθμου (συνήθεις τιμές το 2, ο αριθμός e του Euler και το 10). Ανάλογα με την τιμή της βάσης μεταβάλλεται και η μονάδα της εντροπίας, για παράδειγμα όταν $b = 2$, η μονάδα είναι bits. Στην περίπτωση που $p_i = 0$ για κάποιο i , ο όρος μηδενίζεται σύμφωνα με το όριο $\lim_{p \rightarrow 0^+} p \log p = 0$. Επομένως, η εντροπία ορίζεται με βάσει ένα μοντέλο πιθανοτήτων και ορίζει το μέσο αριθμό των bits-ανά-σύμβολο που απαιτεί η κωδικοποίηση μιας πληροφορίας.

Σε μια εικόνα, η εντροπία είναι ο (θεωρητικά) ελάχιστος αριθμός bits/pixel (τιμή φωτεινότητας) που απαιτείται για την κωδικοποίησή της. Επομένως, στην εξίσωση

$$H = -\sum_{k=1}^K P_k \log_2 P_k, \quad K \text{ είναι ο αριθμός των διαφόρων τιμών φωτεινότητας που}$$

υπάρχουν στην εικόνα και P_k η πιθανότητα εμφάνισης της εκάστοτε τιμής. Οι πιθανότητες P_k υπολογίζονται από το ιστόγραμμα της εικόνας. Εάν η τιμή k εμφανίζεται n φορές στην εικόνα I (διάστασης $M \times N$ εικονοστοιχείων), η πιθανότητα P_k θα είναι ίση με $n/(M \times N)$. Μπορεί να αποδειχτεί ότι η εντροπία έχει μέγιστη τιμή όταν $P_k = \frac{1}{K}$, το οποίο αντιπροσωπεύει ένα επίπεδο ιστόγραμμα. Σε αυτή την περίπτωση και δεδομένου ότι $K = 2^B$, η εντροπία θα είναι

$E = -\sum_{k=0}^{K-1} \frac{1}{K} \log_2 \left\{ \frac{1}{K} \right\} = B$. Η εντροπία μιας εικόνας λαμβάνει την ελάχιστη τιμή της όταν υπάρχει μια μόνο τιμή φωτεινότητας (εφόσον $\log_2 1 = 0$). Άρα, $0 \leq E(I) \leq B$.

Με βάσει τους αλγορίθμους του K-μέσου και της εντροπίας, λοιπόν, είναι δυνατός ο διαχωρισμός ξηράς και θάλασσας – όπως θα περιγραφεί στο επόμενο εδάφιο – και τελικά η ανίχνευση της ακτογραμμής, που αποτελεί και την επιθυμητή ακμή. Ωστόσο, οι μέθοδοι ανίχνευσης ακμών, αν και αποτελούν μια απλή διαδικασία εν συγκρίσει για παράδειγμα με τις μεθόδους κατάτμησης, υποφέρουν από το γεγονός ότι τα εικονοστοιχεία των ακμών που παράγονται από τους τελεστές είναι αρκετά ασυνεχή και σπάνια χαρακτηρίζουν εντελώς μια ακτογραμμή. Σε αυτό συμβάλλουν αρνητικά η παρουσία εναπομείναντος θορύβου και η σύνθετη υφή. Η αποκατάσταση αυτού του προβλήματος υπολογιστικά είναι μια απαιτητική διαδικασία ακόμα και σε μια χονδροειδή προσέγγιση. Επομένως, είναι απαραίτητη η *μετα-επεξεργασία* της εικόνας, κατά την οποία αποκαθίσταται η συνεκτικότητα των ανιχνευμένων χαρακτηριστικών, με χρήση μορφολογικών μετασχηματισμών και αντίστοιχους αλγορίθμους, και είναι απαραίτητη για τη διαμόρφωση μιας συνεχούς καμπύλης. Τέλος, στάδιο της μετα-επεξεργασίας αποτελεί η ποιοτική αλλά και ποσοτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, με χρήση κατάλληλων δεικτών.

3.1.4 Ανασκόπηση εργαλείων μορφολογικής ανακατασκευής

Στο πλαίσιο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας διαπιστώθηκε ότι η εξαγωγή μιας ακτογραμμής με τη βοήθεια της συσταδοποίησης ή της υφής δεν αποτελεί μια εύκολη διαδικασία. Στο επόμενο εδάφιο θα περιγραφεί αναλυτικά η μεθοδολογία με την οποία εξάγεται τελικά η ακτογραμμή – όπως αυτή έχει ανιχνευτεί αρχικά με τους τελεστές ανίχνευσης ακμών – και η οποία περιλαμβάνει μια σειρά από εργαλεία μορφολογικής ανακατασκευής του περιβάλλοντος του Matlab. Η χρήση της κρίθηκε αναγκαία για τους εξής λόγους: **1)** λόγω των ασυνεχειών που προέκυψαν από τους τελεστές ανίχνευσης ακμών και **2)** λόγω του ότι και η υλοποίηση της συσταδοποίησης και της υφής δεν οδήγησαν σε βέλτιστα αποτελέσματα, με αποτέλεσμα αρκετές εναπομείνουσες ακμές. Πριν την περιγραφή της μεθοδολογίας, λοιπόν, παρουσιάζονται τα εργαλεία αυτά και η χρήση τους. Σημειώνεται ότι ο συνδυασμός τους προκύπτει από τις *ανάγκες της εκάστοτε απεικόνισης*, βάσει της προ-επεξεργασίας και της επεξεργασίας που έχει υποστεί, και δεν ήταν δυνατόν να είναι ενιαίος. Επιπλέον, κάθε απεικόνιση έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά κι επομένως διαφορετικές δυσκολίες ως προς την επεξεργασία της.

- **bwareaopen**: Η συγκεκριμένη εντολή αποτελεί μορφολογικό άνοιγμα μιας δυαδικής εικόνας κι επομένως η χρήση της οδηγεί στην αφαίρεση μικρών, φωτεινών αντικειμένων. Η σύνταξή της γίνεται ως εξής:

$BW2 = bwareaopen(BW, P)$ ή $BW2 = bwareaopen(BW, P, conn)$

Δηλαδή, αφαιρούνται από τη δυαδική εικόνα BW όλα τα συνδεδεμένα αντικείμενα που έχουν λιγότερα από P εικονοστοιχεία, σε γειτονιά 4 ή 8 εικονοστοιχείων στην περίπτωση δισδιάστατης συνεκτικότητας, παράγοντας μια

άλλη δυαδική εικόνα $BW2$. Ο αλγόριθμος αρχικά καθορίζει όλα τα συνδεδεμένα αντικείμενα, υπολογίζει την επιφάνειά τους και τελικά αφαιρεί τα μικρά αντικείμενα.

- **imfill**: Η χρήση αυτής της εντολής «γεμίζει» περιοχές της εικόνας και «τρύπες». Η σύνταξη που χρησιμοποιήθηκε είναι η εξής:

$BW2 = imfill(BW, 'holes')$ ή $BW2 = imfill(BW, conn, 'holes')$

Σύμφωνα με αυτή, «γεμίζουν» οι «τρύπες» της δυαδικής εικόνας BW , όπου «τρύπα» είναι ένα σύνολο εικονοστοιχείων υποβάθρου που περιβάλλεται από εικονοστοιχεία του προσκηνίου, σε γειτονιά 4 ή 8 εικονοστοιχείων στην περίπτωση δισδιάστατης συνεκτικότητας. Η εντολή αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε εικόνες grayscale.

- **bwmorph**: Η συγκεκριμένη εντολή εκτελεί μορφολογικές λειτουργίες σε δυαδικές εικόνες, και συντάσσεται ως εξής:

$BW2 = bwmorph(BW, operation)$ ή $BW2 = bwmorph(BW, operation, n)$, όταν η λειτουργία εκτελείται n φορές.

Οι λειτουργίες που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη μορφολογική ανακατασκευή είναι οι: 'clean', 'bridge' και 'thin'. Η λειτουργία 'clean' αφαιρεί μεμονωμένα εικονοστοιχεία, δηλαδή εικονοστοιχεία της μορφής:

0 0 0

0 1 0. Η λειτουργία 'bridge' ενώνει μη συνδεδεμένα εικονοστοιχεία, δηλαδή

0 0 0

σύνολα εικονοστοιχείων υποβάθρου (με τιμή 0) τίθενται ως εικονοστοιχεία προσκηνίου (με τιμή 1), εάν έχουν δύο μη μηδενικούς γείτονες που δεν είναι συνδεδεμένοι. Για παράδειγμα:

1 0 0 1 1 0

1 0 1 → 1 1 1. Η λειτουργία 'thin', όπου $n=Inf$, λεπταίνει αντικείμενα σε

0 0 1 0 1 1

γραμμές. Πολλές μορφολογικές λειτουργίες, όπως για παράδειγμα το μορφολογικό κλείσιμο, δημιουργούν ακμές πάχους μεγαλύτερου του ενός εικονοστοιχείου. Η λειτουργία της εκλέπτυνσης επιλύει το συγκεκριμένο πρόβλημα.

- Στο πλαίσιο των τεχνικών μορφολογικής ανακατασκευής που χρησιμοποιήθηκαν, συμπεριλαμβάνονται και η διάβρωση, το μορφολογικό άνοιγμα και το μορφολογικό κλείσιμο, οι λειτουργίες των οποίων παρουσιάστηκαν σε προηγούμενο εδάφιο.

Στο επόμενο εδάφιο παρουσιάζεται η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε σε περιβάλλον Matlab για την αυτόματη ανίχνευση ακτογραμμής από τα διατιθέμενα τηλεπισκοπικά δεδομένα.

3.2 Περιγραφή μεθοδολογίας

Κατά τη βιβλιογραφική ανασκόπηση παρουσιάστηκε μια πληθώρα ημι-αυτόματων και αυτόματων τεχνικών που έχουν αναπτυχθεί την τελευταία πενταετία στο πλαίσιο της ανίχνευσης ακτογραμμών από ποικίλα τηλεπισκοπικά δεδομένα. Η σημασία ανάπτυξης αυτών έγκειται, όπως έχει ήδη αναφερθεί, στις ολοένα και περισσότερες δυνατότητες αυτοματισμών για τη χαρτογράφηση και παρακολούθηση του παγκόσμιου περιβάλλοντος των διαθέσιμων ψηφιακών συστημάτων επεξεργασίας.

Η μεθοδολογία η οποία αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας αποτελείται από τρία επιμέρους στάδια: την προ-επεξεργασία, την επεξεργασία και τη μετα-επεξεργασία δορυφορικών δεδομένων, και παρουσιάζεται στις επόμενες παραγράφους. Το πεδίο εφαρμογών περιλαμβάνει οκτώ απεικονίσεις υψηλής και μέτριας χωρικής διακριτικής ικανότητας, καθώς και δύο απεικονίσεις radar. Η επεξεργασία τους έγινε σε περιβάλλον Matlab. Η συλλογή των δεδομένων έγινε από το Διαδίκτυο και από το Εργαστήριο Τηλεπισκόπησης, ενώ ο τύπος των αρχείων είναι '.tif', προκειμένου να αξιοποιηθεί όλη η δυνατή πληροφορία. Έτσι, όταν διαπιστώθηκε ότι μία εκ των δέκα απεικονίσεων είναι τύπου '.jpeg', απορρίφθηκε, εφόσον δεν ήταν δυνατή η επεξεργασία της λόγω συμπίεσης πληροφορίας. Λόγω αυτού, οι εφαρμογές μειώθηκαν σε εννέα – επτά υψηλής και μέτριας χωρικής διακριτικής ικανότητας και δύο radar. **Λόγω υπολογιστικού φόρτου, σημειώνεται ότι δεδομένα της ίδιας απεικόνισης αντιμετωπίστηκαν διαφορετικά, με την εφαρμογή διαφορετικών παραμέτρων, κυρίως όσον αφορά στη μετα-επεξεργασία τους.** Στη συνέχεια, επισυνάπτονται τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν με τα χαρακτηριστικά τους.

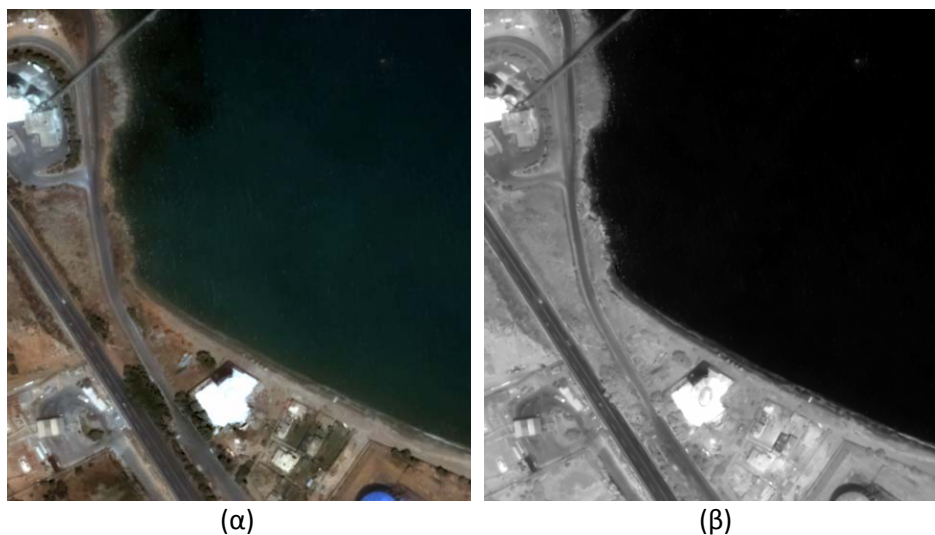
3.2.1 Παρουσίαση εφαρμογών

1^η ΕΦΑΡΜΟΓΗ – ΠΕΡΙΟΧΗ: ΑΚΤΗ ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ ΚΡΗΤΗΣ



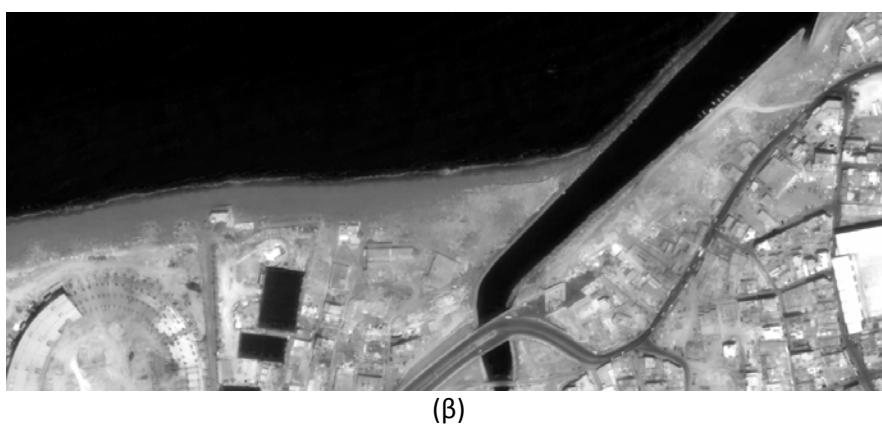
Εικόνα 3.20: (α) Απεικόνιση QUICKBIRD στο φυσικό έγχρωμο σύνθετο, (β) Απεικόνιση QUICKBIRD στο εγγύς υπέρυθρο κανάλι.

Η εικόνα 3.20 παρουσιάζει δορυφορική λήψη QUICKBIRD ακτής στην περιοχή του Ηρακλείου Κρήτης. Η λήψη έγινε στις 28/5/2002 και τα διαθέσιμα κανάλια ήταν το μπλε, το πράσινο, το κόκκινο και το εγγύς υπέρυθρο. Η συγκεκριμένη απεικόνιση έχει διακριτική ικανότητα 0,7 m (pan-sharpened). Οι διαστάσεις της αρχικής εικόνας ήταν 785x1500 εικονοστοιχεία. Τελικά, λόγω υπολογιστικού φόρτου, χρησιμοποιήθηκε τμήμα αυτής, διαστάσεων 512x512 εικονοστοιχείων, και παρουσιάζεται στην εικόνα 3.21. Επιπλέον, σημειώνεται ότι η ανίχνευση της θέσης της ακτογραμμής έγινε στο υπέρυθρο κανάλι, λόγω των φασματικών ιδιοτήτων του νερού.



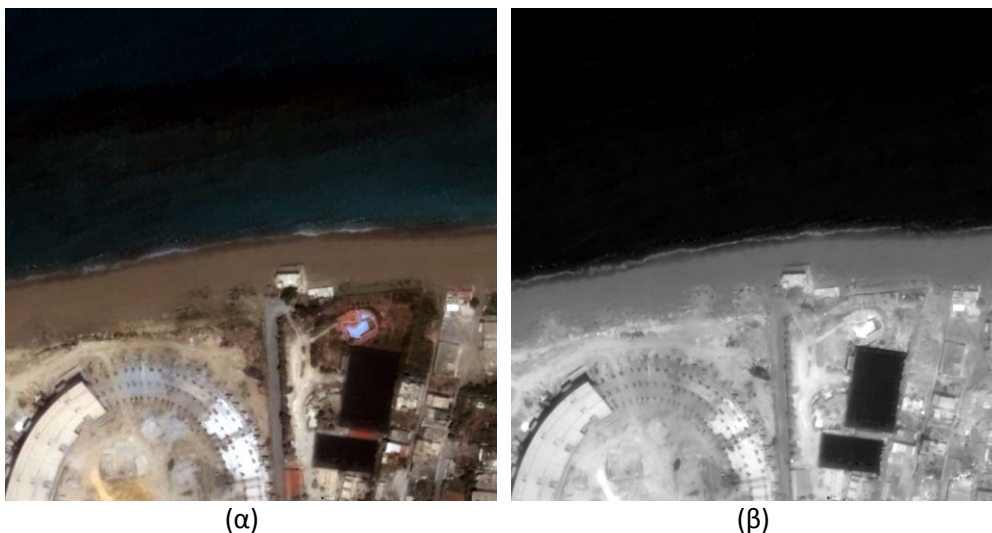
Εικόνα 3.21: (α) 1^η Εφαρμογή, τμήμα της αρχικής απεικόνισης QUICKBIRD στο φυσικό έγχρωμο σύνθετο, (β) 1^η Εφαρμογή, τμήμα της αρχικής απεικόνισης QUICKBIRD στο εγγύς υπέρυθρο κανάλι.

2^η ΕΦΑΡΜΟΓΗ – ΠΕΡΙΟΧΗ: ΑΚΤΗ ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ ΚΡΗΤΗΣ



Εικόνα 3.22: (α) Απεικόνιση QUICKBIRD στο φυσικό έγχρωμο σύνθετο, (β) Απεικόνιση QUICKBIRD στο εγγύς υπέρυθρο κανάλι.

Η εικόνα 3.22 παρουσιάζει δορυφορική λήψη QUICKBIRD ακτής στην περιοχή του Ηρακλείου Κρήτης. Η λήψη έγινε στις 28/5/2002 και τα διαθέσιμα κανάλια ήταν το μπλε, το πράσινο, το κόκκινο και το εγγύς υπέρυθρο. Η συγκεκριμένη απεικόνιση έχει διακριτική ικανότητα 0,7 m (pan-sharpened). Οι διαστάσεις της αρχικής εικόνας ήταν 523x1222 εικονοστοιχεία. Τελικά, λόγω υπολογιστικού φόρτου, χρησιμοποιήθηκε τμήμα αυτής, διαστάσεων 512x512 εικονοστοιχείων, και παρουσιάζεται στην εικόνα 3.23. Επιπλέον, σημειώνεται ότι η ανίχνευση της θέσης της ακτογραμμής έγινε στο υπέρυθρο κανάλι, λόγω των φασματικών ιδιοτήτων του νερού.



Εικόνα 3.23: (α) 2^η Εφαρμογή, τμήμα της αρχικής απεικόνισης QUICKBIRD στο φυσικό έγχρωμο σύνθετο, (β) 2^η Εφαρμογή, τμήμα της αρχικής απεικόνισης QUICKBIRD στο εγγύς υπέρυθρο κανάλι.

3^η ΕΦΑΡΜΟΓΗ – ΠΕΡΙΟΧΗ: ΗΡΑΚΛΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ



(α)



(β)

Εικόνα 3.24: (α) 3^η Εφαρμογή, απεικόνιση ASTER σε ψευδέγχρωμο σύνθετο RGB-321, (β) 3^η Εφαρμογή, απεικόνιση ASTER στο εγγύς υπέρυθρο κανάλι.

Η εικόνα 3.24 παρουσιάζει δορυφορική λήψη ASTER του Ηρακλείου Κρήτης. Η λήψη έγινε στις 11/9/2002 και τα διαθέσιμα κανάλια ήταν το πράσινο, το κόκκινο και το εγγύς υπέρυθρο. Η συγκεκριμένη απεικόνιση έχει διακριτική ικανότητα 15 m. Οι διαστάσεις της εικόνας είναι 689x1361 εικονοστοιχεία. Επιπλέον, σημειώνεται ότι η ανίχνευση της θέσης της ακτογραμμής έγινε στο υπέρυθρο κανάλι, λόγω των φασματικών ιδιοτήτων του νερού.

4^η ΕΦΑΡΜΟΓΗ – ΠΕΡΙΟΧΗ: ΛΙΜΕΝΑΣ ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ ΚΡΗΤΗΣ



(α)



(β)

Εικόνα 3.25: (α) Απεικόνιση QUICKBIRD στο φυσικό έγχρωμο σύνθετο, (β) Απεικόνιση QUICKBIRD στο εγγύς υπέρυθρο κανάλι.

Η εικόνα 3.25 παρουσιάζει δορυφορική λήψη QUICKBIRD του λιμένα του Ηρακλείου Κρήτης. Η λήψη έγινε στις 28/5/2002 και τα διαθέσιμα κανάλια ήταν το μπλε, το πράσινο, το κόκκινο και το εγγύς υπέρυθρο. Η συγκεκριμένη απεικόνιση έχει διακριτική ικανότητα 0,7 m (pan-sharpened). Οι διαστάσεις της αρχικής εικόνας ήταν 1833x3405 εικονοστοιχεία. Τελικά, λόγω υπολογιστικού φόρτου, χρησιμοποιήθηκαν δύο τμήματα αυτής, διαστάσεων 512x512 εικονοστοιχείων, και παρουσιάζονται στις εικόνες 3.26 και 3.27. Επιπλέον, σημειώνεται ότι η ανίχνευση της θέσης της ακτογραμμής έγινε στο υπέρυθρο κανάλι, λόγω των φασματικών ιδιοτήτων του νερού.

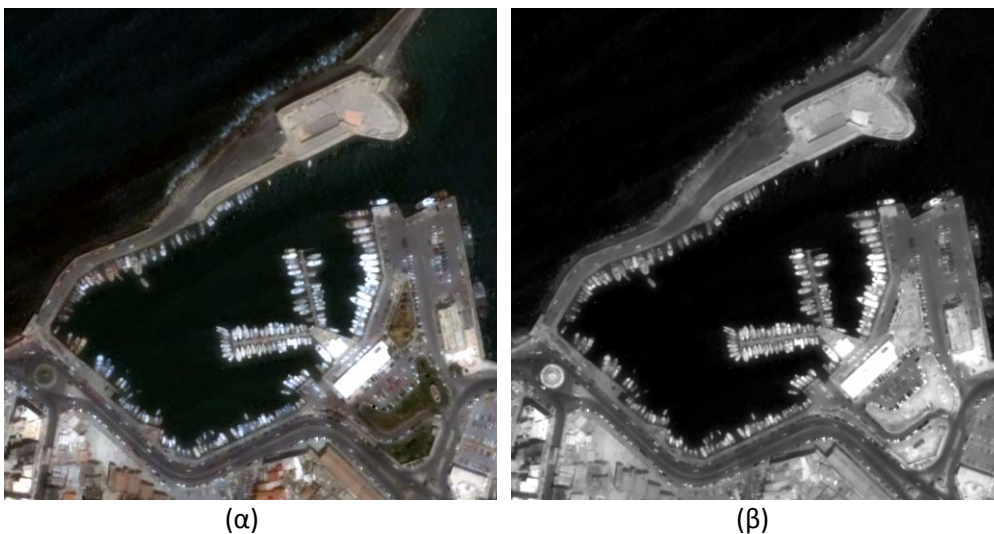


(α)

(β)

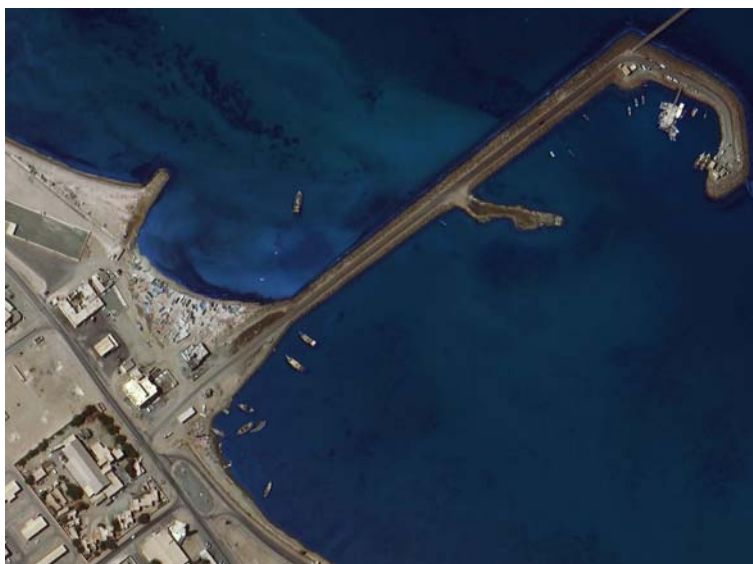
Εικόνα 3.26: (α) 4^η Εφαρμογή, τμήμα της αρχικής απεικόνισης QUICKBIRD στο φυσικό έγχρωμο σύνθετο, (β) 4^η Εφαρμογή, τμήμα της αρχικής απεικόνισης QUICKBIRD στο εγγύς υπέρυθρο κανάλι.

5^Η ΕΦΑΡΜΟΓΗ – ΠΕΡΙΟΧΗ: ΛΙΜΕΝΑΣ ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ ΚΡΗΤΗΣ



Εικόνα 3.27: (α) 5^η Εφαρμογή, τμήμα της αρχικής απεικόνισης QUICKBIRD στο φυσικό έγχρωμο σύνθετο, (β) 5^η Εφαρμογή, τμήμα της αρχικής απεικόνισης QUICKBIRD στο εγγύς υπέρυθρο κανάλι.

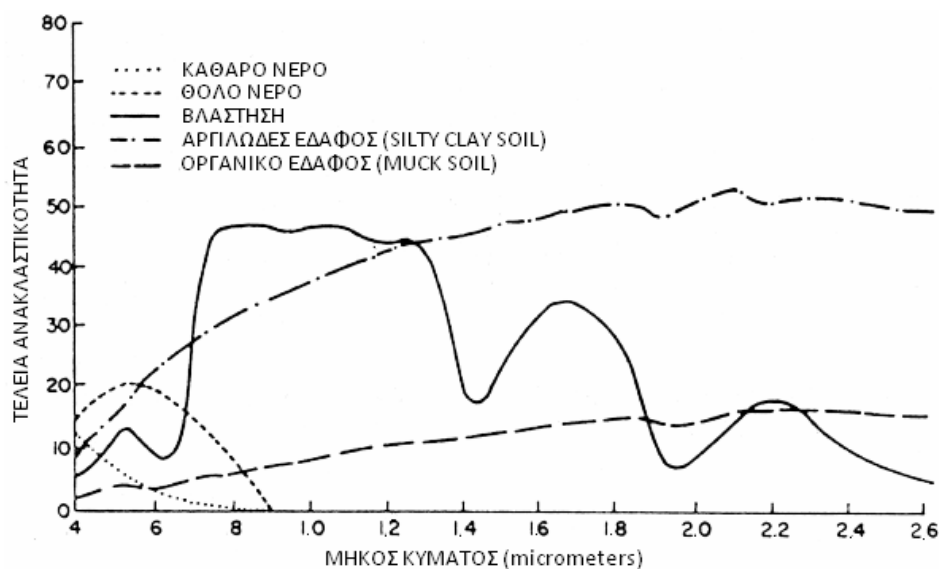
6^Η ΕΦΑΡΜΟΓΗ – ΠΕΡΙΟΧΗ: ΟΜΑΝ



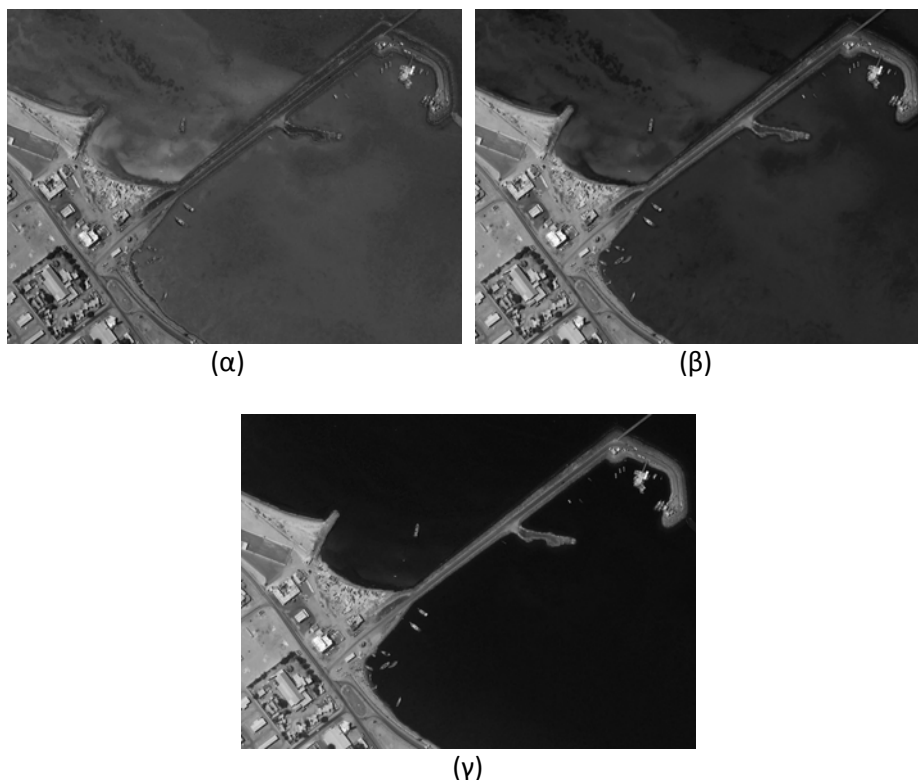
Εικόνα 3.28: Απεικόνιση WORLDVIEW-2 στο φυσικό έγχρωμο σύνθετο.

Η εικόνα 3.28 παρουσιάζει δορυφορική λήψη WORLDVIEW-2 περιοχής του Oman. Η λήψη έγινε στις 20/10/2009 και τα διαθέσιμα κανάλια ήταν το μπλε, το πράσινο και το κόκκινο. Η συγκεκριμένη απεικόνιση έχει διακριτική ικανότητα 0,5 m (pan-sharpened). Οι διαστάσεις της αρχικής εικόνας ήταν 1097x1492 εικονοστοιχεία. Τελικά, λόγω υπολογιστικού φόρτου, χρησιμοποιήθηκαν δύο τμήματα αυτής,

διαστάσεων 452x594 και 512x512 εικονοστοιχείων, και παρουσιάζονται στις εικόνες 3.30 και 3.31, αντίστοιχα. Επιπλέον, σημειώνεται ότι η ανίχνευση της θέσης της ακτογραμμής έγινε στο κόκκινο κανάλι λόγω των φασματικών ιδιοτήτων του νερού – το οποίο έχει χαμηλότερη ανακλαστικότητα σε αυτό σε σχέση με το μπλε και το πράσινο κανάλι (σχήμα 3.15) – κι επομένως διαχωρίζεται καλύτερα από την ξηρά καθώς παρουσιάζεται με πιο σκούρους τόνους του γκριζου (εικόνα 3.29).



Σχήμα 3.15: Η φασματική υπογραφή ποικίλων ειδών φυσικών επιφανειών. Πηγή: FAO

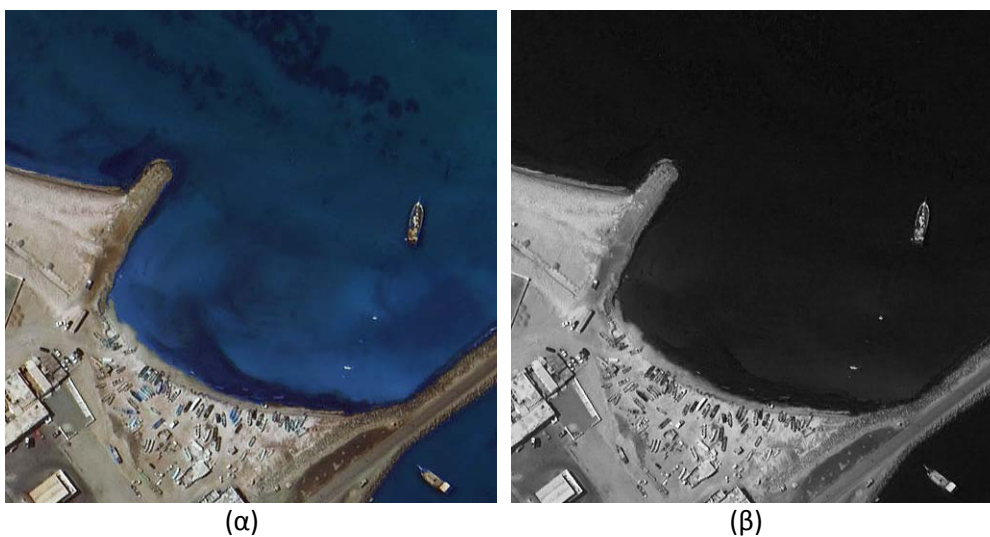


Εικόνα 3.29: Απεικόνιση WORLDVIEW-2 στο (α) μπλε, (β) πράσινο, (γ) κόκκινο κανάλι.



Εικόνα 3.30: (α) 6^η Εφαρμογή, τμήμα της αρχικής απεικόνισης WORLDVIEW-2 στο φυσικό έγχρωμο σύνθετο, (β) 6^η Εφαρμογή, τμήμα της αρχικής απεικόνισης WORLDVIEW-2 στο κόκκινο κανάλι.

7^Η ΕΦΑΡΜΟΓΗ – ΠΕΡΙΟΧΗ: ΟΜΑΝ



Εικόνα 3.31: (α) 7^η Εφαρμογή, τμήμα της αρχικής απεικόνισης WORLDVIEW-2 στο φυσικό έγχρωμο σύνθετο, (β) 7^η Εφαρμογή, τμήμα της αρχικής απεικόνισης WORLDVIEW-2 στο κόκκινο κανάλι.

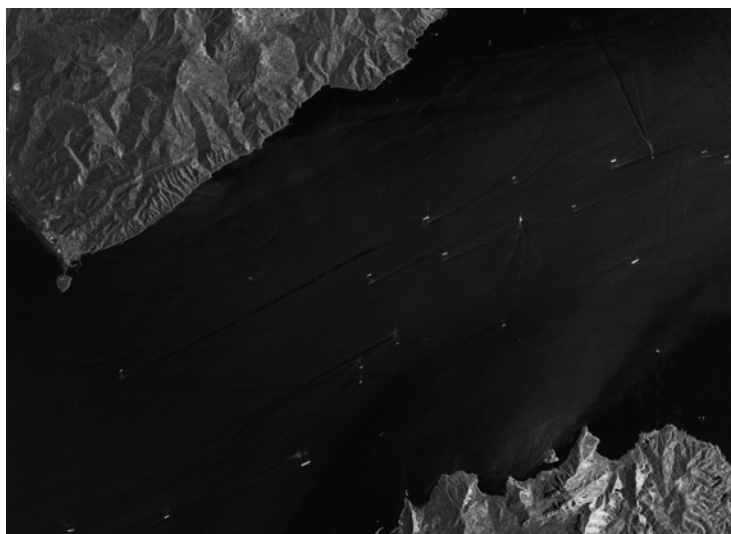
8^Η ΕΦΑΡΜΟΓΗ – ΠΕΡΙΟΧΗ: ΑΒΟΥ ΔΗΑΒΙ, Ο.Α.Ε. (απορριφθείσα)



Εικόνα 3.32: 8^η Εφαρμογή-απορριφθείσα, απεικόνιση WORLDVIEW-2 στο φυσικό έγχρωμο σύνθετο.

Η εικόνα 3.32 παρουσιάζει δορυφορική λήψη WORLDVIEW-2 περιοχής του Abu Dhabi, των Ηνωμένων Αραβικών Εμιράτων. Η λήψη έγινε στις 29/10/2009 και τα διαθέσιμα κανάλια ήταν το μπλε, το πράσινο και το κόκκινο. Η συγκεκριμένη απεικόνιση έχει διακριτική ικανότητα 0,5 m (pan-sharpened). Οι διαστάσεις της αρχικής εικόνας ήταν 5009x1351 εικονοστοιχεία. Ωστόσο, η απεικόνιση κρίθηκε ακατάλληλη προς επεξεργασία λόγω του τύπου του αρχείου (.jpeg) κι επομένως απορρίφθηκε. Στο σημείο αυτό, κρίνεται σκόπιμο να τονιστεί η προσοχή εκάστου κατά τη συλλογή δεδομένων από το Διαδίκτυο.

9^Η ΕΦΑΡΜΟΓΗ – ΠΕΡΙΟΧΗ: GIBRALTAR



Εικόνα 3.33: Απεικόνιση TERRASAR-X.

Η εικόνα 3.33 παρουσιάζει δορυφορική λήψη TERRASAR-X των στενών του Gibraltar. Η λήψη έγινε στις 12/5/2008. Η συγκεκριμένη απεικόνιση έχει διακριτική ικανότητα 3 m (StripMap). Οι διαστάσεις της αρχικής εικόνας ήταν 2987x4134 εικονοστοιχεία. Τελικά, λόγω υπολογιστικού φόρτου, χρησιμοποιήθηκαν δύο τμήματα αυτής, διαστάσεων 512x512 εικονοστοιχείων, και παρουσιάζονται στις εικόνες 3.34 και 3.35, αντίστοιχα.



Εικόνα 3.34: 9^η Εφαρμογή, τμήμα της αρχικής απεικόνισης TERRASAR-X.

10^Η ΕΦΑΡΜΟΓΗ – ΠΕΡΙΟΧΗ: GIBRALTAR

Εικόνα 3.35: 10^η Εφαρμογή, τμήμα της αρχικής απεικόνισης TERRASAR-X.

Βασικό στόχο της εφαρμογής αποτέλεσε η ανάπτυξη μιας μεθοδολογίας κατά το δυνατόν ενιαίας για δεδομένα ιδίων χαρακτηριστικών, εν προκειμένω για απεικονίσεις υψηλής ανάλυσης. Παράλληλα, **διερευνήθηκε** η δυνατότητα επέκτασης αυτής σε απεικονίσεις μεσαίας διακριτικής ικανότητας καθώς και σε απεικονίσεις SAR.

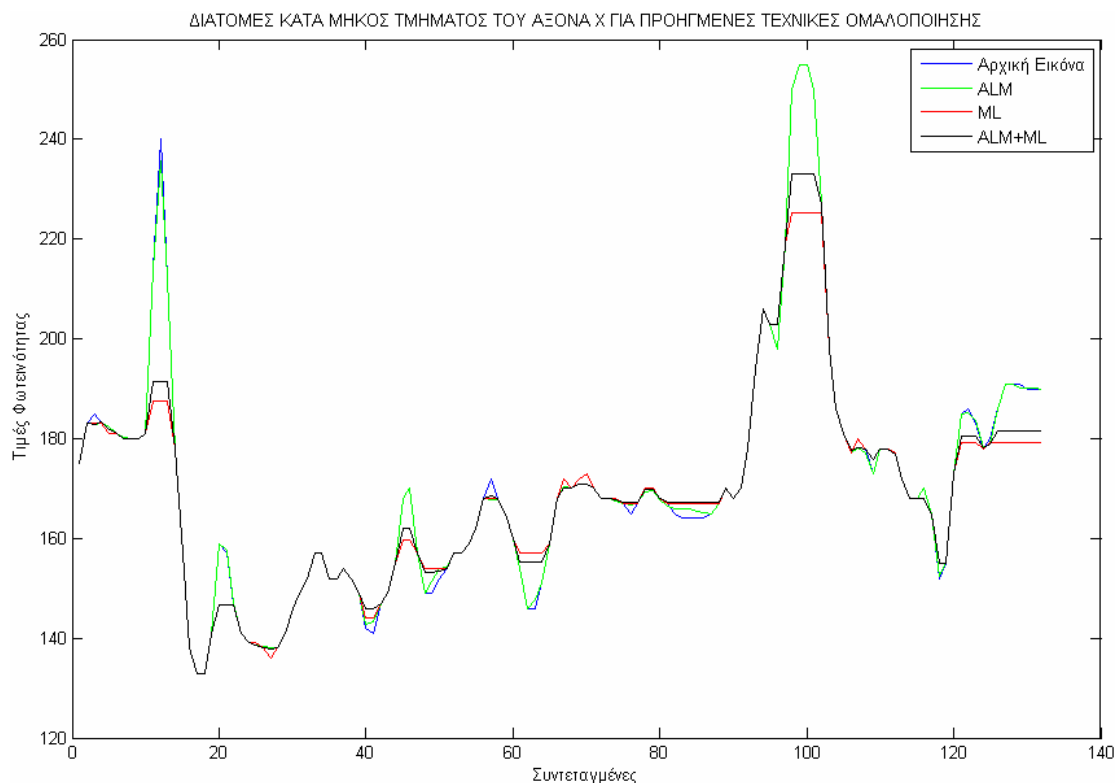
3.2.2 Προ-επεξεργασία δεδομένων και επιλογή της βέλτιστης τεχνικής

Κατά την προ-επεξεργασία των δεδομένων εφαρμόστηκαν όλες οι τεχνικές ομαλοποίησης και ενίσχυσης ακμών που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο εδάφιο – ανισοτροπική διάχυση ALM και PM, μορφολογική εξομάλυνση ML, σειριακά εναλλασσόμενα φίλτρα ASF, καθώς και συνδυασμός των τεχνικών ανισοτροπικής διάχυσης αμέσως ακολουθούμενων από μορφολογική εξομάλυνση – σε συνδυασμό με τους τελεστές ανίχνευσης ακμών Canny και μορφολογικού Laplace. Έπειτα από ποιοτική αξιολόγηση με φωτοερμηνεία, προέκυψε ότι στην πλειοψηφία των εφαρμογών, η βέλτιστη τεχνική προ-επεξεργασίας είναι ο συνδυασμός ανισοτροπικής διάχυσης ALM αμέσως ακολουθούμενης από ένα μικρό αριθμό επαναλήψεων μορφολογικής εξομάλυνσης ML. Σε δύο περιπτώσεις, ωστόσο, η χρήση μόνο της ανισοτροπικής διάχυσης ήταν πιο αποτελεσματική. Παρόλα αυτά, αξιολογήθηκαν και οι δύο τεχνικές βάσει κριτηρίων πληρότητας, ορθότητας και ποιότητας χωρίς μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ τους. Τα στοιχεία αυτά παρατίθενται στο επόμενο εδάφιο. Επιπλέον, σημειώνεται ότι ο τελεστής Canny ήταν πιο αποτελεσματικός από το μορφολογικό Laplace, ο οποίος υλοποιήθηκε βάσει του αλγορίθμου των Van Vliet et al. (1989) – ενδεχομένως και λόγω προγραμματιστικής δυσκολίας. Ωστόσο, ο Canny είναι αναγνωρισμένος ως ο βέλτιστος τελεστής ακμών μέχρι σήμερα.

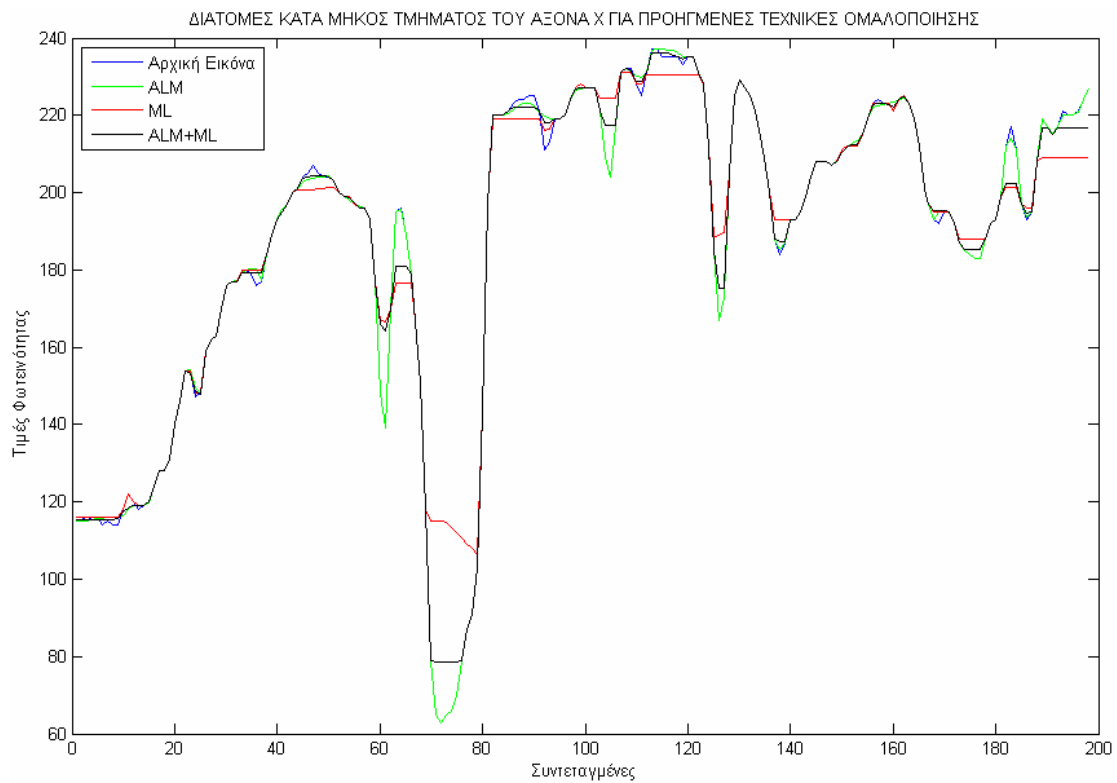
Σύμφωνα με την ανασκόπηση των τεχνικών αυτών στο προηγούμενο εδάφιο, τα παραπάνω συμπεράσματα ήταν αναμενόμενα. Έχει ήδη τονιστεί ότι η ALM ανισοτροπική διάχυση συγκλίνει έπειτα από έντονο φιλτράρισμα, ενισχύοντας τις ακμές με ακρίβεια της θέσης τους. Αντίθετα, η PM ανισοτροπική διάχυση διατηρεί μόνο τις βασικές ακμές έπειτα από μεγάλο αριθμό επαναλήψεων, ενώ το βασικότερο μειονέκτημά της είναι η απαλοιφή μικρών αντικειμένων. Τα στοιχεία αυτά την καθιστούν κατώτερη ως μέθοδο σε σχέση με την ALM. Παράλληλα, η μορφολογική εξομάλυνση διατηρεί πιο πιστά τις ακμές σε σχέση με τα ASFs, ως προς τις μεταβολές των τιμών φωτεινότητας και ως προς τη χωρική τους ακρίβεια. Ωστόσο, παραμένει έντονα εξαρτημένη από τους ιστροπικούς σηματοδευτές της κι έπειτα από κάποιον αριθμό επαναλήψεων πολλά αντικείμενα δεν είναι ορατά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα είτε να μην ανιχνεύονται είτε να μετατοπίζονται οι ακμές τους. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιήθηκε επικουρικά για ενίσχυση της ομαλοποίησης έπειτα από την εφαρμογή της ALM και για μικρό αριθμό επαναλήψεων, βελτιώνοντας στις περισσότερες εφαρμογές τα αποτελέσματα.

Τα συμπεράσματα αυτά προέκυψαν από ποιοτική αξιολόγηση των εννέα απεικονίσεων, έπειτα από εφαρμογή τους σε αυτές, και παρατίθενται στη συνέχεια. Σημειώνεται ότι το βήμα των επαναλήψεων ήταν 5 ή 10 επαναλήψεις.

Ενδεικτικά, παρατίθενται οι παρακάτω διατομές κατά μήκος τμήματος του άξονα x της 1^{ης} και της 2^{ης} εφαρμογής, όπου παρατηρούνται τα παραπάνω συμπεράσματα για την ALM, τη μορφολογική εξομάλυνση και το συνδυασμό τους.

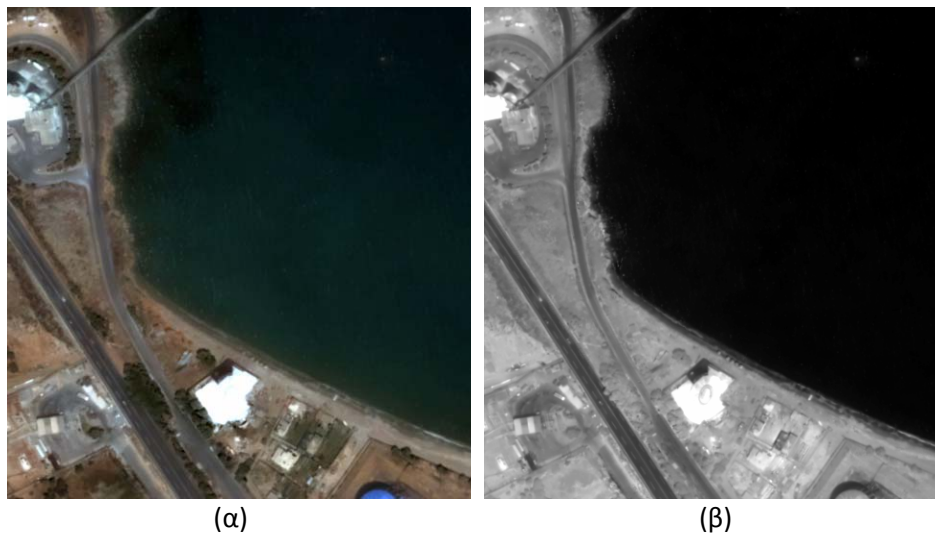


Σχήμα 3.16: Διατομές κατά μήκος τμήματος του άξονα x εικόνας QUICKBIRD (1^η Εφαρμογή), για προηγμένες τεχνικές ομαλοποίησης.



Σχήμα 3.17: Διατομές κατά μήκος τμήματος του άξονα χ εικόνας QUICKBIRD (2^η Εφαρμογή), για προηγμένες τεχνικές ομαλοποίησης.

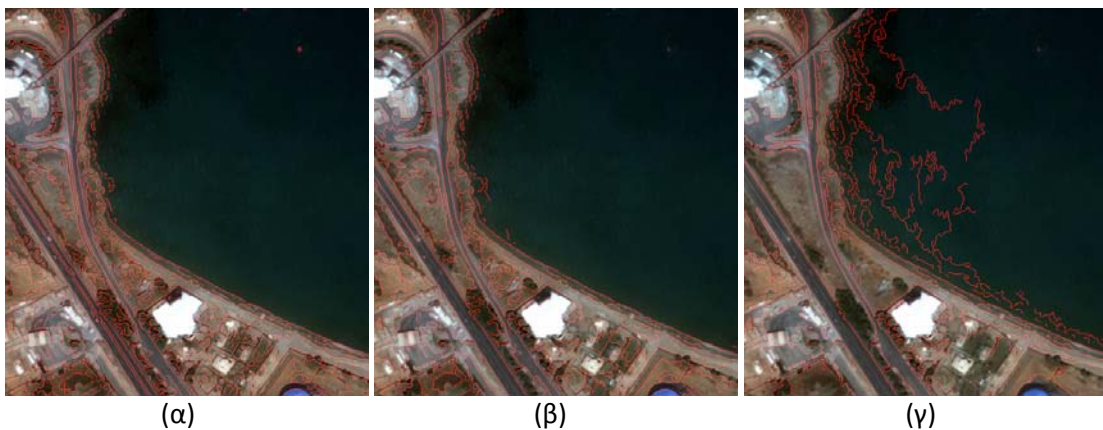
3.2.2.1 1^η Εφαρμογή (ASF, PM, ALM, ML, PM&ML, ALM&ML)



Εικόνα 3.36: (α) 1^η Εφαρμογή, απεικόνιση QUICKBIRD στο φυσικό έγχρωμο σύνθετο, (β) 1^η Εφαρμογή, απεικόνιση QUICKBIRD στο εγγύς υπέρυθρο κανάλι.

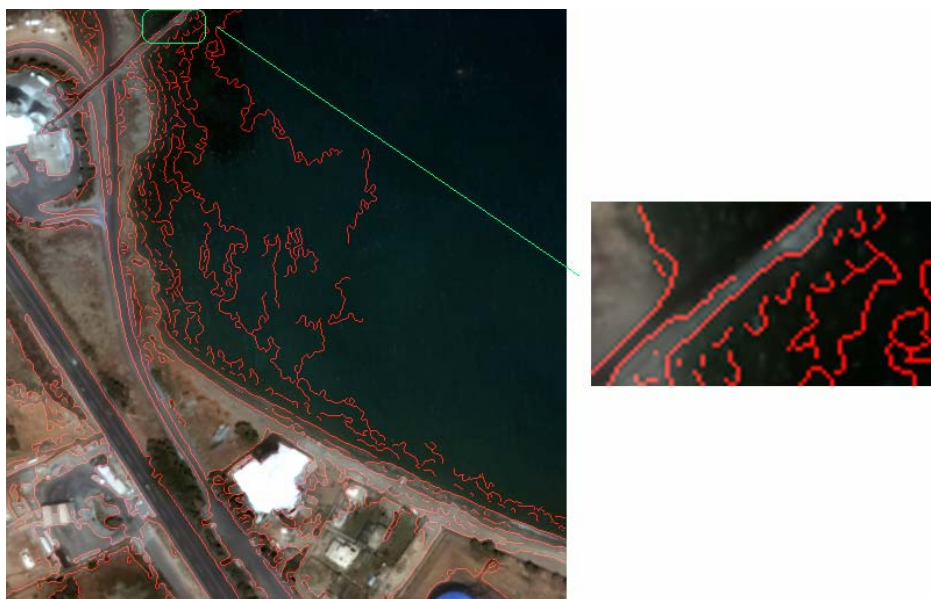
- **Σειριακό Εναλλασσόμενο Φιλτράρισμα, ASF**

Κατά την εφαρμογή σειριακού εναλλασσόμενου φιλτραρίσματος, παρατηρήθηκε ότι τα καλύτερα αποτελέσματα δίνονται έπειτα από 1 έως 8 επαναλήψεις, σε σύνολο 26 επαναλήψεων. Τα **προβλήματα** που εντοπίστηκαν για μεγαλύτερο αριθμό επαναλήψεων είναι τα εξής: **(α)** μετατόπιση των ακμών, **(β)** εμφάνιση πολλών ακμών στη θαλάσσια περιοχή, **(γ)** ανίχνευση βασικών ακμών της ξηράς και **(δ)** μη δυνατότητα ανίχνευσης κάποιων βασικών ακμών, και παρουσιάζονται στις επισυναπτόμενες εικόνες. Σημειώνεται ότι η εφαρμογή των τεχνικών προεπεξεργασίας και η ανίχνευση των ακμών με τον τελεστή Canny έγιναν στο εγγύς υπέρυθρο κανάλι, λόγω των φασματικών ιδιοτήτων του νερού, ωστόσο τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο φυσικό έγχρωμο σύνθετο με κόκκινο χρώμα.



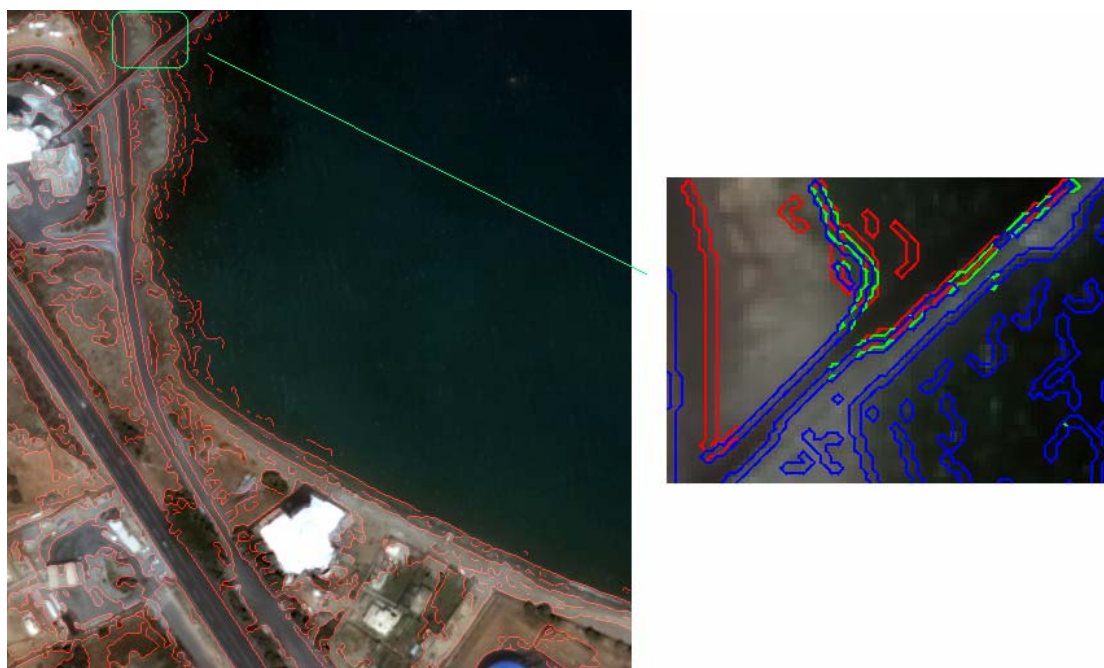
Εικόνα 3.37: (α) 1^η Εφαρμογή, ASF 1 επανάληψης, (β) 1^η Εφαρμογή, ASF 6 επαναλήψεων, (γ) 1^η Εφαρμογή, ASF 21 επαναλήψεων.

Στην εικόνα 3.37(γ) είναι σαφής η δεύτερη παρατήρηση, κατά την οποία έπειτα από τις 6 επαναλήψεις εμφανίζονται ακμές στη θαλάσσια περιοχή, αν και ομαλοποιείται η ξηρά. Παρατίθεται η εφαρμογή 21 επαναλήψεων για να είναι έντονη η διαφοροποίηση σε σχέση με τις εικόνες 3.37(α) και (β). Στην εικόνα 3.38 φαίνεται ότι, αν και γενικά τείνουν να διατηρηθούν μόνο οι βασικές ακμές της ξηράς (εικόνα 3.37), εντοπίζεται αδυναμία και σε αυτό το σημείο.



Εικόνα 3.38: 1^η Εφαρμογή, ASF 21 επαναλήψεων. Παρατηρείται η αδυναμία διατήρησης βασικών ακμών με ταυτόχρονη εμφάνιση πολλών ακμών στη θαλάσσια περιοχή.

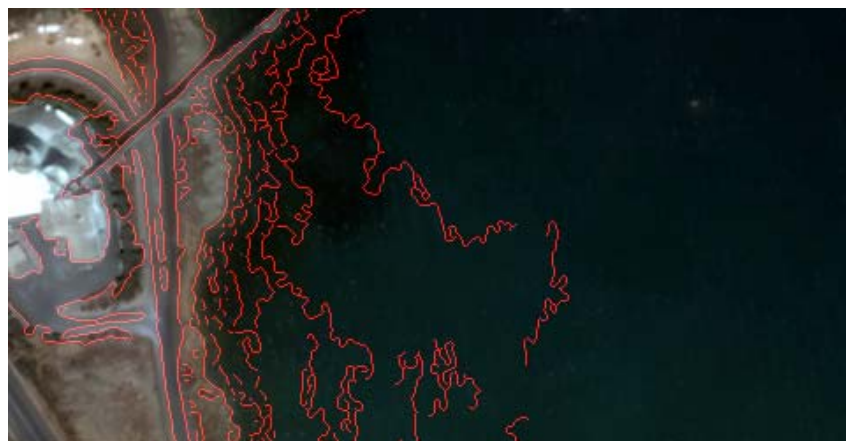
Στην επόμενη εικόνα, φαίνεται η μετατόπιση των ακμών με την αύξηση των επαναλήψεων, έπειτα από φιλτράρισμα 11, 16 και 21 επαναλήψεων (κόκκινο, πράσινο και μπλε χρώμα αντίστοιχα).



Εικόνα 3.39: 1^η Εφαρμογή, σύγκριση ανίχνευσης ακμών με τον τελεστή Canny έπειτα από φιλτράρισμα 11, 16 και 21 επαναλήψεων (κόκκινο, πράσινο και μπλε χρώμα, αντίστοιχα). Παρατηρείται μετατόπιση των περιγραμμάτων.

Τέλος, στην εικόνα 3.40 φαίνεται η διαφοροποίηση του τελεστή Canny σε σχέση με το μορφολογικό Laplace, όπως αυτός υλοποιήθηκε. Η ανίχνευση των ακμών

πραγματοποιήθηκε στη φιλτραρισμένη, έπειτα από 26 επαναλήψεις ASF, εικόνα. Παρατηρείται ότι οι ακμές με το μορφολογικό Laplace παρουσιάζουν πολύ περισσότερες ασυνέχειες και δεν οριοθετούνται σωστά τα αντικείμενα. Εν αντιθέσει, ο τελεστής Canny «αντιλαμβάνεται» πιο σωστά τα αντικείμενα της εικόνας – αν και εντοπίζει ανύπαρκτες ακμές στη θαλάσσια περιοχή, κάτι το οποίο δεν συμβαίνει με το μορφολογικό Laplace – και οι ακμές χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη συνέχεια. Είναι αντιληπτή, επομένως, η σημασία των τριών κριτηρίων του αλγορίθμου του Canny, δηλαδή του χαμηλού δείκτη σφάλματος, του σωστού εντοπισμού των ακμών και της παρουσίας μίας και μόνης ακμής σε μια θέση.



(α)

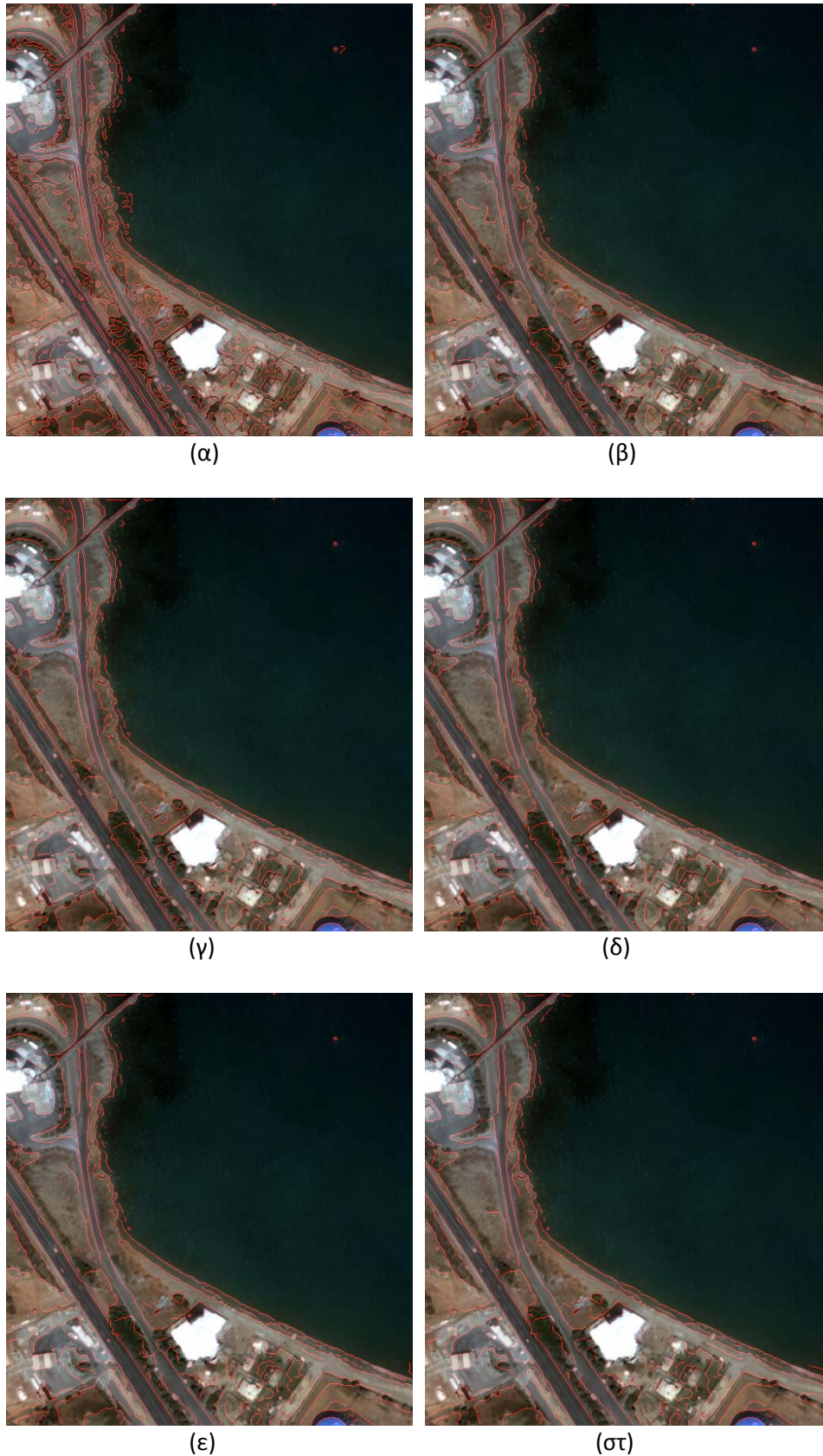


(β)

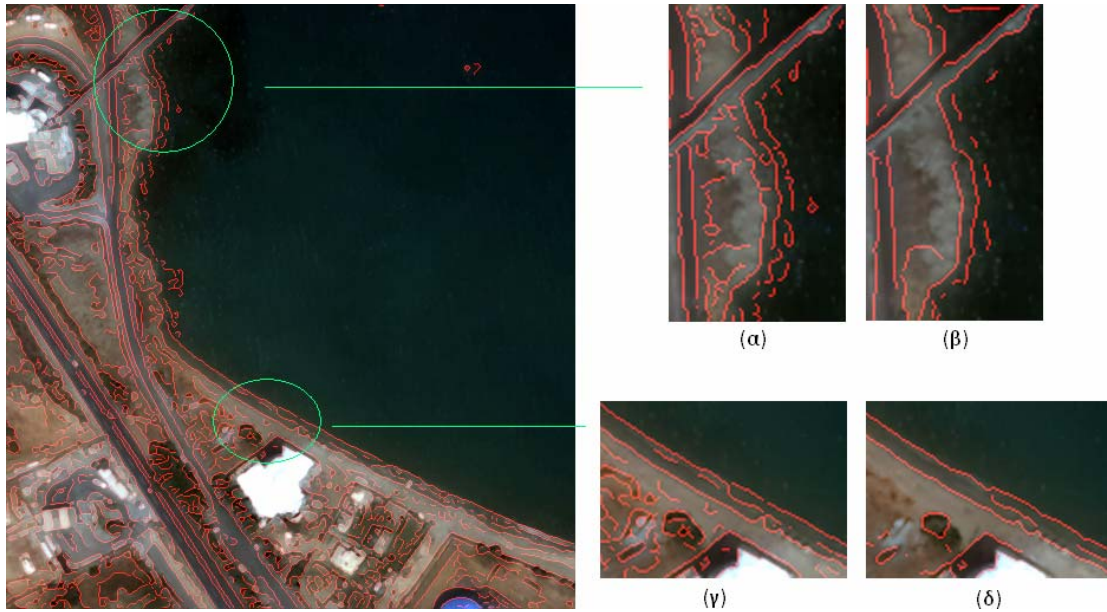
Εικόνα 3.40: 1^η Εφαρμογή, ASF 26 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.

- **Ανισοτροπική Διάχυση PM**

Κατά την εφαρμογή ανισοτροπικής διάχυσης PM παρατηρήθηκε ότι με την αύξηση του αριθμού των επαναλήψεων – σε σύνολο 56 επαναλήψεων – διατηρούνται μόνο οι βασικές ακμές της εικόνας, με αποτέλεσμα να απαλείφονται μικρά αντικείμενα (π.χ. λωρίδες ασφάλτου, δέντρα, βράχια). Αυτό είναι και το **μεγαλύτερο μειονέκτημα** της τεχνικής, καθιστώντας την ακατάλληλη, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στις εικόνες 3.41 και 3.42.



Εικόνα 3.41: 1^η Εφαρμογή, ανισοτροπική διάχυση PM (α) 1 επανάληψης, (β) 16 επαναλήψεων, (γ) 26 επαναλήψεων, (δ) 36 επαναλήψεων, (ε) 46 επαναλήψεων, (στ) 56 επαναλήψεων.



Εικόνα 3.42: (α) και (γ) 1^η Εφαρμογή, ανισοτροπική διάχυση PM 1 επανάληψης, (β) και (δ) 1^η Εφαρμογή, ανισοτροπική διάχυση PM 46 επαναλήψεων. Παράδειγμα ακαταλληλότητας της τεχνικής έπειτα από μικρό αριθμό επαναλήψεων.

Στην εικόνα 3.42 παρατίθενται δύο παραδείγματα ανίχνευσης ακμών με τον τελεστή Canny, έπειτα από εφαρμογή ανισοτροπικής διάχυσης PM 1 και 46 επαναλήψεων. Παρατηρείται ότι δεν διατηρούνται οι μεταβολές των τιμών φωτεινότητας ούτε και η χωρική τους θέση, με αποτέλεσμα τη μετατόπιση των ακμών. Παράλληλα, όπως τονίστηκε, είναι σαφής η μη σύγκλιση του αλγορίθμου.

Τέλος, στην εικόνα 3.43 φαίνεται η διαφοροποίηση του τελεστή Canny σε σχέση με το μορφολογικό Laplace, όπως αυτός υλοποιήθηκε. Η ανίχνευση των ακμών πραγματοποιήθηκε στη φιλτραρισμένη, έπειτα από 11 επαναλήψεις PM, εικόνα. Οι παρατηρήσεις για τους δύο τελεστές είναι οι ίδιες με αυτές που παρουσιάστηκαν κατά το σειριακό εναλλασσόμενο φιλτράρισμα.



(α)



(β)

Εικόνα 3.43: 1^η Εφαρμογή, PM 11 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.

- **Ανισοτροπική Διάχυση ALM**

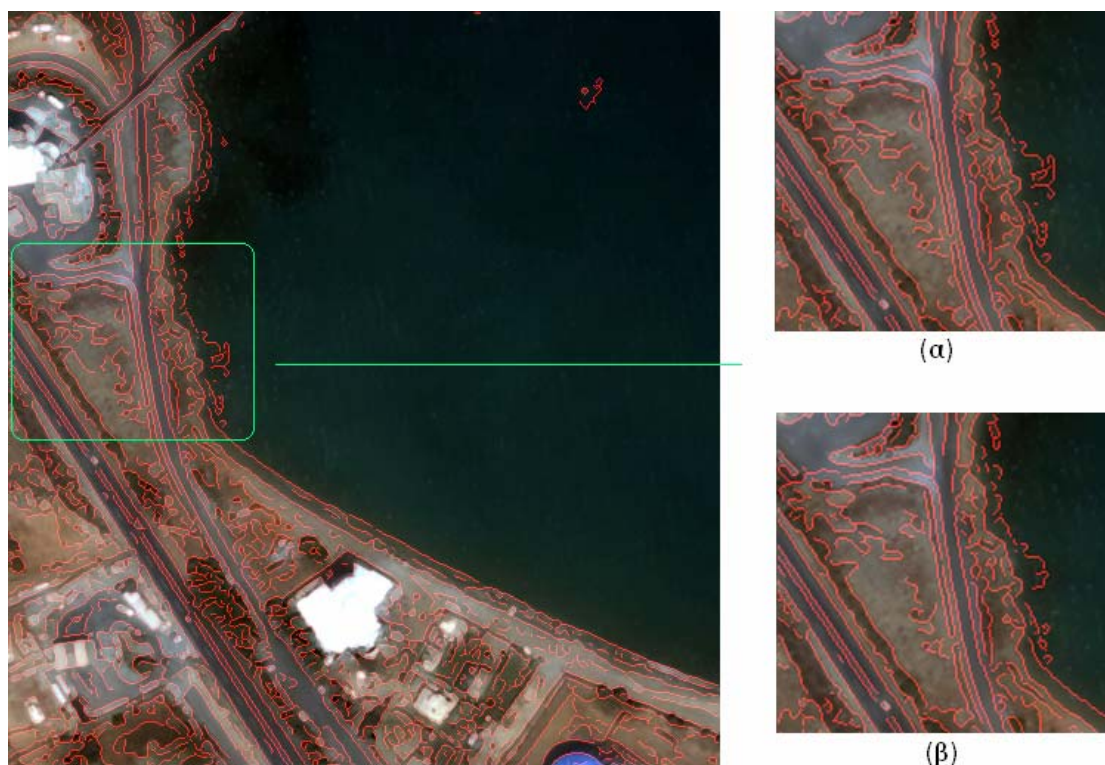
Εν αντιθέσει με την PM ανισοτροπική διάχυση, κατά την εφαρμογή της ALM παρατηρήθηκε ότι ακόμα και σε έντονο φιλτράρισμα ο αλγόριθμος διατηρεί πιστά τις μεταβολές των τιμών φωτεινότητας της αρχικής εικόνας, κι επομένως τη γεωμετρία των αντικειμένων. Αυτό φαίνεται χαρακτηριστικά στις εικόνες 3.44 και 3.45.



(α)

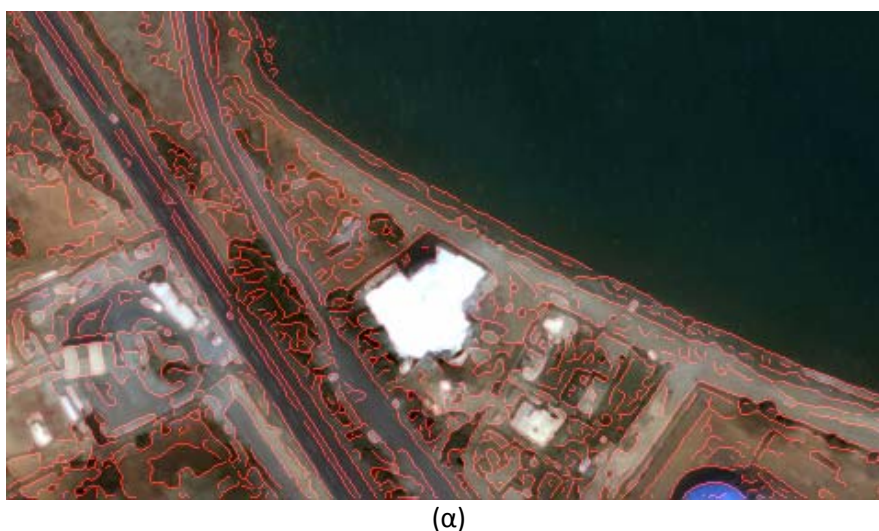
(β)

Εικόνα 3.44: (α) 1^η Εφαρμογή, ανισοτροπική διάχυση ALM 1 επανάληψης, (β) 1^η Εφαρμογή, ανισοτροπική διάχυση ALM 200 επαναλήψεων.



Εικόνα 3.45: (α) 1^η Εφαρμογή, ανισοτροπική διάχυση ALM 1 επανάληψης, (β) 1^η Εφαρμογή, ανισοτροπική διάχυση ALM 200 επαναλήψεων. Παράδειγμα σύγκλισης του αλγορίθμου.

Κατά την εφαρμογή της ALM ανισοτροπικής διάχυσης παρατηρήθηκε ότι τα καλύτερα αποτελέσματα δίνονται έπειτα από 200 επαναλήψεις. Τέλος, στην εικόνα 3.46 φαίνεται η διαφοροποίηση του τελεστή Canny σε σχέση με το μορφολογικό Laplace, όπως αυτός υλοποιήθηκε. Η ανίχνευση των ακμών πραγματοποιήθηκε στη φιλτραρισμένη, έπειτα από 200 επαναλήψεις ALM, εικόνα. Οι παρατηρήσεις για τους δύο τελεστές είναι οι ίδιες με αυτές που παρουσιάστηκαν κατά το σειριακό εναλλασσόμενο φιλτράρισμα.



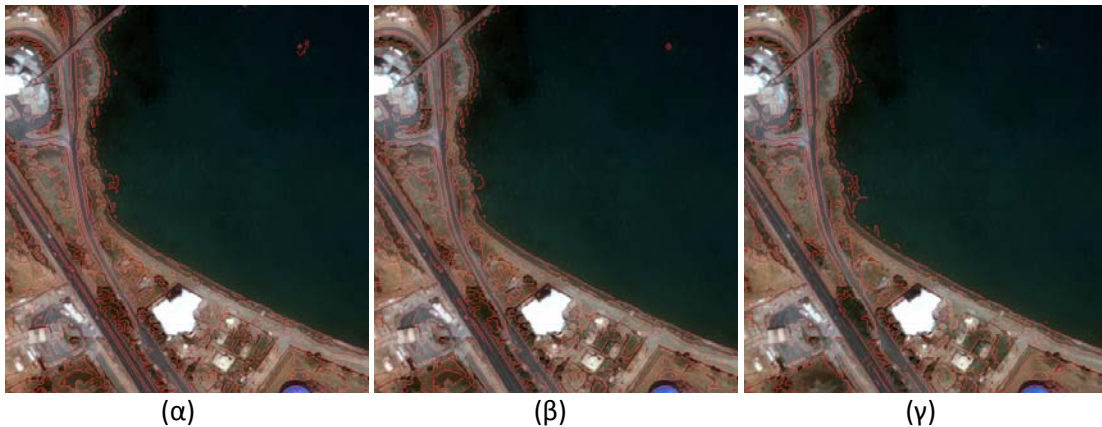


(β)

Εικόνα 3.46: 1^η Εφαρμογή, ALM 200 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.

- **Μορφολογική Εξομάλυνση, ML**

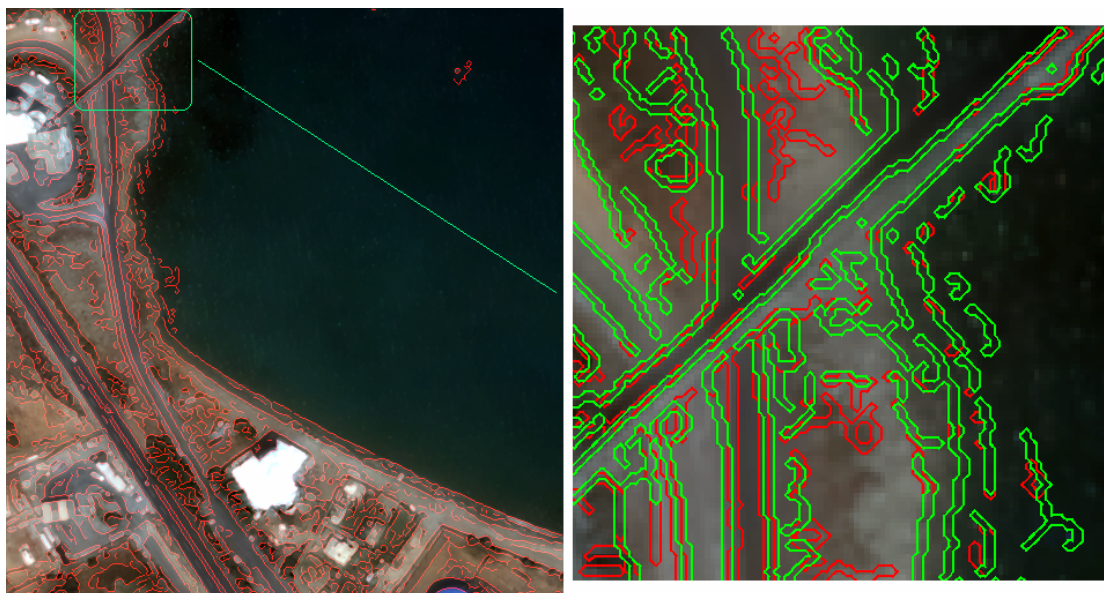
Κατά την εφαρμογή μορφολογικής εξομάλυνσης, παρατηρήθηκε ότι τα καλύτερα αποτελέσματα δίνονται έπειτα από 6 επαναλήψεις, σε σύνολο 26 επαναλήψεων. Τα **προβλήματα** που εντοπίστηκαν για μεγαλύτερο αριθμό επαναλήψεων είναι τα εξής: (α) μετατόπιση περιγραμμάτων, (β) εμφάνιση ακμών στη θάλασσα περιοχή και (γ) εξάρτηση της μεθόδου από τους γκαουσιανούς σημαδευτές, και παρουσιάζονται στις επισυναπτόμενες εικόνες.



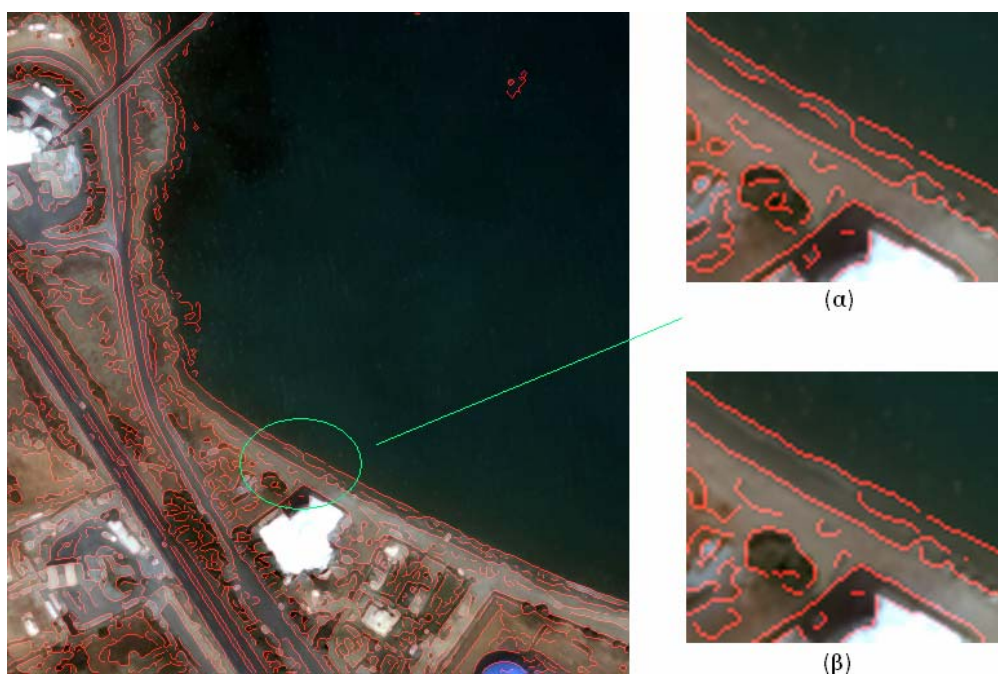
Εικόνα 3.47: (α) 1^η Εφαρμογή, ML 1 επανάληψης, (β) 1^η Εφαρμογή, ML 6 επαναλήψεων, (γ) 1^η Εφαρμογή, ML 26 επαναλήψεων.

Στην εικόνα 3.47(γ) είναι σαφής η δεύτερη παρατήρηση, κατά την οποία έπειτα από τις 6 επαναλήψεις εμφανίζονται ακμές στη θάλασσα περιοχή, αν και ομαλοποιείται η ξηρά. Παράλληλα, επειδή τα levelings αποτελούν μετασχηματισμούς κλίμακας, με την αύξηση των επαναλήψεων κάποια αντικείμενα δεν είναι ορατά. Αποτέλεσμα αυτού είναι να παρουσιάζονται να μην διατηρούνται οι ακμές σε όλο το εύρος των

κλιμάκων, λόγω της εξάρτησης της μεθόδου από τους γκαουσιανούς σηματοδευτές. Ωστόσο, αν και κατά τη μορφολογική εξομάλυνση τα αντικείμενα εξελίσσονται συναρτήσει της γεωμετρίας τους, στις περισσότερες εφαρμογές παρατηρήθηκε μια μικρή μετατόπιση των περιγραμμάτων τους. Έτσι, αν και σε σχέση με το σειριακό εναλλασσόμενο φιλτράρισμα διατηρούνται πιο πιστά οι ακμές, προβλήματα εμφανίζονται και σε αυτήν την περίπτωση λόγω των σηματοδευτών (εικόνες 3.48, 3.49).



Εικόνα 3.48: 1^η Εφαρμογή, σύγκριση ανίχνευσης ακμών με τον τελεστή Canny έπειτα από φιλτράρισμα 1 και 16 επαναλήψεων (κόκκινο και πράσινο χρώμα, αντίστοιχα). Παρατηρείται μετατόπιση των περιγραμμάτων.



Εικόνα 3.49: (α) 1^η Εφαρμογή, ML 1 επανάληψης, (β) 1^η Εφαρμογή, ML 6 επαναλήψεων. Παράδειγμα της έντονης εξάρτησης της μεθόδου από τους γκαουσιανούς σηματοδευτές.

Τέλος, στην εικόνα 3.50 φαίνεται η διαφοροποίηση του τελεστή Canny σε σχέση με το μορφολογικό Laplace, όπως αυτός υλοποιήθηκε. Η ανίχνευση των ακμών πραγματοποιήθηκε στη φιλτραρισμένη, έπειτα από 6 επαναλήψεις ML, εικόνα. Οι παρατηρήσεις για τους δύο τελεστές είναι οι ίδιες με αυτές που παρουσιάστηκαν κατά το σειριακό εναλλασσόμενο φιλτράρισμα.



(α)



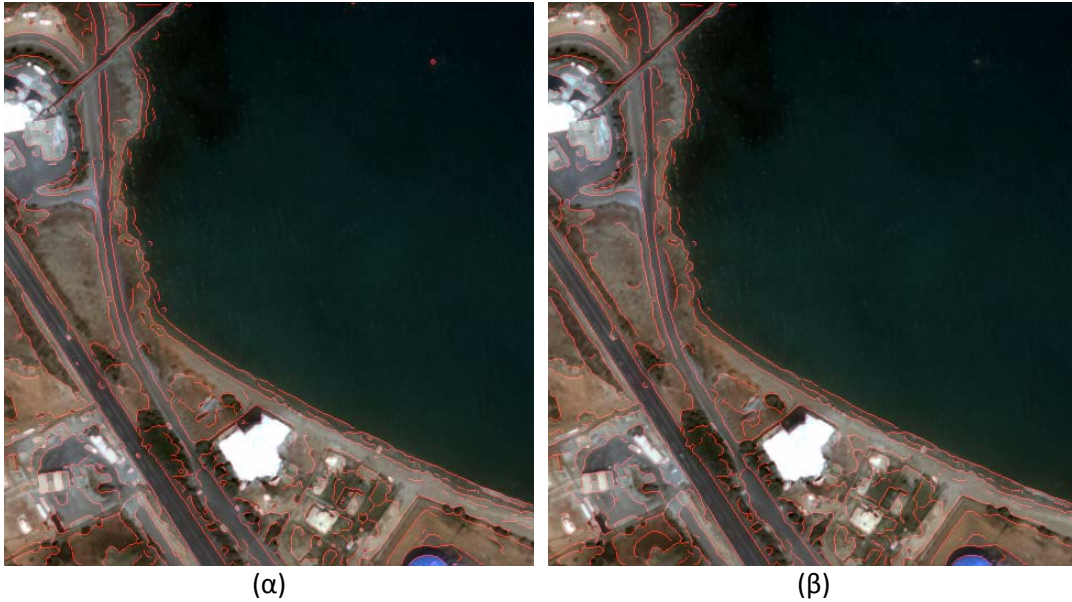
(β)

Εικόνα 3.50: 1^η Εφαρμογή, ML 6 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.

- **Συνδυασμός Ανισοτροπικής Διάχυσης PM και Μορφολογικής Εξομάλυνσης**

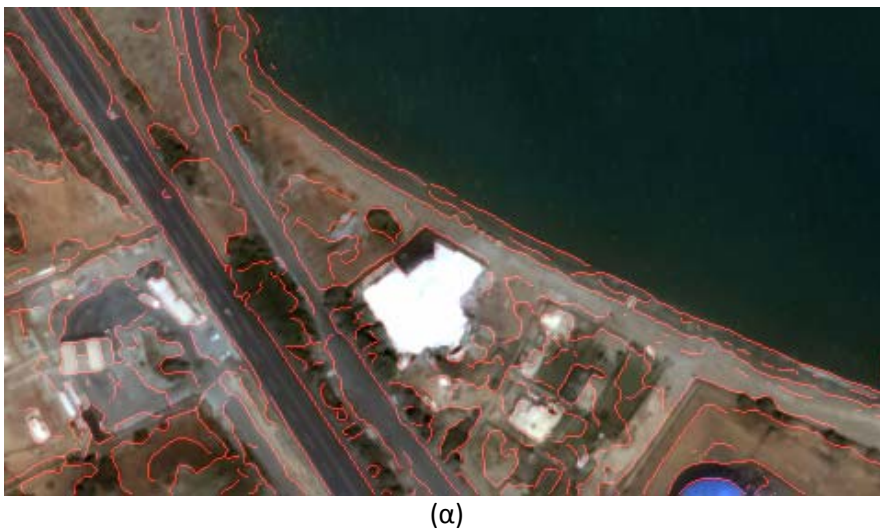
Έχει ήδη σημειωθεί ότι στο πλαίσιο της προ-επεξεργασίας μιας απεικόνισης για την ανίχνευση της θέσης της ακτογραμμής, πρέπει να επιτυγχάνεται τόσο η ομαλοποίηση της εικόνας όσο και η ενίσχυση των ακμών. Η μορφολογική εξομάλυνση θα μπορούσε να λειτουργήσει θετικά, έπειτα από μικρό αριθμό επαναλήψεων, για ενίσχυση της ομαλοποίησης. Ωστόσο, παρατέθηκαν ήδη τα αποτελέσματα εφαρμογής της PM διάχυσης και όπως παρατηρήθηκε δεν αποτέλεσε αποτελεσματική διαδικασία ως προς τους δυο αυτούς στόχους.

Επομένως, κατά το συνδυασμό της με τη μορφολογική εξομάλυνση, όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.51 από τις ομοιότητες των 3.51(α) και 3.51(β), ενυπάρχουν τα προβλήματα μη σύγκλισης της PM – αν και η ML επιτυγχάνει το στόχο της. Έπειτα από πληθώρα συνδυασμών, τα καλύτερα αποτελέσματα δόθηκαν έπειτα από 20 επαναλήψεις PM και 10 επαναλήψεις ML.



Εικόνα 3.51: (α) 1^η Εφαρμογή, PM 20 επαναλήψεων, (β) 1^η Εφαρμογή, PM 20 επαναλήψεων και ML 10 επαναλήψεων.

Τέλος, στην εικόνα 3.52 φαίνεται η διαφοροποίηση του τελεστή Canny σε σχέση με το μορφολογικό Laplace, όπως αυτός υλοποιήθηκε. Η ανίχνευση των ακμών πραγματοποιήθηκε στη φιλτραρισμένη, έπειτα από 20 επαναλήψεις PM και 10 επαναλήψεις ML, εικόνα. Οι παρατηρήσεις για τους δύο τελεστές είναι οι ίδιες με αυτές που παρουσιάστηκαν κατά το σειριακό εναλλασσόμενο φιλτράρισμα.



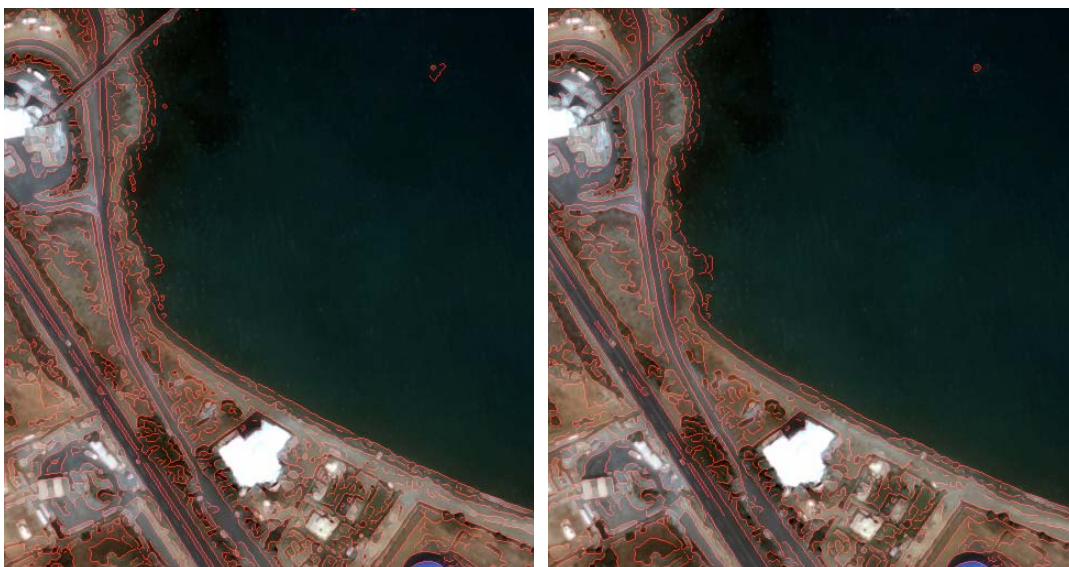


(β)

Εικόνα 3.52: 1^η Εφαρμογή, PM 20 επαναλήψεων και ML 10 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.

- **Συνδυασμός Ανισοτροπικής Διάχυσης ALM και Μορφολογικής Εξομάλυνσης**

Εν αντιθέσει με την προηγούμενη εφαρμογή, στη συγκεκριμένη περίπτωση η μορφολογική εξομάλυνση λειτουργεί επικουρικά στην ενίσχυση των ακμών με την ALM, επιτυγχάνοντας μεγαλύτερη ομαλοποίηση. Ωστόσο, σε αυτό το σημείο είναι δύσκολο να αποφανθεί κανείς για την καταλληλότητα της συγκεκριμένης μεθοδολογίας έναντι της αποκλειστικής χρήσης της ALM. Η αξιολόγηση και σύγκριση των δύο παρατίθεται στο επόμενο εδάφιο, θέτοντας κριτήρια πληρότητας, ορθότητας και ποιότητας. Έπειτα από πληθώρα συνδυασμών, τα καλύτερα αποτελέσματα δόθηκαν έπειτα από 100 επαναλήψεις ALM και 5 επαναλήψεις ML (εικόνα 3.53).



(α)

(β)

Εικόνα 3.53: (α) 1^η Εφαρμογή, ALM 100 επαναλήψεων, (β) 1^η Εφαρμογή, ALM 100 επαναλήψεων και ML 5 επαναλήψεων.

Τέλος, στην εικόνα 3.54 φαίνεται η διαφοροποίηση του τελεστή Canny σε σχέση με το μορφολογικό Laplace, όπως αυτός υλοποιήθηκε. Η ανίχνευση των ακμών πραγματοποιήθηκε στη φιλτραρισμένη, έπειτα από 60 επαναλήψεις ALM και 5 επαναλήψεις ML, εικόνα. Οι παρατηρήσεις για τους δύο τελεστές είναι οι ίδιες με αυτές που παρουσιάστηκαν κατά το σειριακό εναλλασσόμενο φιλτράρισμα.



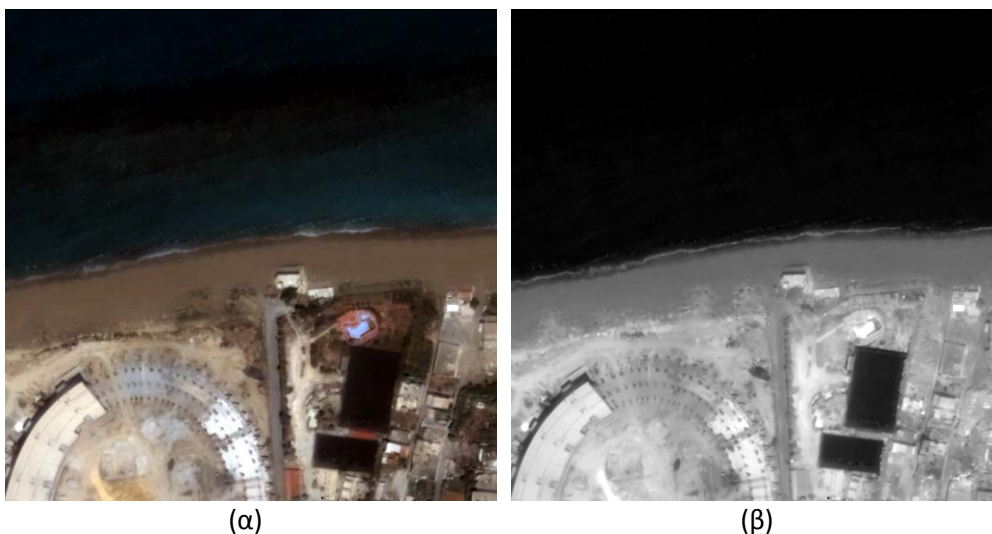
(α)



(β)

Εικόνα 3.54: 1^η Εφαρμογή, ALM 60 επαναλήψεων και ML 5 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.

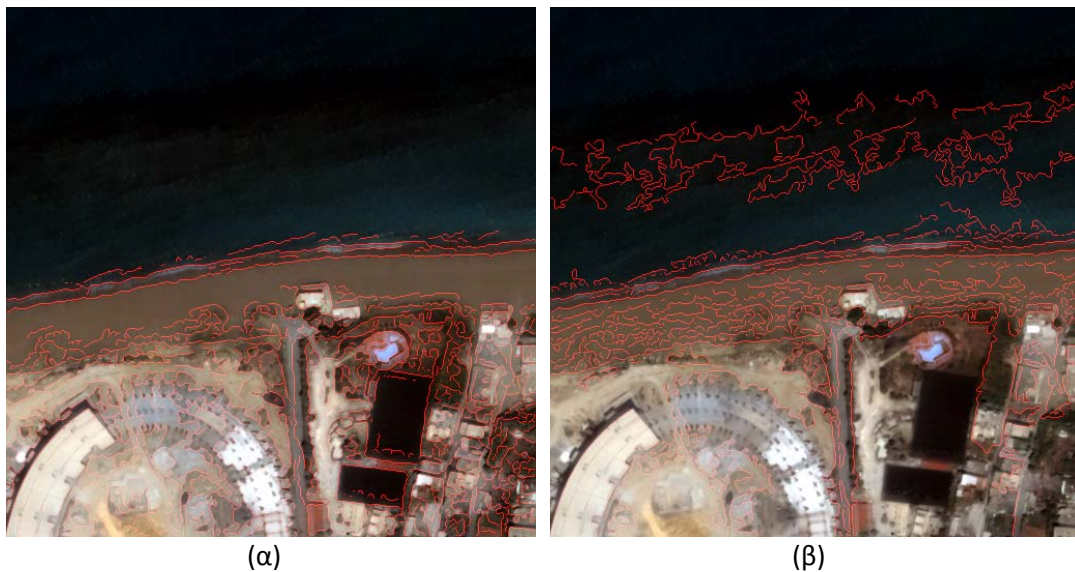
3.2.2.2 2^η Εφαρμογή (ASF, PM, ALM, ML, PM&ML, ALM&ML)



Εικόνα 3.55: (α) 2^η Εφαρμογή, απεικόνιση QUICKBIRD στο φυσικό έγχρωμο σύνθετο, (β) 2^η Εφαρμογή, απεικόνιση QUICKBIRD στο εγγύς υπέρυθρο κανάλι.

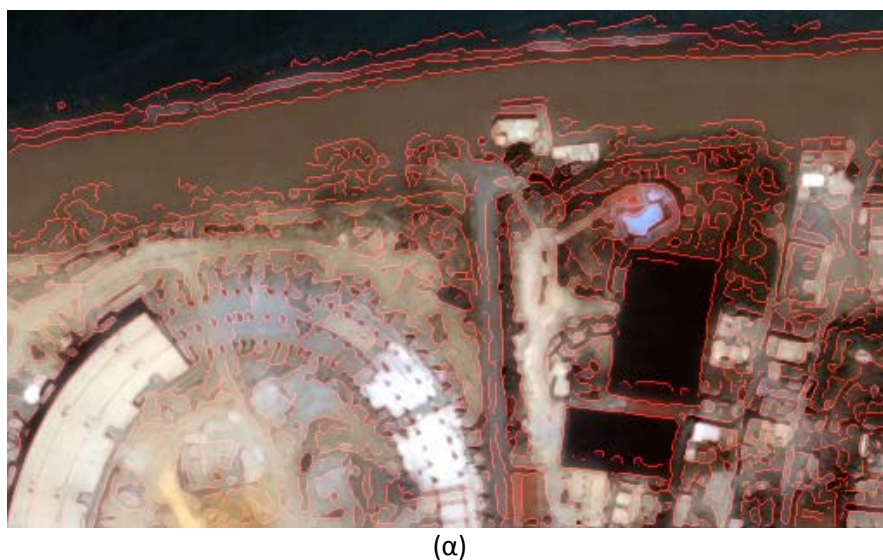
- **Σειριακό Εναλλασσόμενο Φιλτράρισμα, ASF**

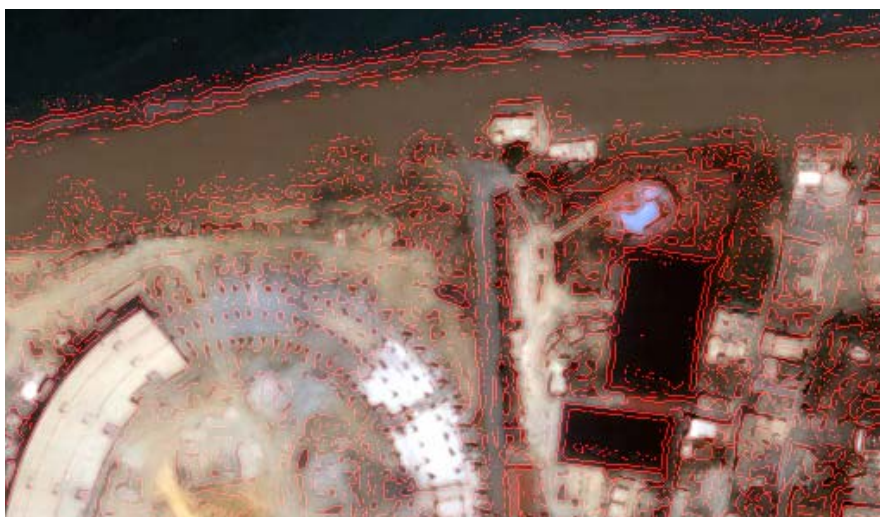
Κατά την εφαρμογή σειριακού εναλλασσόμενου φιλτραρίσματος, παρατηρήθηκε ότι τα καλύτερα αποτελέσματα δίνονται έπειτα από 4 επαναλήψεις, σε σύνολο 36 επαναλήψεων. Τα **προβλήματα** που εντοπίστηκαν για μεγαλύτερο αριθμό επαναλήψεων είναι τα εξής: **(α)** δημιουργία ψευδών ακμών, **(β)** εμφάνιση πολλών ακμών στη θαλάσσια περιοχή, **(γ)** μη δυνατότητα ανίχνευσης βασικών ακμών της ξηράς, και παρουσιάζονται στις επισυναπτόμενες εικόνες. Σημειώνεται ότι η εφαρμογή των τεχνικών προ-επεξεργασίας και η ανίχνευση των ακμών με τον τελεστή Canny έγιναν στο εγγύς υπέρυθρο κανάλι, λόγω των φασματικών ιδιοτήτων του νερού, ωστόσο τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο φυσικό έγχρωμο σύνθετο με κόκκινο χρώμα.



Εικόνα 3.56: (α) 2^η Εφαρμογή, ASF 4 επαναλήψεων, (β) 2^η Εφαρμογή, ASF 36 επαναλήψεων.

Στην εικόνα 3.56(β) είναι σαφής η δεύτερη παρατήρηση, κατά την οποία έπειτα από τις 36 επαναλήψεις εμφανίζονται πολλές ακμές στη θαλάσσια περιοχή. Παράλληλα, παρουσιάζεται η αδυναμία της τεχνικής να διατηρήσει βασικές ακμές της ξηράς (αστική περιοχή), καθώς και η δημιουργία πολλών ψευδών ακμών στην περιοχή της παραλίας. Γενικά, παρατηρείται αδυναμία της τεχνικής να διατηρήσει πιστά τις ακμές ως προς τις μεταβολές των τιμών φωτεινότητας. Τέλος, στην εικόνα 3.57 φαίνεται η διαφοροποίηση του τελεστή Canny σε σχέση με το μορφολογικό Laplace, όπως αυτός υλοποιήθηκε. Η ανίχνευση των ακμών πραγματοποιήθηκε στη φιλτραρισμένη, έπειτα από 1 επανάληψη ASF, εικόνα. Οι παρατηρήσεις για τους δύο τελεστές είναι οι ίδιες με αυτές που παρουσιάστηκαν στην πρώτη εφαρμογή.



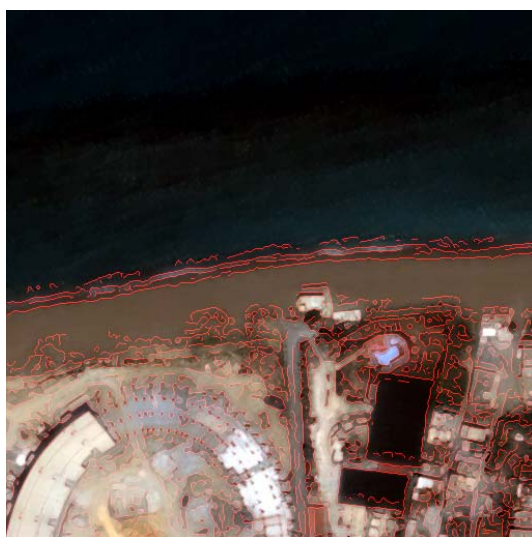


(β)

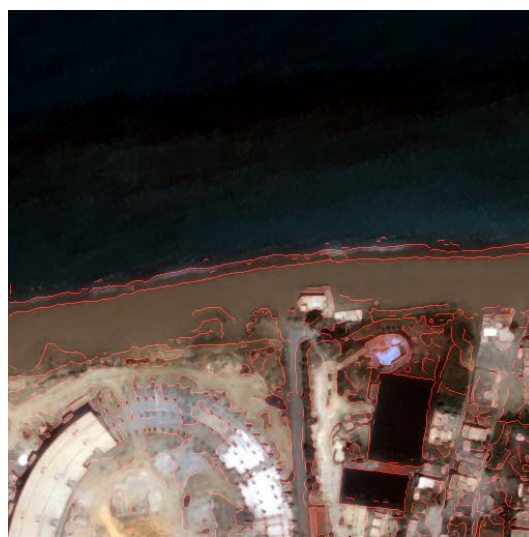
Εικόνα 3.57: 2^η Εφαρμογή, ASF 1 επανάληψης. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.

- **Ανισοτροπική Διάχυση PM**

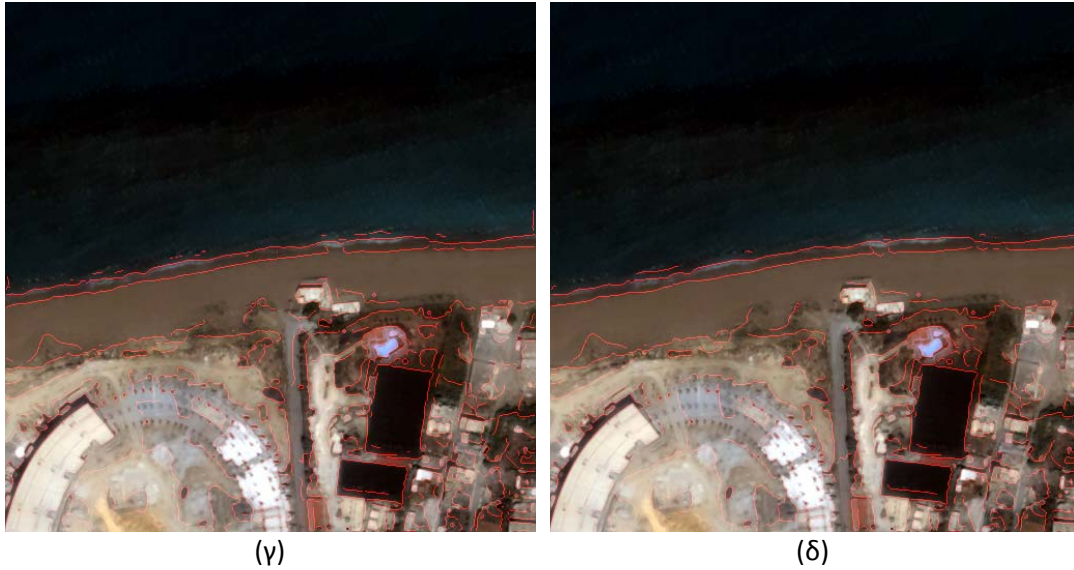
Κατά την εφαρμογή ανισοτροπικής διάχυσης PM παρατηρήθηκε ότι με την αύξηση του αριθμού των επαναλήψεων – σε σύνολο 61 επαναλήψεων – διατηρούνται μόνο οι βασικές ακμές της εικόνας, με αποτέλεσμα να απαλείφονται μικρά αντικείμενα (π.χ. σπίτια, δέντρα, ακόμα και τμήματα της παραλίας). Αυτό είναι και το **μεγαλύτερο μειονέκτημα** της τεχνικής, καθιστώντας την ακατάλληλη, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στις εικόνες 3.58 και 3.59.



(α)

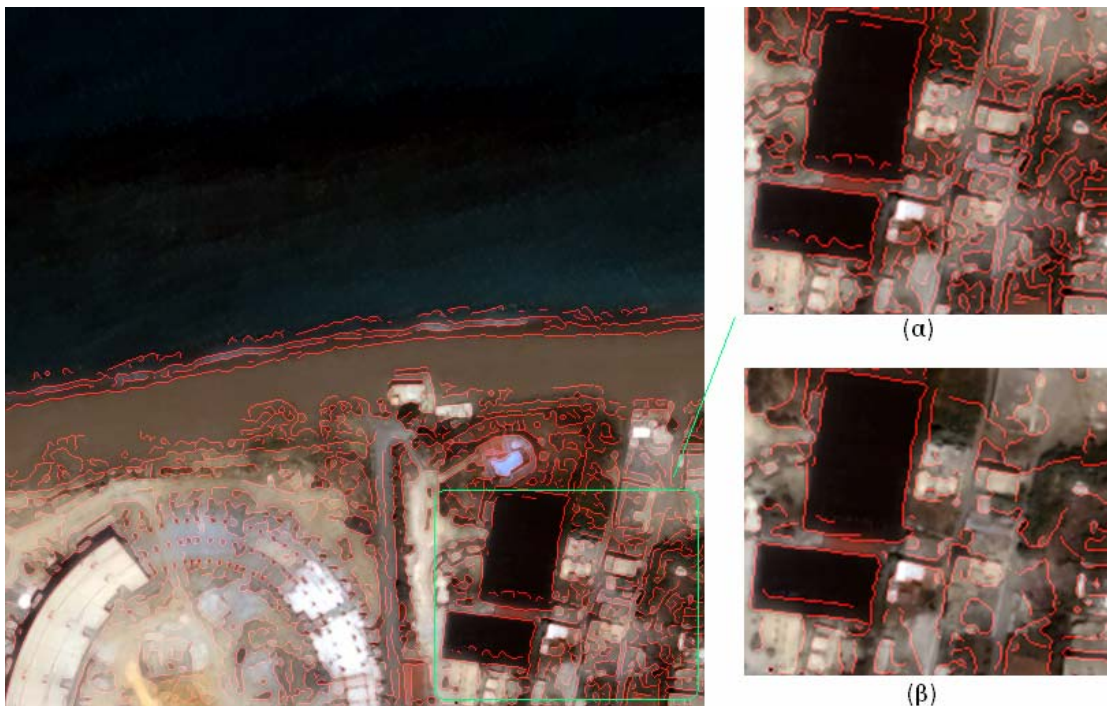


(β)



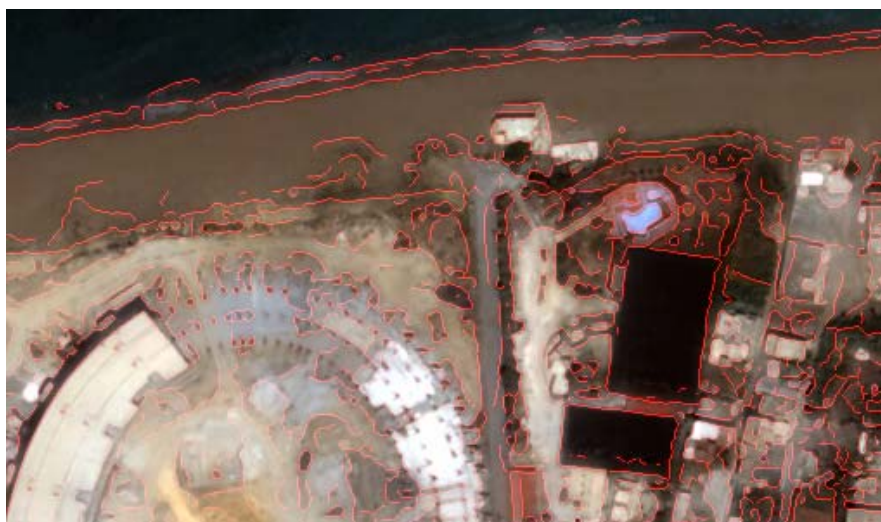
Εικόνα 3.58: 2^η Εφαρμογή, ανισοτροπική διάχυση PM (α) 1 επανάληψης, (β) 21 επαναλήψεων, (γ) 41 επαναλήψεων, (δ) 61 επαναλήψεων.

Στην εικόνα 3.59 παρατίθεται παράδειγμα ανίχνευσης ακμών με τον τελεστή Canny, έπειτα από εφαρμογή ανισοτροπικής διάχυσης PM, 1 και 61 επαναλήψεων. Παρατηρείται ότι δεν διατηρούνται οι μεταβολές των τιμών φωτεινότητας ούτε και η χωρική τους θέση, με αποτέλεσμα τη μετατόπιση των ακμών. Παράλληλα, όπως τονίστηκε, είναι σαφής η μη σύγκλιση του αλγορίθμου.

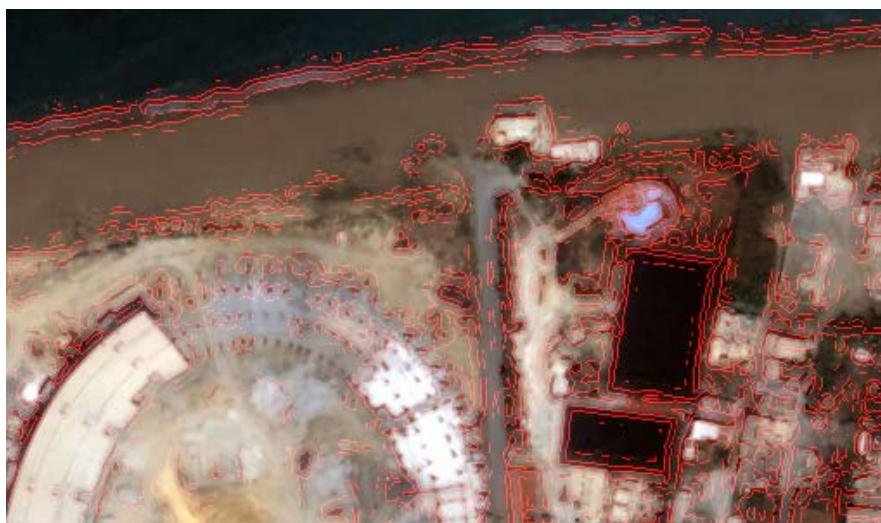


Εικόνα 3.59: (α) 2^η Εφαρμογή, ανισοτροπική διάχυση PM 1 επανάληψης, (β) 2^η Εφαρμογή, ανισοτροπική διάχυση PM 61 επαναλήψεων. Παράδειγμα ακαταλληλότητας της τεχνικής έπειτα από μικρό αριθμό επαναλήψεων.

Τέλος, στην εικόνα 3.60 φαίνεται η διαφοροποίηση του τελεστή Canny σε σχέση με το μορφολογικό Laplace, όπως αυτός υλοποιήθηκε. Η ανίχνευση των ακμών πραγματοποιήθηκε στη φιλτραρισμένη, έπειτα από 11 επαναλήψεις PM, εικόνα. Οι παρατηρήσεις για τους δύο τελεστές είναι οι ίδιες με αυτές που παρουσιάστηκαν στην πρώτη εφαρμογή.



(α)

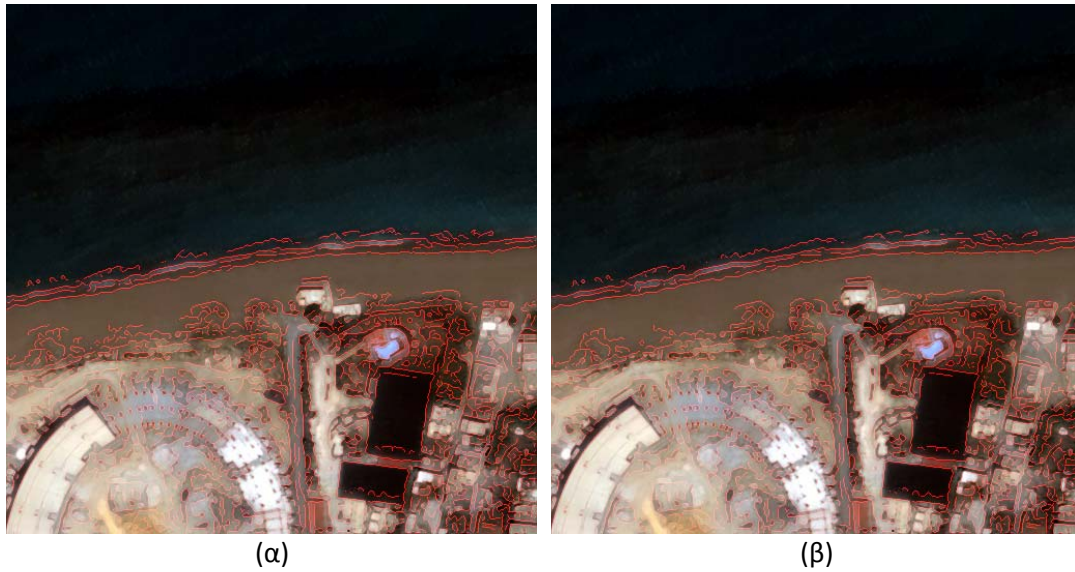


(β)

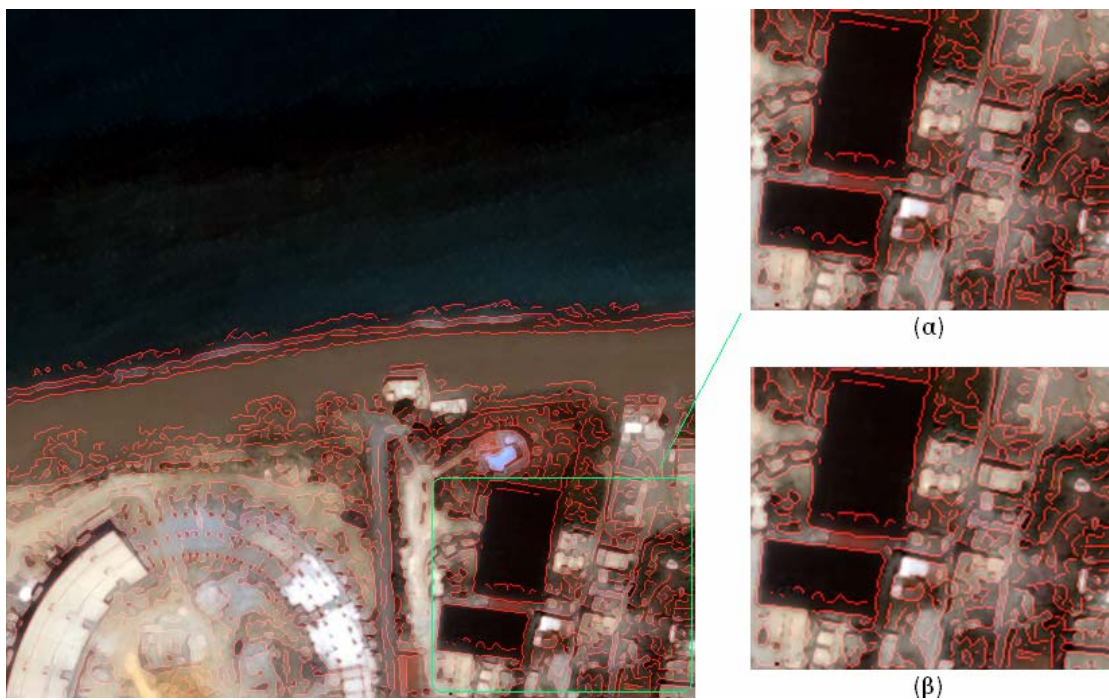
Εικόνα 3.60: 2^η Εφαρμογή, PM 11 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.

- **Ανισοτροπική Διάχυση ALM**

Όπως τονίστηκε και στην πρώτη εφαρμογή, εν αντιθέσει με την PM ανισοτροπική διάχυση, κατά την εφαρμογή της ALM παρατηρήθηκε ότι ακόμα και σε έντονο φιλτράρισμα ο αλγόριθμος διατηρεί πιστά τις μεταβολές των τιμών φωτεινότητας της αρχικής εικόνας, κι επομένως τη γεωμετρία των αντικειμένων. Αυτό φαίνεται χαρακτηριστικά στις εικόνες 3.61 και 3.62.

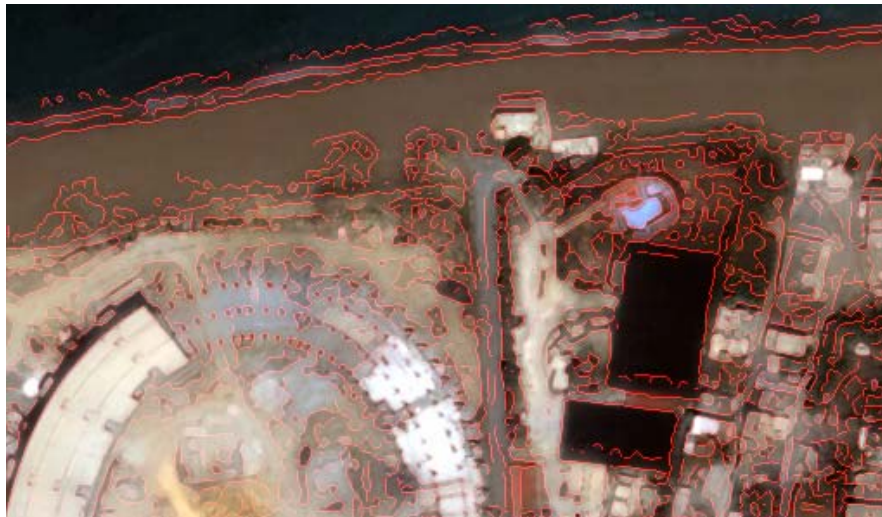


Εικόνα 3.61: (α) 2^η Εφαρμογή, ανισοτροπική διάχυση ALM 1 επανάληψης, (β) 2^η Εφαρμογή, ανισοτροπική διάχυση ALM 200 επαναλήψεων. Παράδειγμα σύγκλισης του αλγορίθμου.

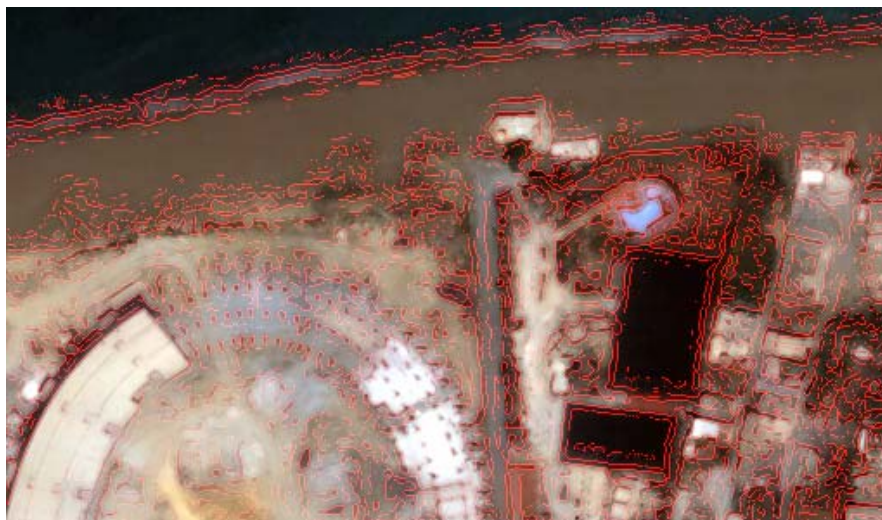


Εικόνα 3.62: (α) 2^η Εφαρμογή, ανισοτροπική διάχυση ALM 1 επανάληψης, (β) 2^η Εφαρμογή, ανισοτροπική διάχυση ALM 200 επαναλήψεων. Παράδειγμα σύγκλισης του αλγορίθμου.

Κατά την εφαρμογή της ALM ανισοτροπικής διάχυσης παρατηρήθηκε ότι τα καλύτερα αποτελέσματα δίνονται έπειτα από 200 επαναλήψεις. Τέλος, στην εικόνα 3.63 φαίνεται η διαφοροποίηση του τελεστή Canny σε σχέση με το μορφολογικό Laplace, όπως αυτός υλοποιήθηκε. Η ανίχνευση των ακμών πραγματοποιήθηκε στη φιλτραρισμένη, έπειτα από 200 επαναλήψεις ALM, εικόνα. Οι παρατηρήσεις για τους δύο τελεστές είναι οι ίδιες με αυτές που παρουσιάστηκαν στην πρώτη εφαρμογή.



(α)

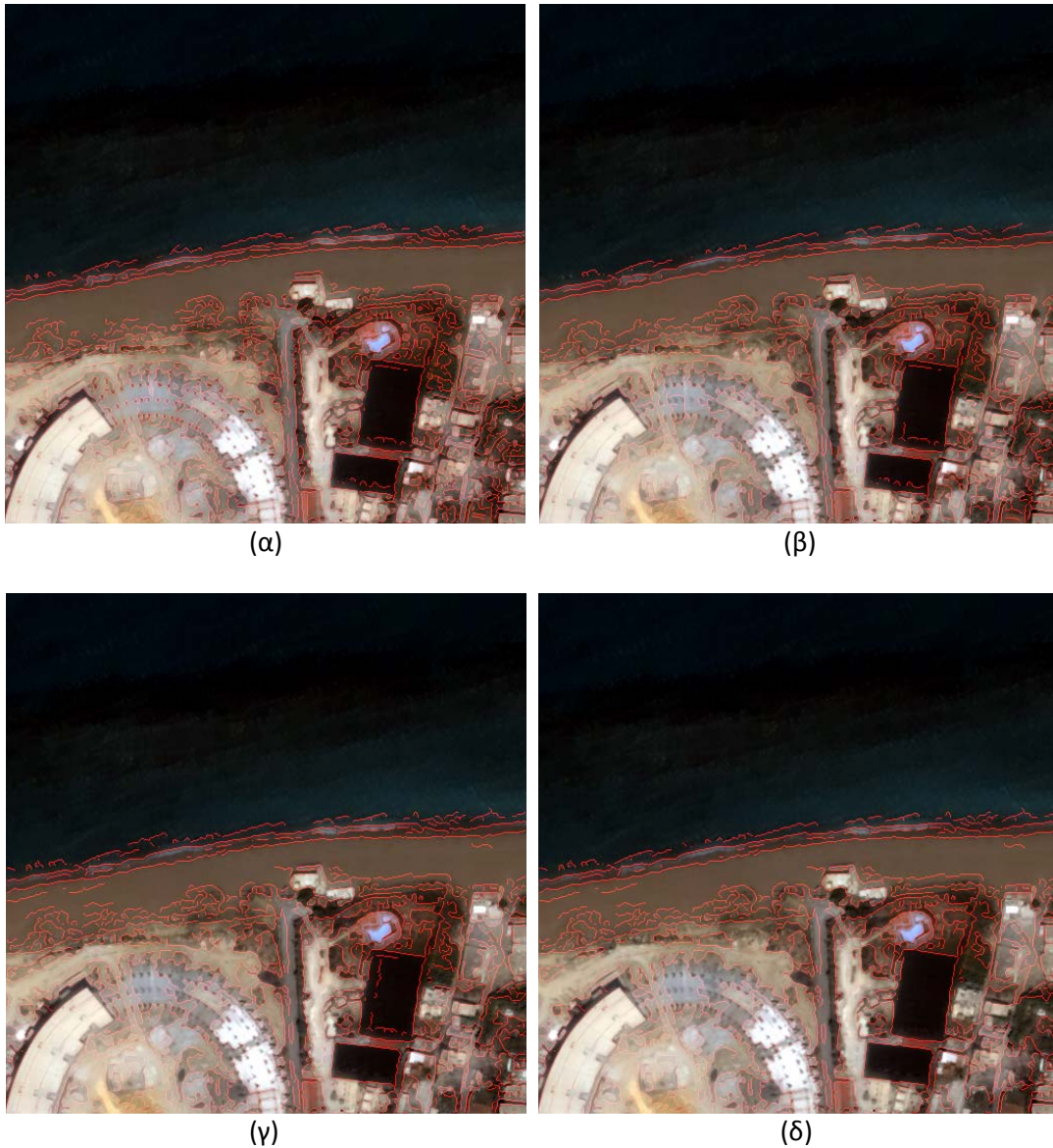


(β)

Εικόνα 3.63: 2^η Εφαρμογή, ALM 200 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.

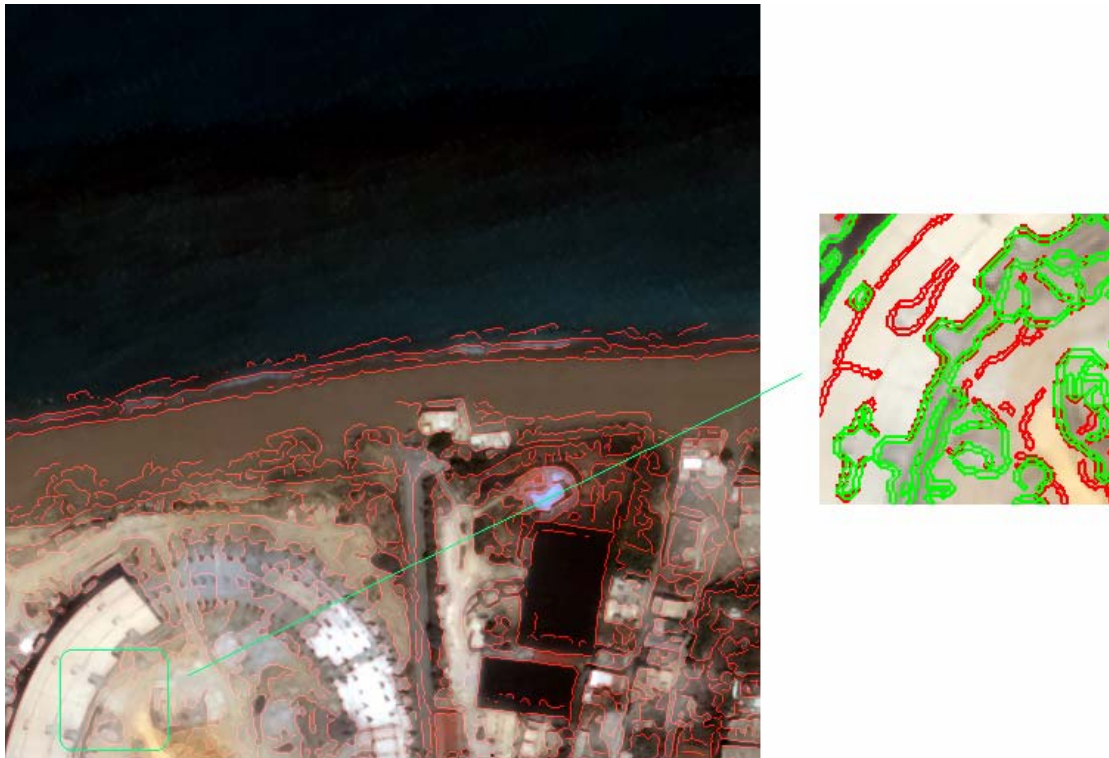
- **Μορφολογική Εξομάλυνση, ML**

Κατά την εφαρμογή μορφολογικής εξομάλυνσης, παρατηρήθηκε ότι τα καλύτερα αποτελέσματα δίνονται έπειτα από 11 επαναλήψεις, σε σύνολο 36 επαναλήψεων. Τα **προβλήματα** που εντοπίστηκαν για μεγαλύτερο αριθμό επαναλήψεων είναι τα εξής: **(α)** μετατόπιση περιγραμμάτων, **(β)** εμφάνιση λίγων ακμών στη θαλάσσια περιοχή και **(γ)** εξάρτηση της μεθόδου από τους γκαουσιανούς σηματοδευτές, και παρουσιάζονται στις επισυναπτόμενες εικόνες.



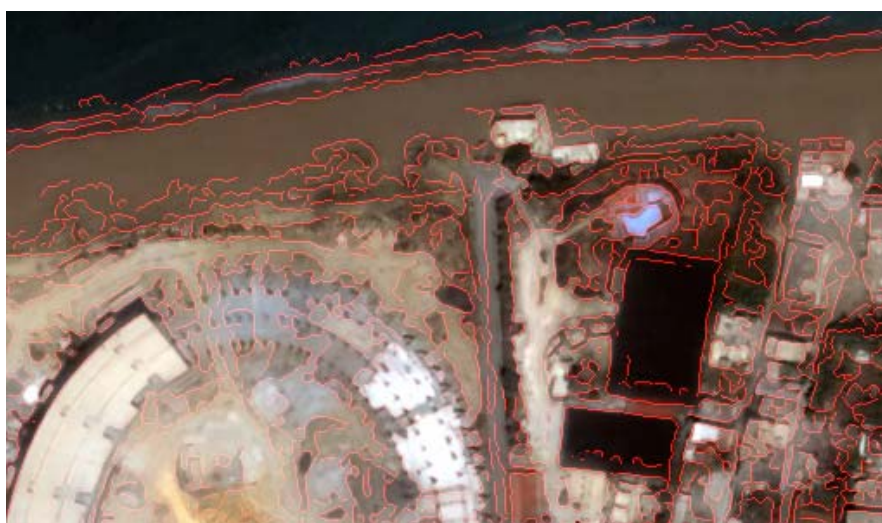
Εικόνα 3.64: (α) 2^η Εφαρμογή, ML 1 επανάληψης, (β) 2^η Εφαρμογή, ML 11 επαναλήψεων, (γ) 2^η Εφαρμογή, ML 21 επαναλήψεων, (δ) 2^η Εφαρμογή, ML 36 επαναλήψεων.

Στην εικόνα 3.64 είναι σαφής η δεύτερη παρατήρηση, κατά την οποία εμφανίζονται ακμές στη θαλάσσια περιοχή καθώς και κάποιες ψευδείς ακμές στην ξηρά, αν και γενικά ομαλοποιείται. Παράλληλα, λόγω της εξάρτησης της μεθόδου από τους γκαουσιανούς σημαδευτές, παρουσιάζονται μετατοπισμένα τα περιγράμματα των αντικειμένων από την ακριβή τους θέση, όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.65. Σημειώνεται ότι στην εικόνα 3.65 παρουσιάζονται οι ακμές της εικόνας έπειτα από φιλτράρισμα 11 και 36 επαναλήψεων, με κόκκινο και πράσινο χρώμα αντίστοιχα.

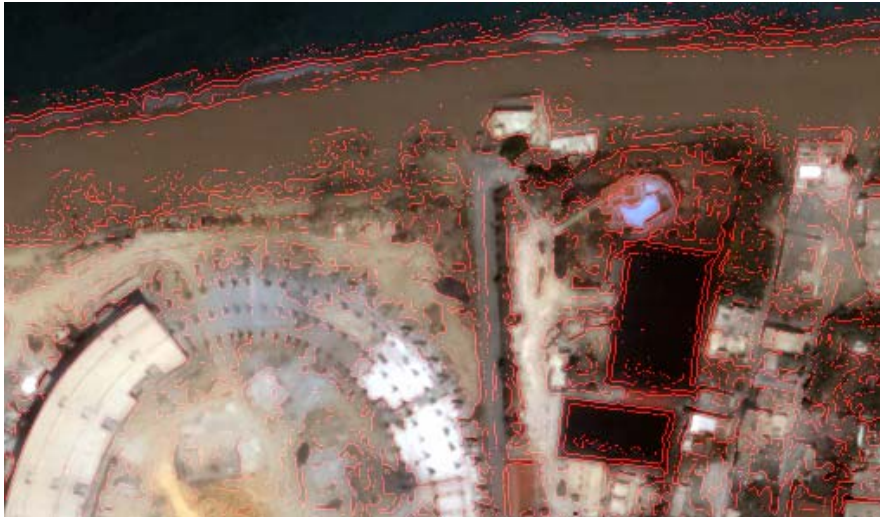


Εικόνα 3.65: 2^η Εφαρμογή, σύγκριση ανίχνευσης ακμών με τον τελεστή Canny έπειτα από φιλτράρισμα 11 και 36 επαναλήψεων (κόκκινο και πράσινο χρώμα, αντίστοιχα). Παρατηρείται μετατόπιση των περιγραμμάτων.

Τέλος, στην εικόνα 3.66 φαίνεται η διαφοροποίηση του τελεστή Canny σε σχέση με το μορφολογικό Laplace, όπως αυτός υλοποιήθηκε. Η ανίχνευση των ακμών πραγματοποιήθηκε στη φιλτραρισμένη, έπειτα από 11 επαναλήψεις ML, εικόνα. Οι παρατηρήσεις για τους δύο τελεστές είναι οι ίδιες με αυτές που παρουσιάστηκαν στην πρώτη εφαρμογή.



(α)

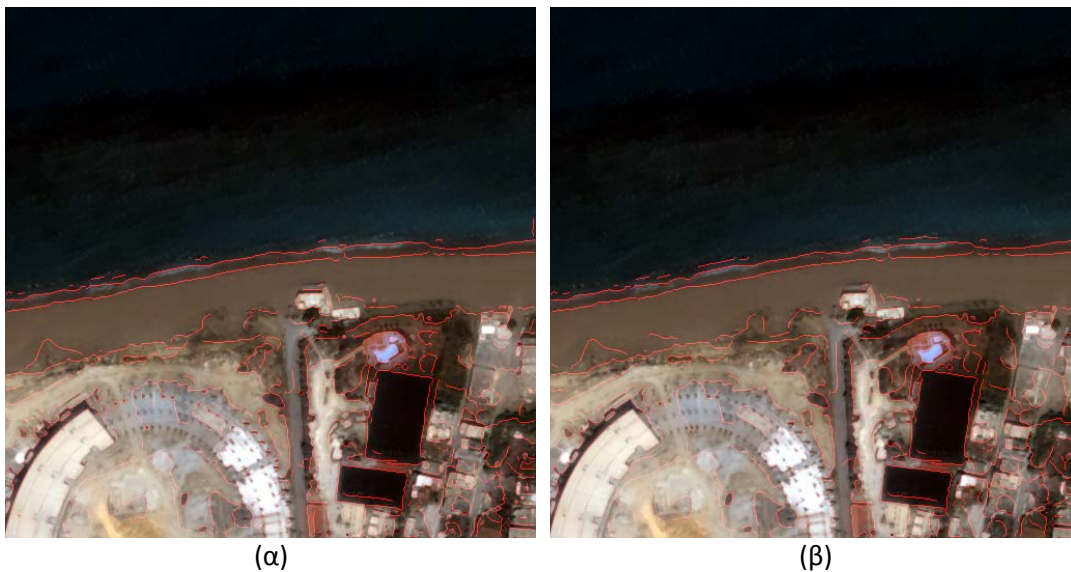


(β)

Εικόνα 3.66: 2^η Εφαρμογή, ML 11 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.

- **Συνδυασμός Ανισοτροπικής Διάχυσης PM και Μορφολογικής Εξομάλυνσης**

Έχει ήδη σημειωθεί ότι στο συνδυασμό της PM ανισοτροπικής διάχυσης με τη μορφολογική εξομάλυνση ενυπάρχουν τα προβλήματα μη σύγκλισης της PM – αν και η ML επιτυγχάνει το στόχο της. Αυτό παρατηρείται και στην εικόνα 3.66 όπου παρατίθενται δύο παραδείγματα εφαρμογής της PM έπειτα από 50 επαναλήψεις (3.67(α)) και της PM 50 επαναλήψεων σε συνδυασμό με μορφολογική εξομάλυνση 10 επαναλήψεων (3.67(β)). Η μορφολογική εξομάλυνση επιτυγχάνει μεγαλύτερη ομαλοποίηση.

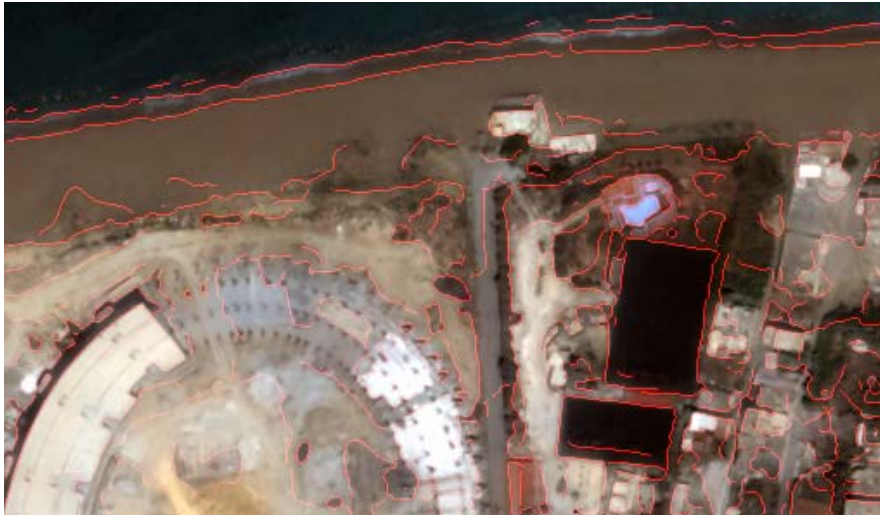


(α)

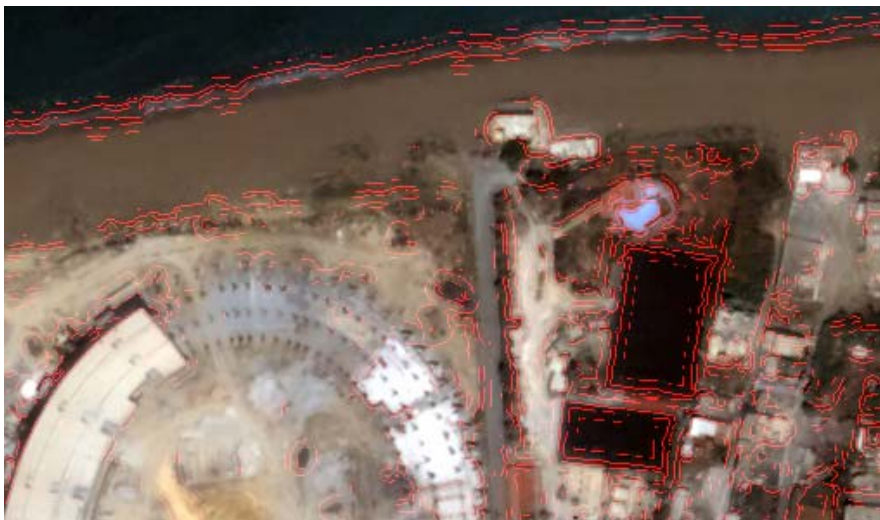
(β)

Εικόνα 3.67: (α) 2^η Εφαρμογή, PM 50 επαναλήψεων, (β) 2^η Εφαρμογή, PM 50 επαναλήψεων και ML 10 επαναλήψεων.

Τέλος, στην εικόνα 3.68 φαίνεται η διαφοροποίηση του τελεστή Canny σε σχέση με το μορφολογικό Laplace, όπως αυτός υλοποιήθηκε. Η ανίχνευση των ακμών πραγματοποιήθηκε στη φιλτραρισμένη, έπειτα από 50 επαναλήψεις PM και 5 επαναλήψεις ML, εικόνα. Οι παρατηρήσεις για τους δύο τελεστές είναι οι ίδιες με αυτές που παρουσιάστηκαν στην πρώτη εφαρμογή.



(α)



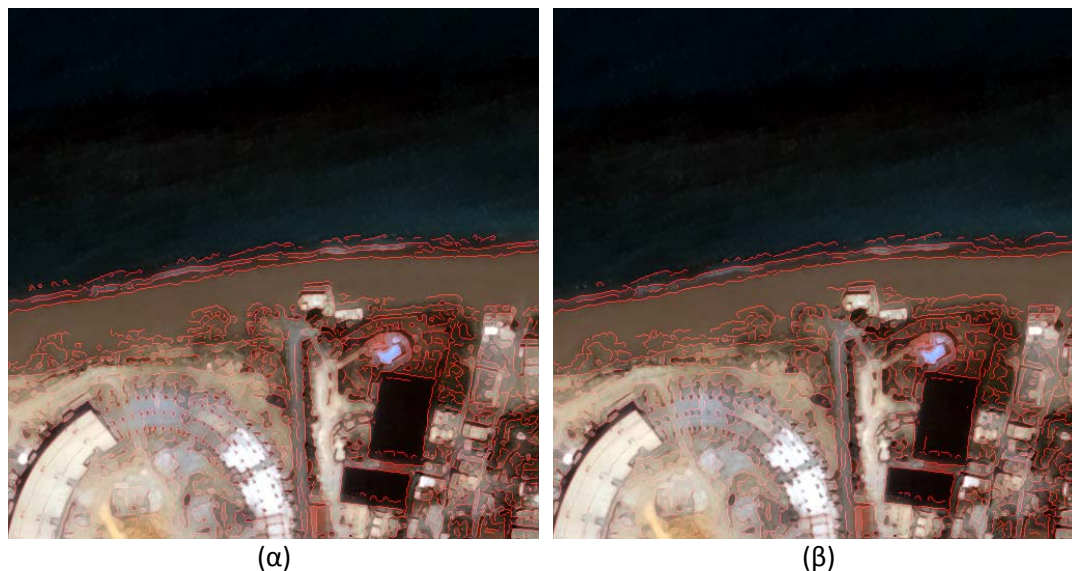
(β)

Εικόνα 3.68: 2^η Εφαρμογή, PM 50 επαναλήψεων και ML 5 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.

- **Συνδυασμός Ανισοτροπικής Διάχυσης ALM και Μορφολογικής Εξομάλυνσης**

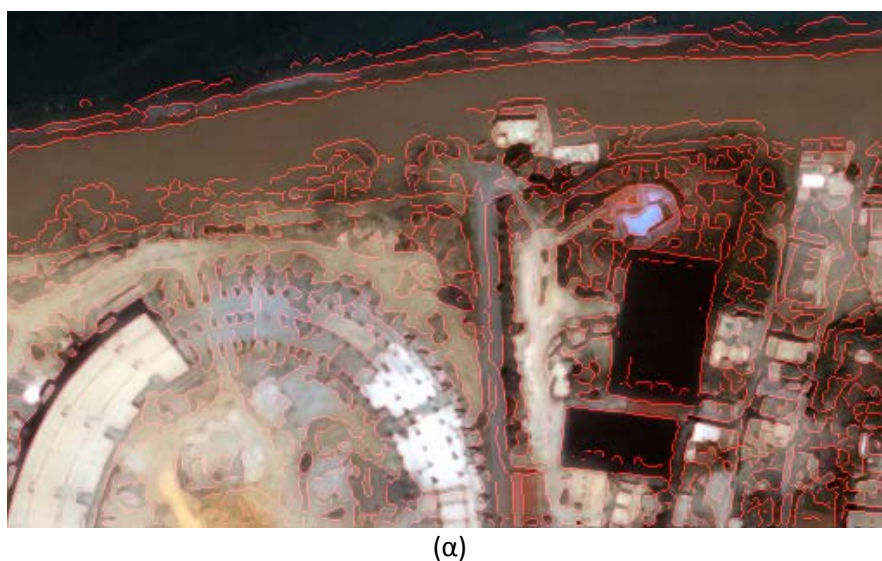
Εν αντιθέσει με την προηγούμενη εφαρμογή, στη συγκεκριμένη περίπτωση η μορφολογική εξομάλυνση λειτουργεί επικουρικά στην ενίσχυση των ακμών με την ALM, επιτυγχάνοντας μεγαλύτερη ομαλοποίηση. Ωστόσο, και σε αυτή την εφαρμογή είναι δύσκολο να αποφανθεί κανείς για την καταλληλότητα της συγκεκριμένης μεθοδολογίας έναντι της αποκλειστικής χρήσης της ALM. Η

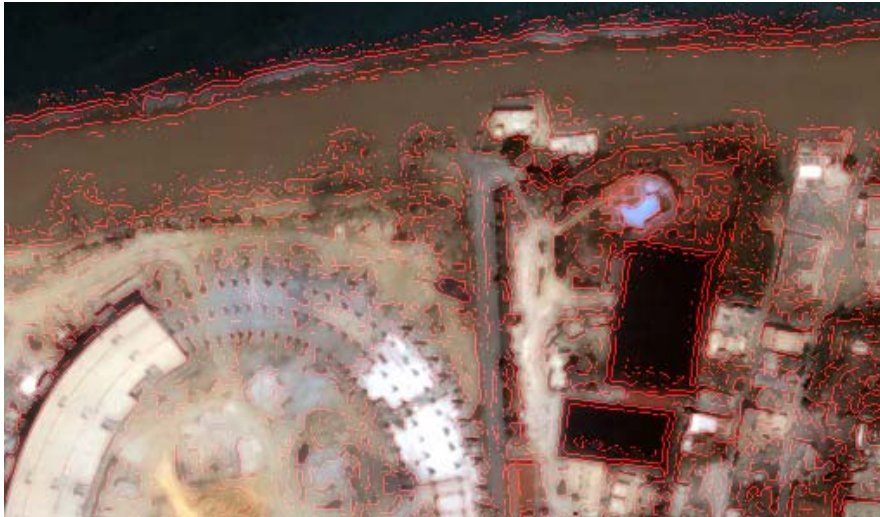
αξιολόγηση και σύγκριση των δύο παρατίθεται στο επόμενο εδάφιο, θέτοντας κριτήρια πληρότητας, ορθότητας και ποιότητας. Έπειτα από πληθώρα συνδυασμών, τα καλύτερα αποτελέσματα δόθηκαν έπειτα από 60 επαναλήψεις ALM και 5 επαναλήψεις ML (εικόνα 3.69).



Εικόνα 3.69: (α) 2^η Εφαρμογή, ALM 60 επαναλήψεων, (β) 2^η Εφαρμογή, ALM 60 επαναλήψεων και ML 5 επαναλήψεων.

Τέλος, στην εικόνα 3.70 φαίνεται η διαφοροποίηση του τελεστή Canny σε σχέση με το μορφολογικό Laplace, όπως αυτός υλοποιήθηκε. Η ανίχνευση των ακμών πραγματοποιήθηκε στη φιλτραρισμένη, έπειτα από 60 επαναλήψεις ALM και 5 επαναλήψεις ML, εικόνα. Οι παρατηρήσεις για τους δύο τελεστές είναι οι ίδιες με αυτές που παρουσιάστηκαν στην πρώτη εφαρμογή.

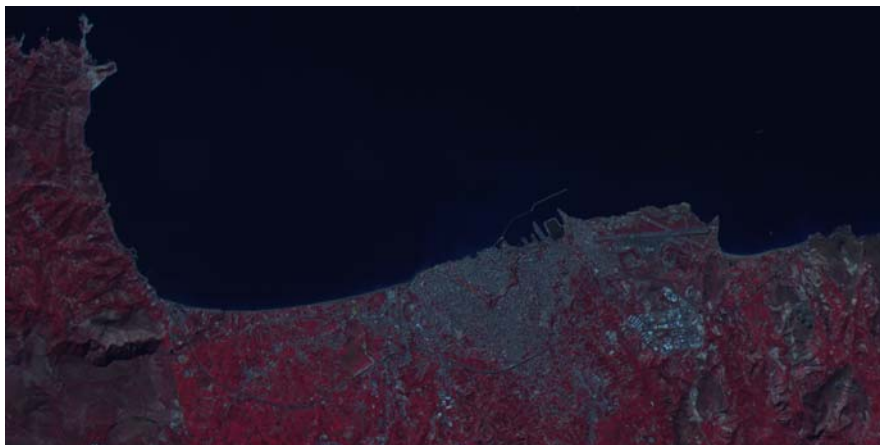




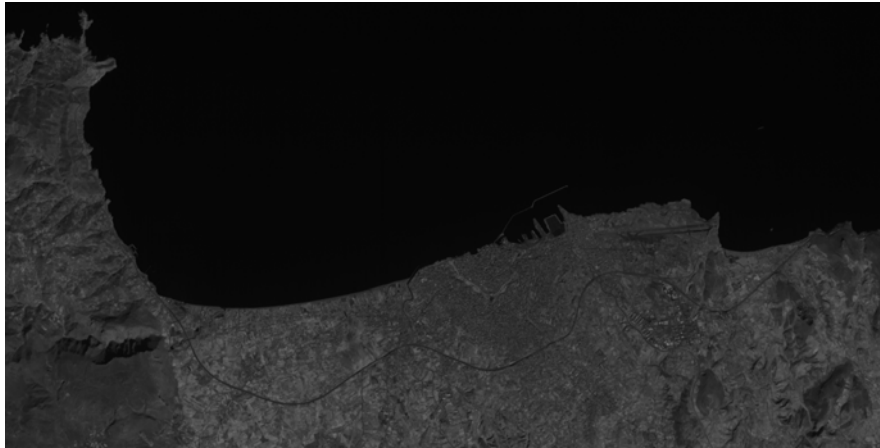
(β)

Εικόνα 3.70: 2^η Εφαρμογή, ALM 60 επαναλήψεων και ML 5 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.

3.2.2.3 3^η Εφαρμογή (ASF, PM, ALM, ML, PM&ML, ALM&ML)



(α)



(β)

Εικόνα 3.71: (α) 3^η Εφαρμογή, απεικόνιση ASTER σε ψευδέγχρωμο σύνθετο RGB-123, (β) 3^η Εφαρμογή, απεικόνιση ASTER στο εγγύς υπέρυθρο κανάλι.

- **Σειριακό Εναλλασσόμενο Φιλτράρισμα, ASF**

Στη συγκεκριμένη – μεσαίας διακριτικής ικανότητας – εφαρμογή παρατηρήθηκε ότι το σειριακό εναλλασσόμενο φιλτράρισμα, έχει πολύ καλά αποτελέσματα, σε σύνολο 26 επαναλήψεων. Γενικά δεν διαπιστώθηκαν προβλήματα, εκτός από τη δυνατότητα ανίχνευσης κάποιων αντικειμένων εντός του θαλάσσιου χώρου. Ως εκ τούτου, τα καλύτερα αποτελέσματα δίνονται έπειτα από 11 επαναλήψεις, αν και με την αύξησή τους ομαλοποιείται πιο έντονα η ξηρά (εικόνα 3.72). Σημειώνεται ότι η εφαρμογή των τεχνικών προ-επεξεργασίας και η ανίχνευση των ακμών με τον τελεστή Canny έγιναν στο εγγύς υπέρυθρο κανάλι, λόγω των φασματικών ιδιοτήτων του νερού, ωστόσο τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο ψευδέγχρωμο σύνθετο με κόκκινο χρώμα.



(α)



(β)



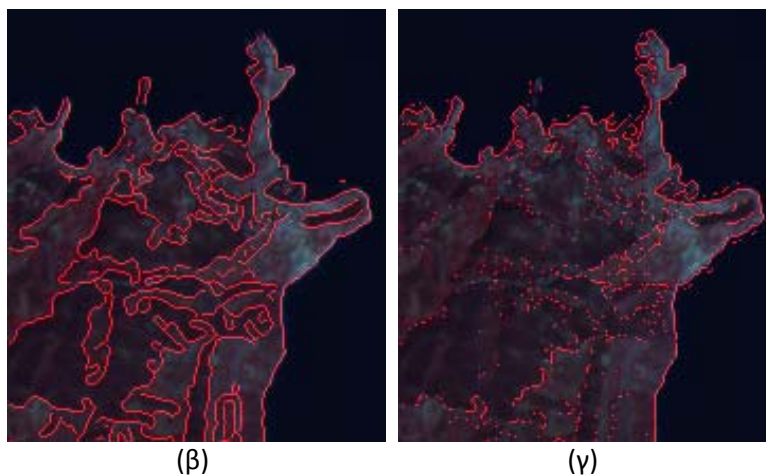
(γ)

Εικόνα 3.72: (α) 3^η Εφαρμογή, ASF 1 επανάληψης, (β) 3^η Εφαρμογή, ASF 11 επαναλήψεων, (γ) 3^η Εφαρμογή, ASF 26 επαναλήψεων.

Τέλος, στην εικόνα 3.73 φαίνεται η διαφοροποίηση του τελεστή Canny σε σχέση με το μορφολογικό Laplace, όπως αυτός υλοποιήθηκε. Η ανίχνευση των ακμών πραγματοποιήθηκε στη φιλτραρισμένη, έπειτα από 11 επαναλήψεις ASF, εικόνα. Οι παρατηρήσεις για τους δύο τελεστές είναι οι ίδιες με αυτές που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες εφαρμογές.



(α)



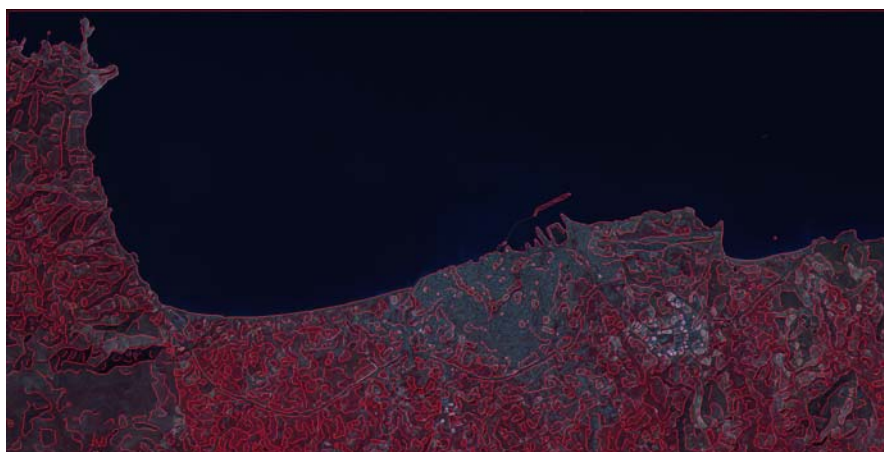
Εικόνα 3.73: 3^η Εφαρμογή, ASF 11 επαναλήψεων. (α) Αρχική εικόνα και ανίχνευση ακμών σε τμήμα της (β) με τον τελεστή Canny, (γ) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.

- **Ανιστροπική Διάχυση PM**

Κατά την εφαρμογή ανιστροπικής διάχυσης PM παρατηρήθηκε ότι με την αύξηση του αριθμού των επαναλήψεων – σε σύνολο 21 επαναλήψεων – διατηρούνται μόνο οι βασικές ακμές της εικόνας, με αποτέλεσμα να απαλείφονται μικρά αντικείμενα (π.χ. προβλήτα). Αυτό είναι και το **μεγαλύτερο μειονέκτημα** της τεχνικής, καθιστώντας την ακατάλληλη. Παράλληλα, παρατηρήθηκε μετατόπιση των περιγραμμάτων των αντικειμένων. Τα συμπεράσματα αυτά φαίνονται στις επισυναπτόμενες εικόνες.

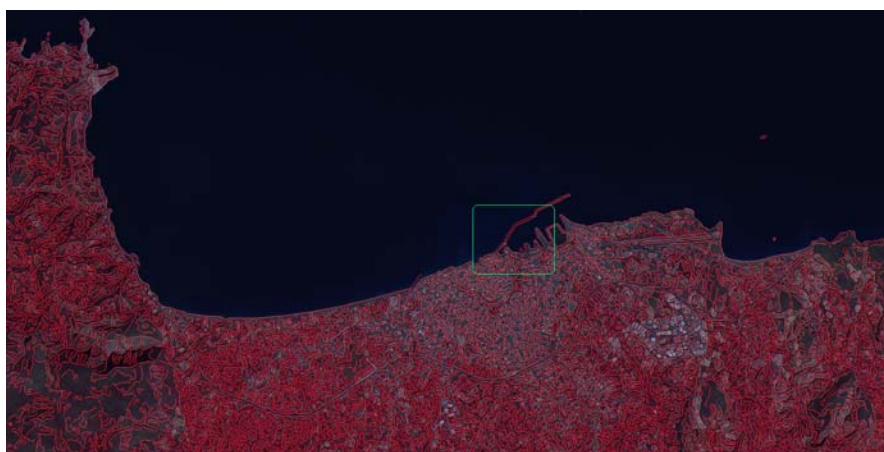


(α)



(β)

Εικόνα 3.74: 3^η Εφαρμογή, ανισοτροπική διάχυση PM (α) 1 επανάληψης, (β) 21 επαναλήψεων. Παράδειγμα μη σύγκλισης αλγορίθμου.



(α)



(β)

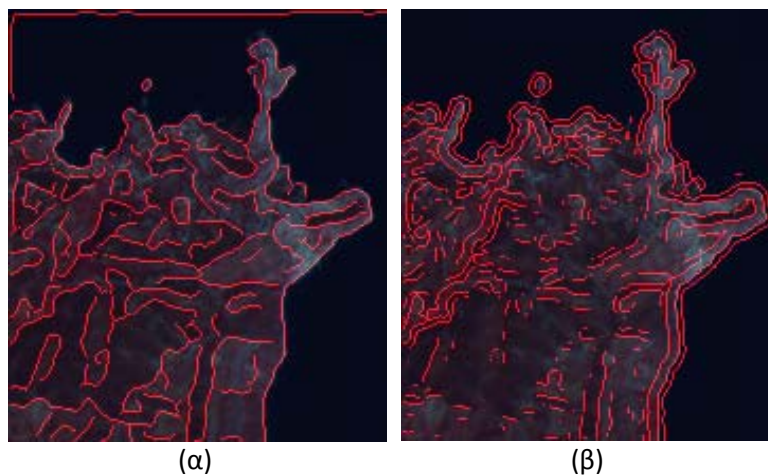


(γ)

Εικόνα 3.75: 3^η Εφαρμογή. (α) Αρχική εικόνα, PM 1 επανάληψης, (β) PM 1 επανάληψης σε τμήμα της αρχικής εικόνας, (γ) PM 11 επαναλήψεων σε τμήμα της αρχικής εικόνας. Παράδειγμα μετατόπισης περιγραμμάτων έπειτα από μικρό αριθμό επαναλήψεων.

Τέλος, στην εικόνα 3.76 φαίνεται η διαφοροποίηση του τελεστή Canny σε σχέση με το μορφολογικό Laplace, όπως αυτός υλοποιήθηκε, στο μαρκαρισμένο τμήμα της εικόνας 3.73(α). Η ανίχνευση των ακμών πραγματοποιήθηκε στη φιλτραρισμένη,

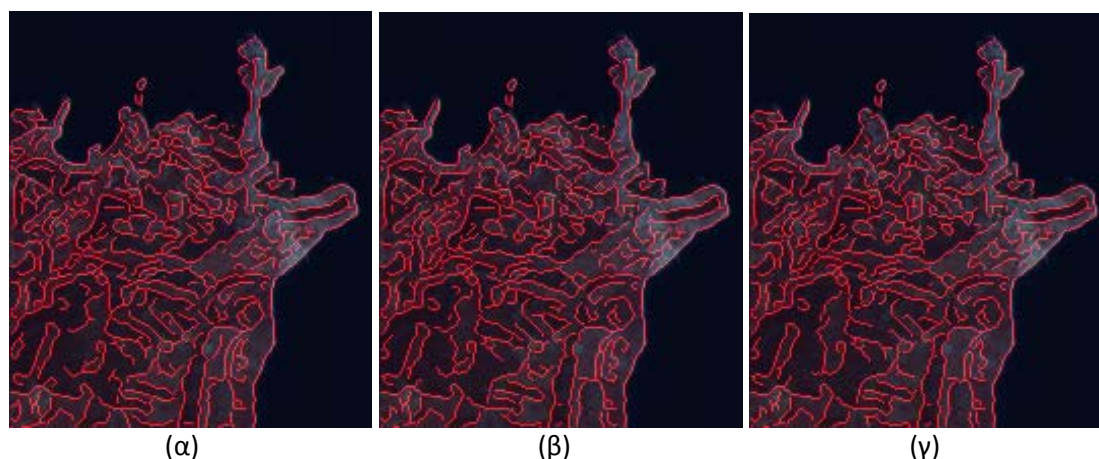
έπειτα από 11 επαναλήψεις PM, εικόνα. Οι παρατηρήσεις για τους δύο τελεστές είναι οι ίδιες με αυτές που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες εφαρμογές.



Εικόνα 3.76: 3^η Εφαρμογή, PM 11 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.

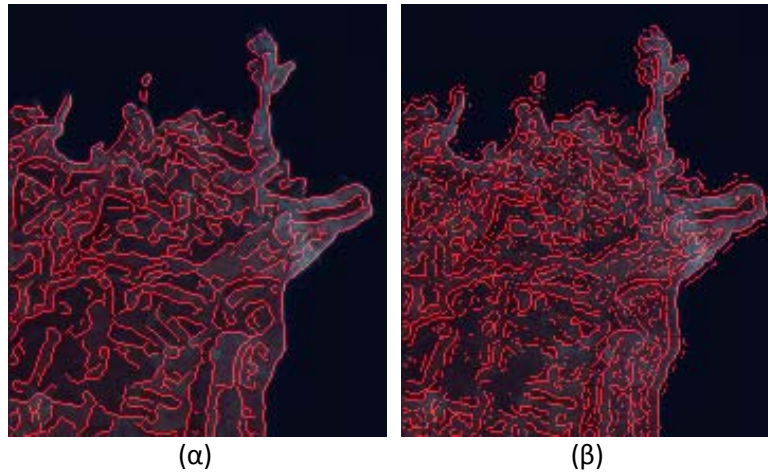
- **Ανιστροπική Διάχυση ALM**

Όπως τονίστηκε και στις προηγούμενες εφαρμογές, εν αντιθέσει με την PM ανιστροπική διάχυση, κατά την εφαρμογή της ALM παρατηρήθηκε ότι ακόμα και σε έντονο φιλτράρισμα ο αλγόριθμος διατηρεί πιστά τις μεταβολές των τιμών φωτεινότητας της αρχικής εικόνας, κι επομένως τη γεωμετρία των αντικειμένων. Αυτό φαίνεται χαρακτηριστικά στην εικόνα 3.77, όπου παρατίθεται το μαρκαρισμένο τμήμα της εικόνας 3.73(α) έπειτα από εφαρμογή του αλγορίθμου για 1, 50 και 100 επαναλήψεις.



Εικόνα 3.77: 3^η Εφαρμογή, ανιστροπική διάχυση ALM (α) 1 επανάληψης, (β) 50 επαναλήψεων, (γ) 100 επαναλήψεων σε τμήμα της αρχικής εικόνας. Παράδειγμα σύγκλισης του αλγορίθμου.

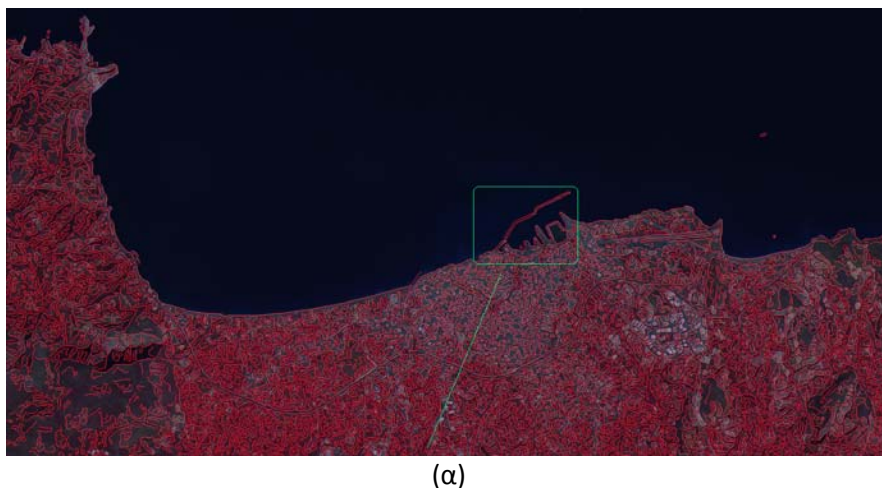
Κατά την εφαρμογή της ALM ανιστροπικής διάχυσης παρατηρήθηκε ότι τα καλύτερα αποτελέσματα δίνονται έπειτα από 50 επαναλήψεις – σε σύνολο 100 επαναλήψεων. Τέλος, στην εικόνα 3.78 φαίνεται η διαφοροποίηση του τελεστή Canny σε σχέση με το μορφολογικό Laplace, όπως αυτός υλοποιήθηκε. Η ανίχνευση των ακμών πραγματοποιήθηκε στη φιλτραρισμένη, έπειτα από 26 επαναλήψεις ALM, εικόνα. Οι παρατηρήσεις για τους δύο τελεστές είναι οι ίδιες με αυτές που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες εφαρμογές.

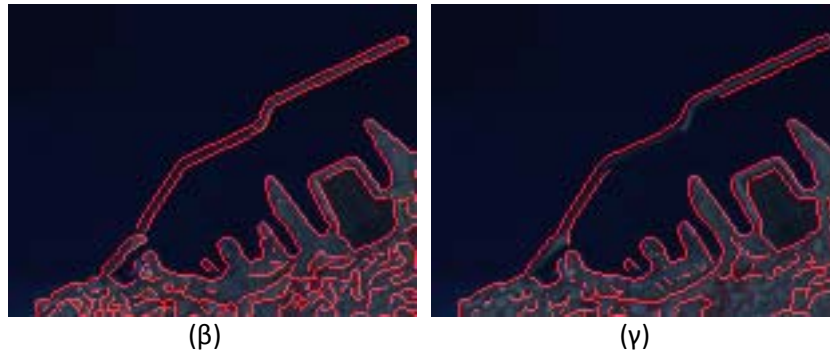


Εικόνα 3.78: 3^η Εφαρμογή, ALM 26 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.

- **Μορφολογική Εξομάλυνση, ML**

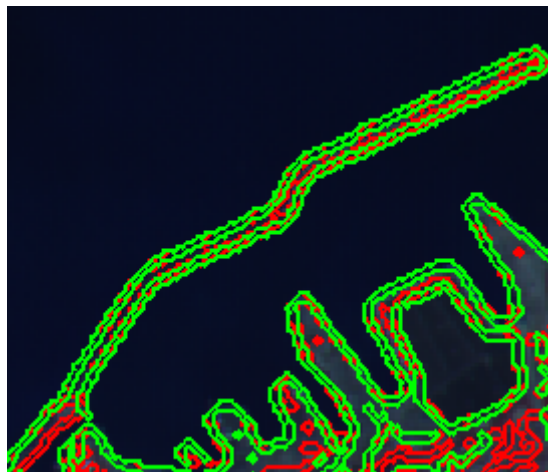
Κατά την εφαρμογή μορφολογικής εξομάλυνσης, παρατηρήθηκε ότι τα καλύτερα αποτελέσματα δίνονται έπειτα από 1 επανάληψη, σε σύνολο 35 επαναλήψεων. Τα **προβλήματα** που εντοπίστηκαν για μεγαλύτερο αριθμό επαναλήψεων είναι τα εξής: **(α)** μετατόπιση περιγραμμάτων, **(β)** απαλοιφή βασικών ακμών και **(γ)** εξάρτηση της μεθόδου από τους γκαουσιανούς σημαδευτές, και παρουσιάζονται στις επισυναπτόμενες εικόνες.





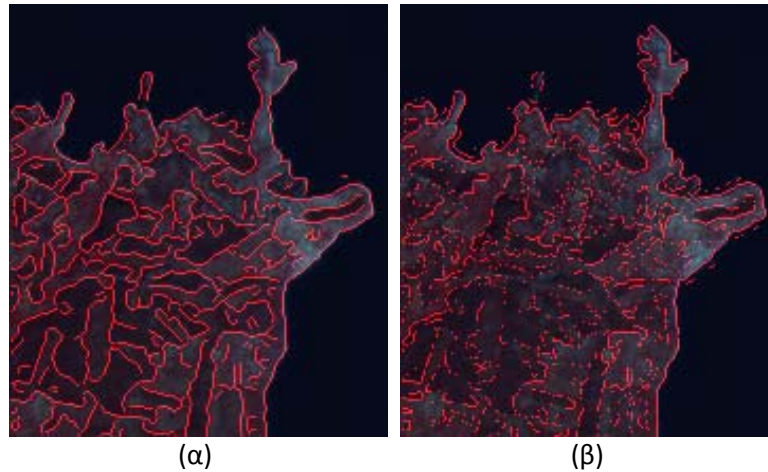
Εικόνα 3.79: 3^η Εφαρμογή. (α) Αρχική εικόνα, (β) ML 1 επανάληψης σε τμήμα της αρχικής εικόνας, (β) ML 35 επαναλήψεων σε τμήμα της αρχικής εικόνας.

Στην εικόνα 3.80 επισυνάπτεται η μετατόπιση των περιγραμμάτων της προβλήτας και τμήματος του λιμένος έπειτα από μορφολογική εξομάλυνση 1 και 16 επαναλήψεων (κόκκινο και πράσινο χρώμα, αντίστοιχα) στο μαρκαρισμένο τμήμα της εικόνας 3.79(α).



Εικόνα 3.80: 3^η Εφαρμογή, σύγκριση ανίχνευσης ακμών με τον τελεστή Canny έπειτα από φιλτράρισμα 1 και 16 επαναλήψεων (κόκκινο και πράσινο χρώμα, αντίστοιχα). Παρατηρείται μετατόπιση των περιγραμμάτων.

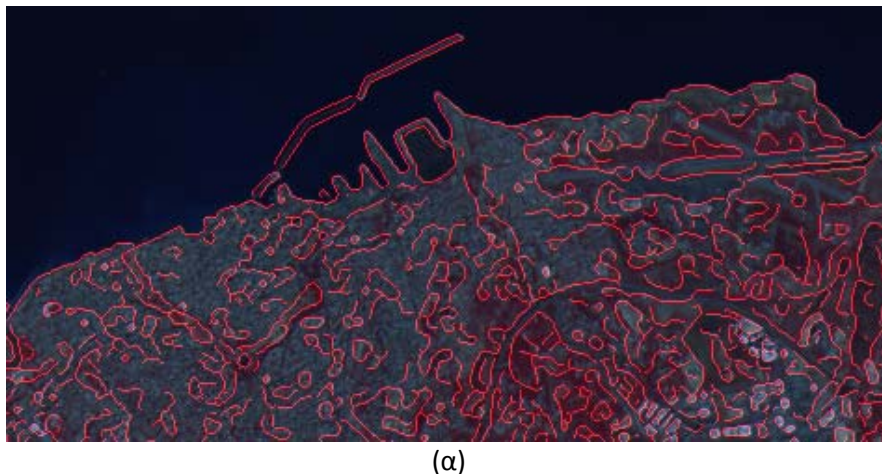
Τέλος, στην εικόνα 3.81 φαίνεται η διαφοροποίηση του τελεστή Canny σε σχέση με το μορφολογικό Laplace, όπως αυτός υλοποιήθηκε. Η ανίχνευση των ακμών πραγματοποιήθηκε στη φιλτραρισμένη, έπειτα από 11 επαναλήψεις ML, εικόνα. Οι παρατηρήσεις για τους δύο τελεστές είναι οι ίδιες με αυτές που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες εφαρμογές.



Εικόνα 3.81: 3^η Εφαρμογή, ML 11 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.

- **Συνδυασμός Ανισοτροπικής Διάχυσης PM και Μορφολογικής Εξομάλυνσης**

Έχει ήδη σημειωθεί ότι στο συνδυασμό της PM ανισοτροπικής διάχυσης με τη μορφολογική εξομάλυνση ενυπάρχουν τα προβλήματα μη σύγκλισης της PM – αν και η ML επιτυγχάνει το στόχο της. Αυτό παρατηρείται και στην εικόνα 3.82 όπου παρατίθενται δύο παραδείγματα εφαρμογής της PM σε τμήμα της αρχικής εικόνας, έπειτα από 10 επαναλήψεις (3.82(α)) και της PM 10 επαναλήψεων σε συνδυασμό με μορφολογική εξομάλυνση 5 επαναλήψεων (3.82(β)). Η μορφολογική εξομάλυνση επιτυγχάνει μεγαλύτερη ομαλοποίηση, αν και παρατηρείται μετατόπιση των ακμών.

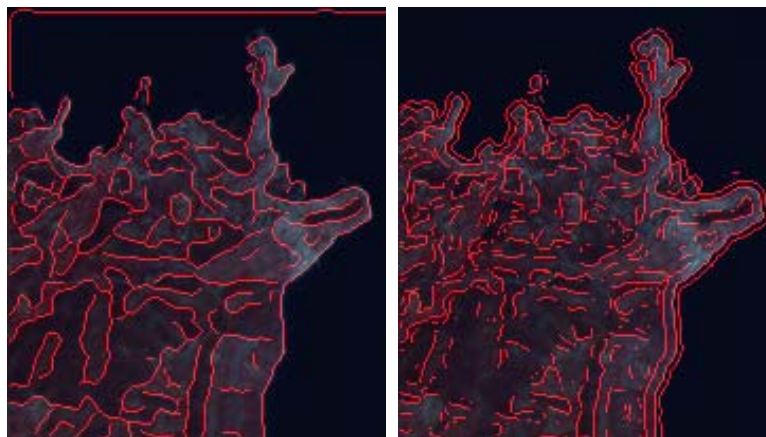




(β)

Εικόνα 3.82: (α) 3^η Εφαρμογή, PM 10 επαναλήψεων, (β) 3^η Εφαρμογή, PM 10 επαναλήψεων και ML 5 επαναλήψεων σε τμήμα της αρχικής εικόνας.

Τέλος, στην εικόνα 3.83 φαίνεται η διαφοροποίηση του τελεστή Canny σε σχέση με το μορφολογικό Laplace, όπως αυτός υλοποιήθηκε. Η ανίχνευση των ακμών πραγματοποιήθηκε στη φιλτραρισμένη, έπειτα από 10 επαναλήψεις PM και 5 επαναλήψεις ML, εικόνα. Οι παρατηρήσεις για τους δύο τελεστές είναι οι ίδιες με αυτές που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες εφαρμογές.



(α)

(β)

Εικόνα 3.83: 3^η Εφαρμογή, PM 10 επαναλήψεων και ML 5 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.

- **Συνδυασμός Ανισοτροπικής Διάχυσης ALM και Μορφολογικής Εξομάλυνσης**

Εν αντιθέσει με την προηγούμενη εφαρμογή, στη συγκεκριμένη περίπτωση η μορφολογική εξομάλυνση λειτουργεί επικουρικά στην ενίσχυση των ακμών με την ALM, επιτυγχάνοντας μεγαλύτερη ομαλοποίηση. Ωστόσο, και σε αυτή την εφαρμογή είναι δύσκολο να αποφανθεί κανείς για την καταλληλότητα της συγκεκριμένης μεθοδολογίας έναντι της αποκλειστικής χρήσης της ALM. Η αξιολόγηση και σύγκριση των δύο παρατίθεται στο επόμενο εδάφιο, θέτοντας

κριτήρια πληρότητας, ορθότητας και ποιότητας. Έπειτα από πληθώρα συνδυασμών, τα καλύτερα αποτελέσματα δόθηκαν έπειτα από 50 επαναλήψεις ALM και 5 επαναλήψεις ML (εικόνα 3.84).



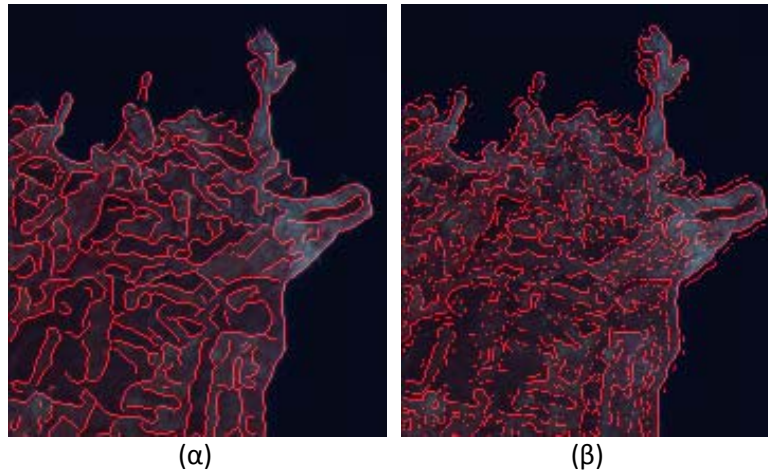
(α)



(β)

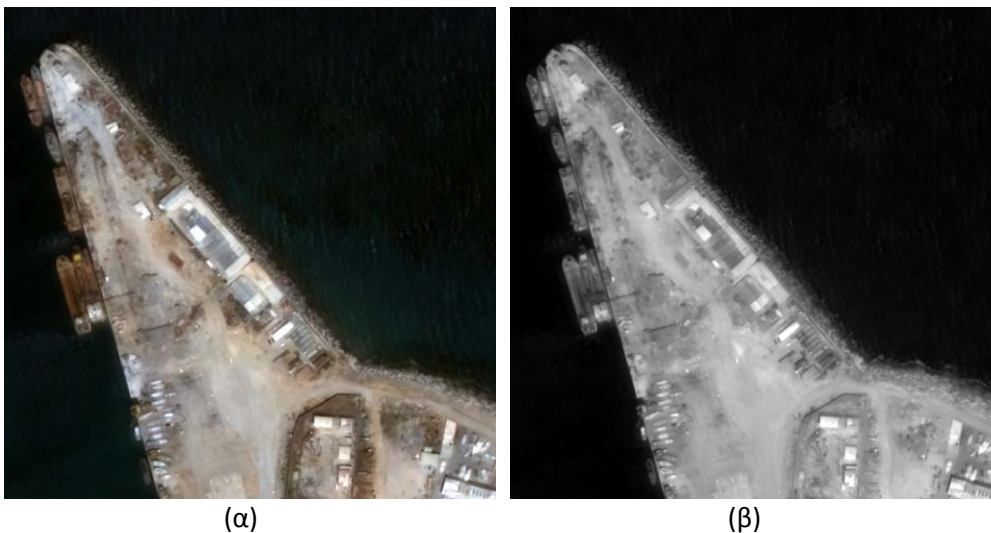
Εικόνα 3.84: (α) 3^η Εφαρμογή, ALM 50 επαναλήψεων, (β) 3^η Εφαρμογή, ALM 50 επαναλήψεων και ML 5 επαναλήψεων.

Τέλος, στην εικόνα 3.85 φαίνεται η διαφοροποίηση του τελεστή Canny σε σχέση με το μορφολογικό Laplace, όπως αυτός υλοποιήθηκε. Η ανίχνευση των ακμών πραγματοποιήθηκε στη φιλτραρισμένη, έπειτα από 50 επαναλήψεις ALM και 5 επαναλήψεις ML, εικόνα. Οι παρατηρήσεις για τους δύο τελεστές είναι οι ίδιες με αυτές που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες εφαρμογές.



Εικόνα 3.85: 3^η Εφαρμογή, ALM 50 επαναλήψεων και ML 5 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.

3.2.2.4 4^η Εφαρμογή (ASF, PM, ALM, ML, PM&ML, ALM&ML)

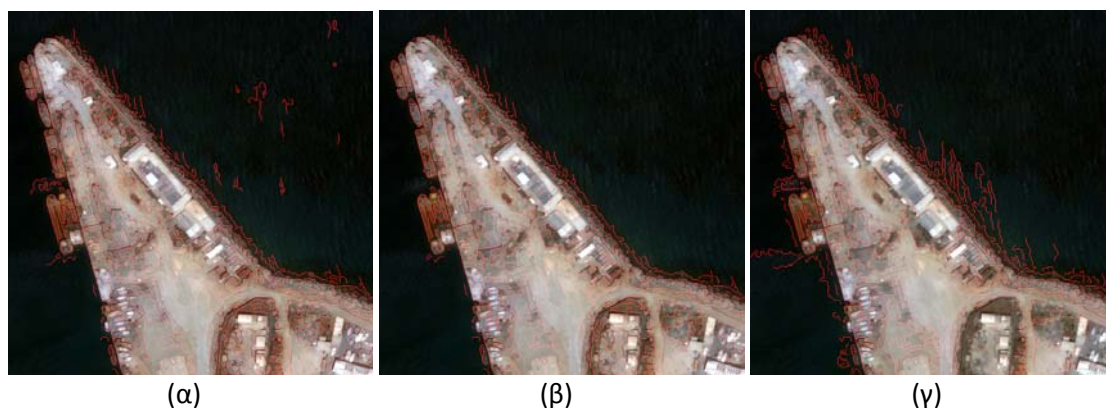


Εικόνα 3.86: (α) 4^η Εφαρμογή, απεικόνιση QUICKBIRD στο φυσικό έγχρωμο σύνθετο, (β) 4^η Εφαρμογή, απεικόνιση QUICKBIRD στο εγγύς υπέρυθρο κανάλι.

- **Σειριακό Εναλλασσόμενο Φιλτράρισμα, ASF**

Κατά την εφαρμογή σειριακού εναλλασσόμενου φιλτραρίσματος, παρατηρήθηκε ότι τα καλύτερα αποτελέσματα δίνονται έπειτα από 4 επαναλήψεις, σε σύνολο 21 επαναλήψεων. Το **πρόβλημα** που εντοπίστηκε για μεγαλύτερο αριθμό επαναλήψεων είναι η εμφάνιση ακμών στη θαλάσσια περιοχή, και παρουσιάζεται στις επισυναπτόμενες εικόνες. Η μεγαλύτερη δυσκολία στην επεξεργασία της συγκεκριμένης απεικόνισης έγκειται στο γεγονός ότι τα νερά στα βράχια είναι αβαθή, με αποτέλεσμα την ανίχνευση ακμών στα σημεία αυτά. Σημειώνεται ότι η εφαρμογή των τεχνικών προ-επεξεργασίας και η ανίχνευση των ακμών με τον

τελεστή Canny έγιναν στο εγγύς υπέρυθρο κανάλι, λόγω των φασματικών ιδιοτήτων του νερού, ωστόσο τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο φυσικό έγχρωμο σύνθετο με κόκκινο χρώμα.



Εικόνα 3.87: (α) 4^η Εφαρμογή, ASF 1 επανάληψης, (β) 4^η Εφαρμογή, ASF 4 επαναλήψεων, (γ) 4^η Εφαρμογή, ASF 21 επαναλήψεων.

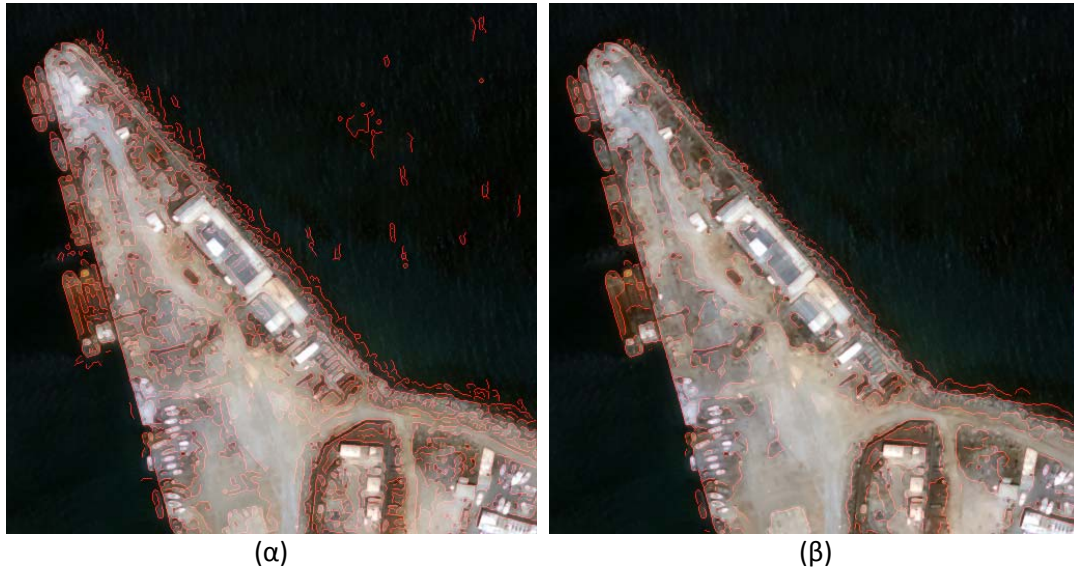
Τέλος, στην εικόνα 3.88 φαίνεται η διαφοροποίηση του τελεστή Canny σε σχέση με το μορφολογικό Laplace, όπως αυτός υλοποιήθηκε. Η ανίχνευση των ακμών πραγματοποιήθηκε στη φιλτραρισμένη, έπειτα από 4 επαναλήψεις ASF, εικόνα. Οι παρατηρήσεις για τους δύο τελεστές είναι οι ίδιες με αυτές που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες εφαρμογές.



Εικόνα 3.88: 4^η Εφαρμογή, ASF 4 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.

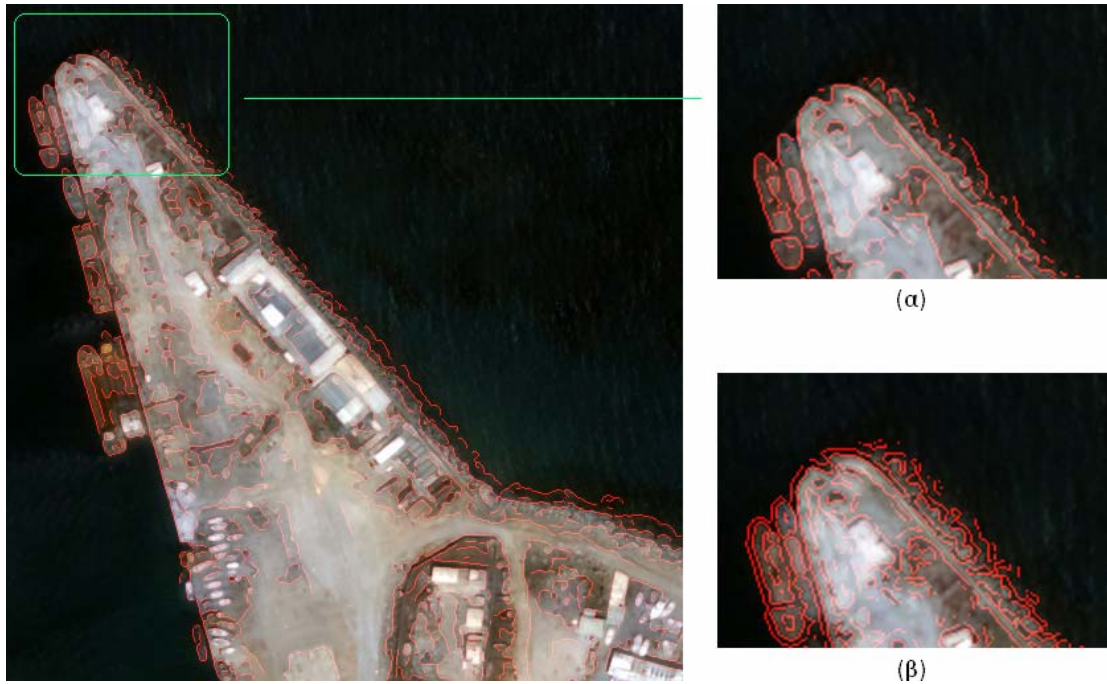
- **Ανισοτροπική Διάχυση PM**

Κατά την εφαρμογή ανισοτροπικής διάχυσης PM παρατηρήθηκε ότι με την αύξηση του αριθμού των επαναλήψεων – σε σύνολο 26 επαναλήψεων – διατηρούνται μόνο οι βασικές ακμές της εικόνας, με αποτέλεσμα να απαλείφονται μικρά αντικείμενα (π.χ. βράχια σε αβαθή νερά). Αυτό είναι και το **μεγαλύτερο μειονέκτημα** της τεχνικής, καθιστώντας την ακατάλληλη. Παράλληλα, παρατηρήθηκε μετατόπιση των περιγραμμάτων των αντικειμένων. Τα συμπεράσματα αυτά φαίνονται στις επισυναπτόμενες εικόνες.



Εικόνα 3.89: 4^η Εφαρμογή, ανισοτροπική διάχυση PM (α) 1 επανάληψης, (β) 26 επαναλήψεων. Παράδειγμα μη σύγκλισης αλγορίθμου.

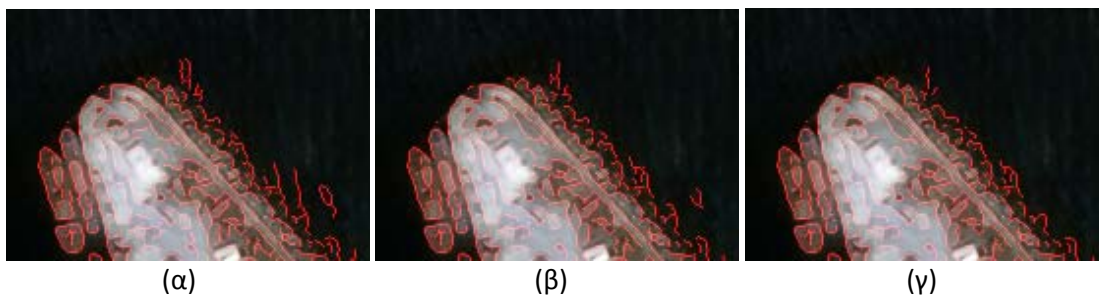
Τέλος, στην εικόνα 3.90 φαίνεται η διαφοροποίηση του τελεστή Canny σε σχέση με το μορφολογικό Laplace, όπως αυτός υλοποιήθηκε. Η ανίχνευση των ακμών πραγματοποιήθηκε στη φιλτραρισμένη, έπειτα από 11 επαναλήψεις PM, εικόνα. Οι παρατηρήσεις για τους δύο τελεστές είναι οι ίδιες με αυτές που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες εφαρμογές.



Εικόνα 3.90: 4^η Εφαρμογή, PM 11 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.

- **Ανισοτροπική Διάχυση ALM**

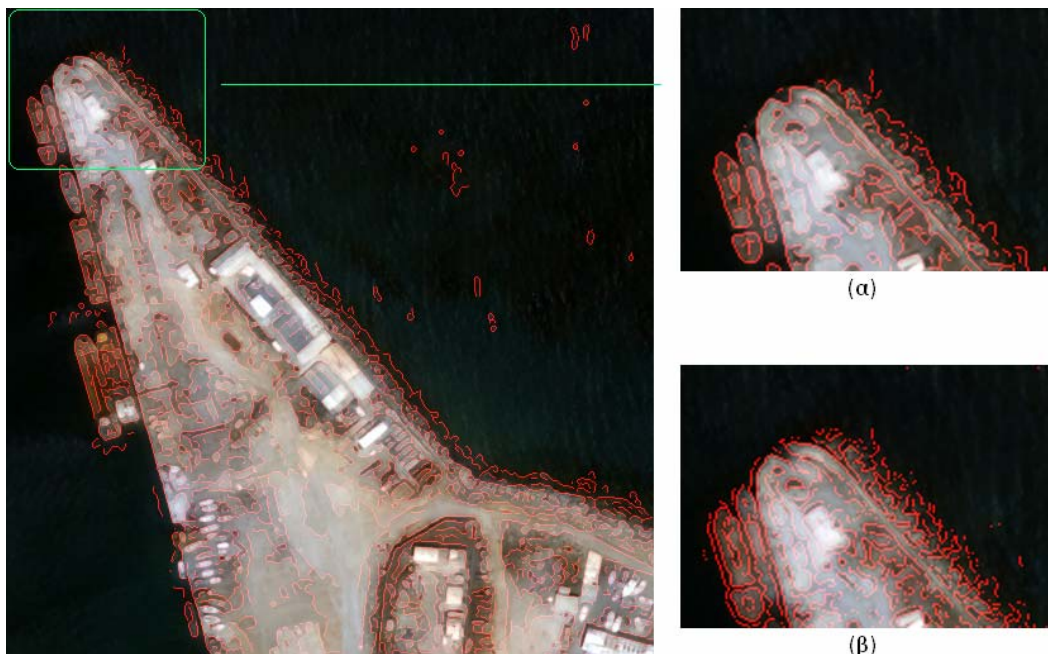
Όπως τονίστηκε και στις προηγούμενες εφαρμογές, εν αντιθέσει με την PM ανισοτροπική διάχυση, κατά την εφαρμογή της ALM παρατηρήθηκε ότι ακόμα και σε έντονο φιλτράρισμα ο αλγόριθμος διατηρεί πιστά τις μεταβολές των τιμών φωτεινότητας της αρχικής εικόνας, κι επομένως τη γεωμετρία των αντικειμένων. Αυτό φαίνεται χαρακτηριστικά στην εικόνα 3.91, όπου παρατίθεται το μαρκαρισμένο τμήμα της εικόνας 3.90 έπειτα από εφαρμογή του αλγορίθμου για 1, 100 και 200 επαναλήψεις.



Εικόνα 3.91: 4^η Εφαρμογή, ανισοτροπική διάχυση ALM (α) 1 επανάληψης, (β) 100 επαναλήψεων, (γ) 200 επαναλήψεων, σε τμήμα της αρχικής εικόνας. Παράδειγμα σύγκλισης του αλγορίθμου.

Κατά την εφαρμογή της ALM ανισοτροπικής διάχυσης παρατηρήθηκε ότι τα καλύτερα αποτελέσματα δίνονται έπειτα από 200 επαναλήψεις – σε σύνολο 300 επαναλήψεων. Τέλος, στην εικόνα 3.92 φαίνεται η διαφοροποίηση του τελεστή

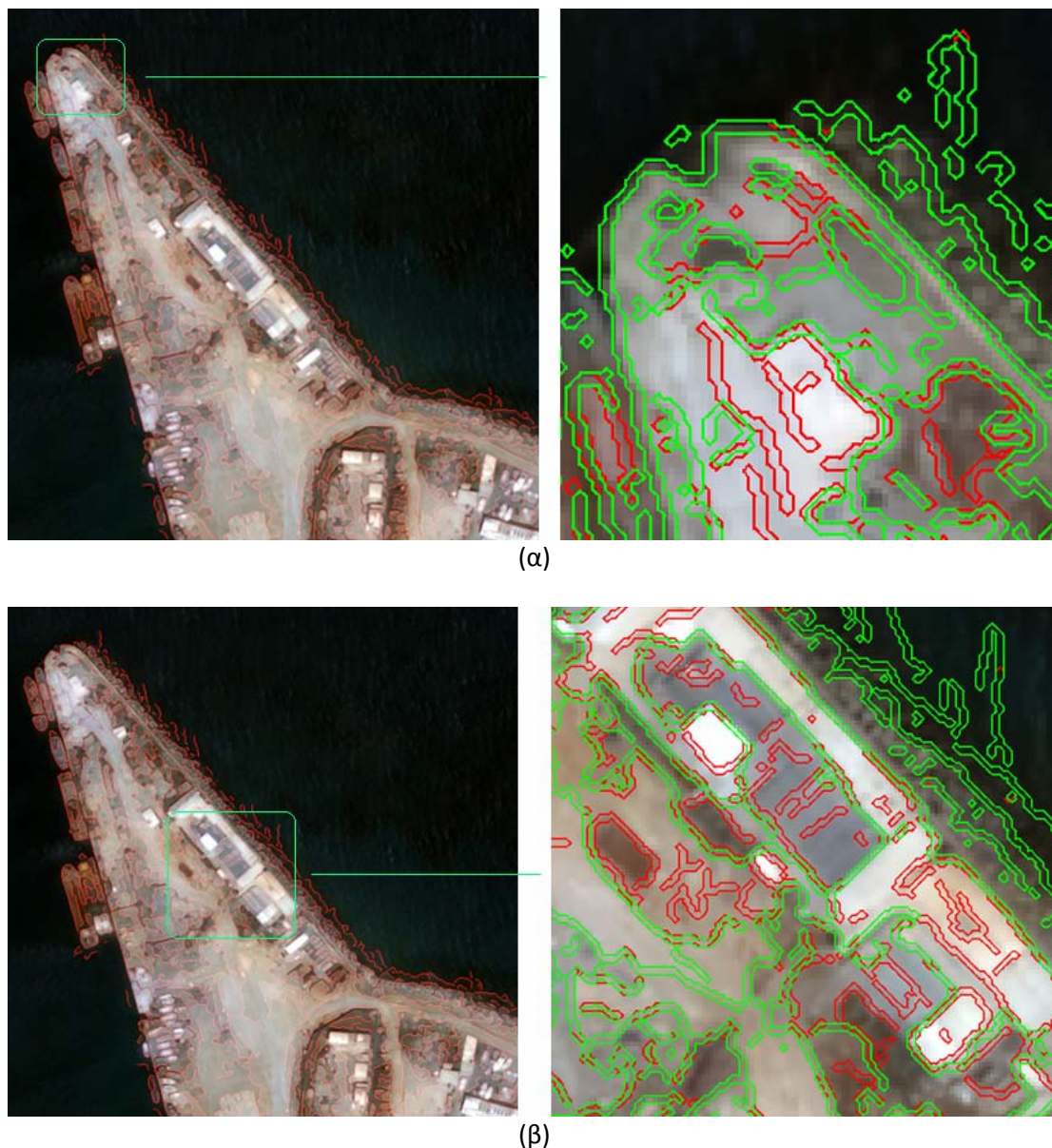
Canny σε σχέση με το μορφολογικό Laplace, όπως αυτός υλοποιήθηκε. Η ανίχνευση των ακμών πραγματοποιήθηκε στη φιλτραρισμένη, έπειτα από 200 επαναλήψεις ALM, εικόνα. Οι παρατηρήσεις για τους δύο τελεστές είναι οι ίδιες με αυτές που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες εφαρμογές.



Εικόνα 3.92: 4^η Εφαρμογή, ALM 200 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.

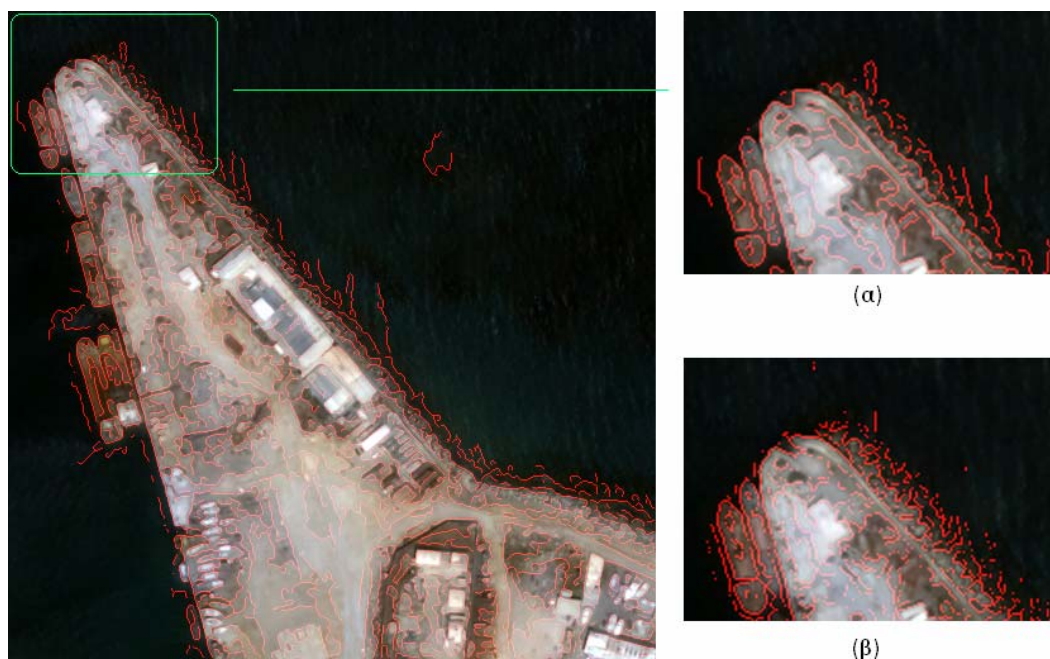
- **Μορφολογική Εξομάλυνση, ML**

Κατά την εφαρμογή μορφολογικής εξομάλυνσης, παρατηρήθηκε ότι τα καλύτερα αποτελέσματα δίνονται έπειτα από 6 επαναλήψεις, σε σύνολο 21 επαναλήψεων. Το **πρόβλημα** που εντοπίστηκε για μεγαλύτερο αριθμό επαναλήψεων είναι μετατόπιση των περιγραμμάτων κάποιων αντικειμένων λόγω της εξάρτησης της μεθόδου από τους γκαουσιανούς σηματοδευτές, και παρουσιάζεται στις επισυναπτόμενες εικόνες. Σε αυτές σημειώνεται η μετατόπιση των περιγραμμάτων δύο τμημάτων της αρχικής εικόνας έπειτα από μορφολογική εξομάλυνση 6 και 11 επαναλήψεων (κόκκινο και πράσινο χρώμα, αντίστοιχα).



Εικόνα 3.93: 4^η Εφαρμογή, σύγκριση ανίχνευσης ακμών με τον τελεστή Canny έπειτα από φιλτράρισμα 6 και 11 επαναλήψεων (κόκκινο και πράσινο χρώμα, αντίστοιχα). Παρατηρείται μετατόπιση των περιγραμμάτων.

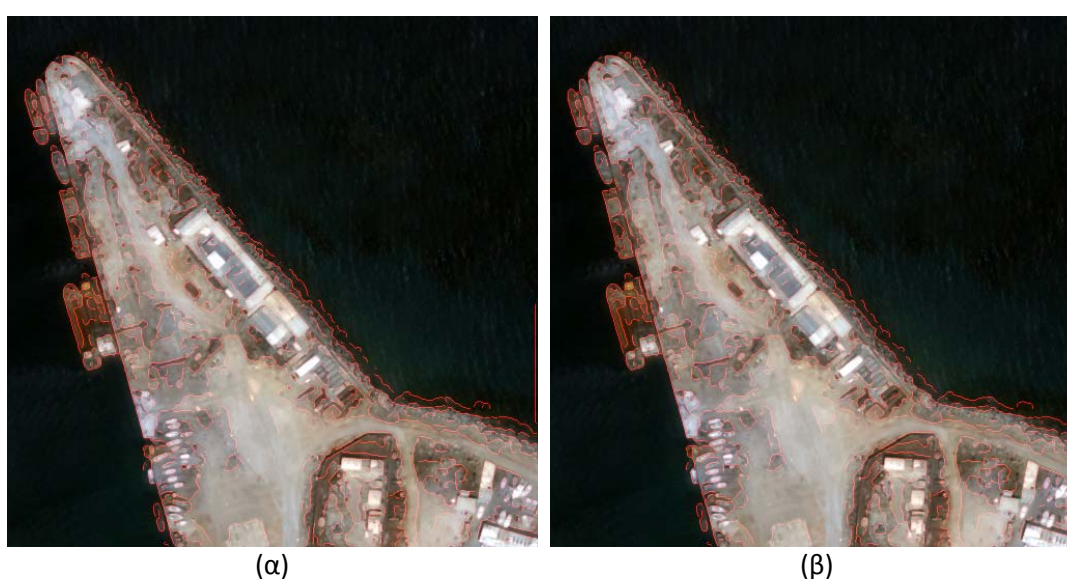
Τέλος, στην εικόνα 3.94 φαίνεται η διαφοροποίηση του τελεστή Canny σε σχέση με το μορφολογικό Laplace, όπως αυτός υλοποιήθηκε. Η ανίχνευση των ακμών πραγματοποιήθηκε στη φιλτραρισμένη, έπειτα από 11 επαναλήψεις ML, εικόνα. Οι παρατηρήσεις για τους δύο τελεστές είναι οι ίδιες με αυτές που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες εφαρμογές.



Εικόνα 3.94: 4^η Εφαρμογή, ML 11 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.

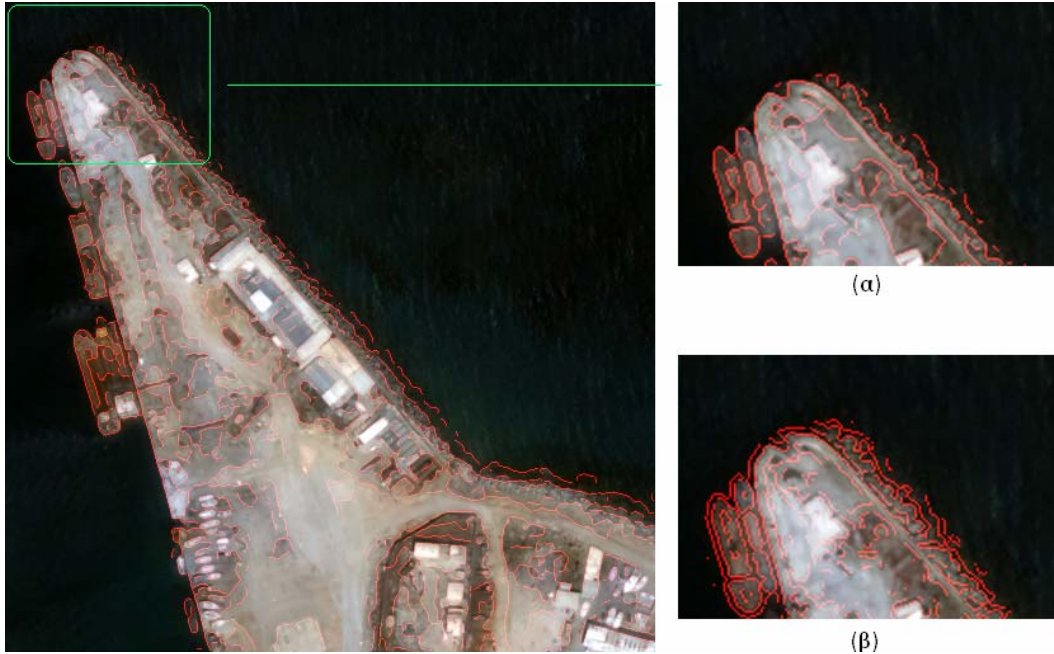
- **Συνδυασμός Ανισοτροπικής Διάχυσης PM και Μορφολογικής Εξομάλυνσης**

Έχει ήδη σημειωθεί ότι στο συνδυασμό της PM ανισοτροπικής διάχυσης με τη μορφολογική εξομάλυνση ενυπάρχουν τα προβλήματα μη σύγκλισης της PM – αν και η ML επιτυγχάνει το στόχο της. Αυτό παρατηρείται και στην εικόνα 3.94 όπου παρατίθενται δύο παραδείγματα εφαρμογής της PM έπειτα από 16 επαναλήψεις (3.95(α)) και της PM 16 επαναλήψεων σε συνδυασμό με μορφολογική εξομάλυνση 5 επαναλήψεων (3.95(β)). Η μορφολογική εξομάλυνση επιτυγχάνει μεγαλύτερη ομαλοποίηση, αν και παρατηρείται μετατόπιση των ακμών.



Εικόνα 3.95: (α) 4^η Εφαρμογή, PM 16 επαναλήψεων, (β) 4^η Εφαρμογή, PM 16 επαναλήψεων και ML 5 επαναλήψεων.

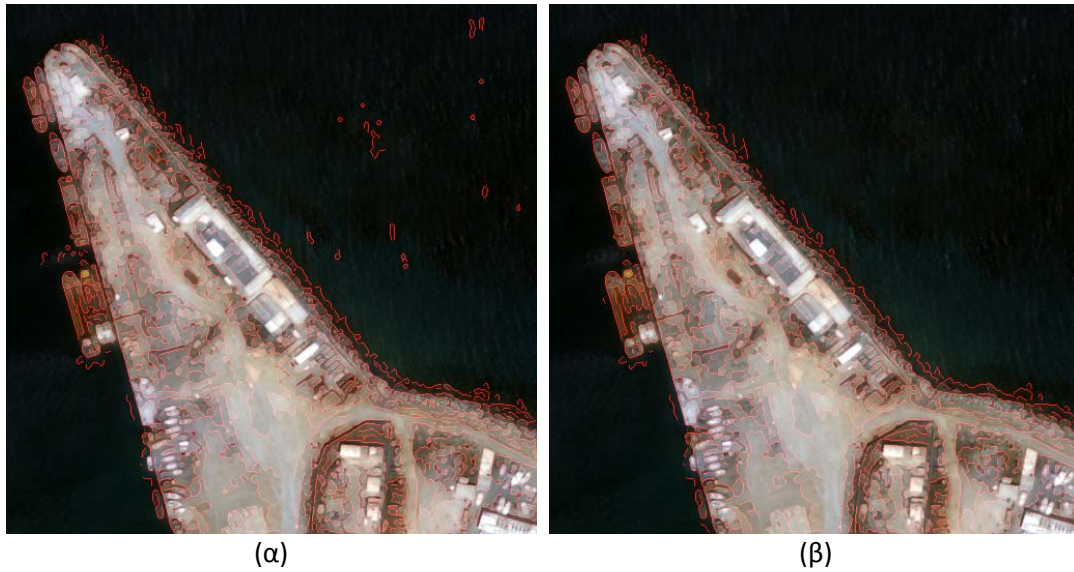
Τέλος, στην εικόνα 3.96 φαίνεται η διαφοροποίηση του τελεστή Canny σε σχέση με το μορφολογικό Laplace, όπως αυτός υλοποιήθηκε. Η ανίχνευση των ακμών πραγματοποιήθηκε στη φιλτραρισμένη, έπειτα από 15 επαναλήψεις PM και 5 επαναλήψεις ML, εικόνα. Οι παρατηρήσεις για τους δύο τελεστές είναι οι ίδιες με αυτές που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες εφαρμογές.



Εικόνα 3.96: 4^η Εφαρμογή, PM 15 επαναλήψεων και ML 5 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.

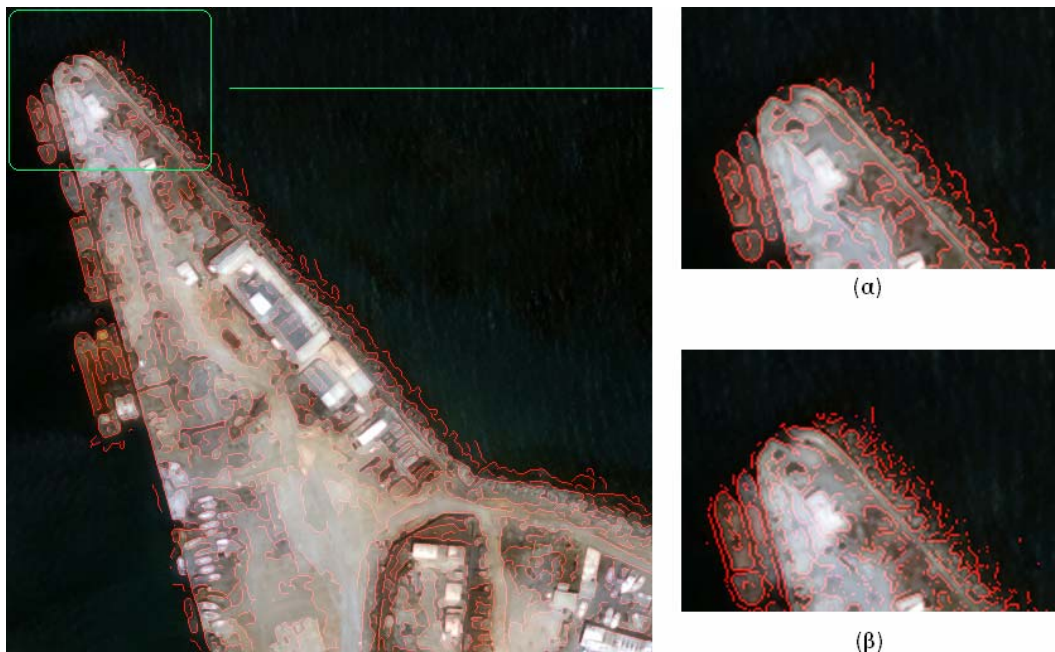
- **Συνδυασμός Ανισοτροπικής Διάχυσης ALM και Μορφολογικής Εξομάλυνσης**

Όπως και στις προηγούμενες εφαρμογές, η μορφολογική εξομάλυνση λειτουργεί επικουρικά στην ενίσχυση των ακμών με την ALM, επιτυγχάνοντας μεγαλύτερη ομαλοποίηση. Ωστόσο, και σε αυτή την εφαρμογή είναι δύσκολο να αποφανθεί κανείς για την καταλληλότητα της συγκεκριμένης μεθοδολογίας έναντι της αποκλειστικής χρήσης της ALM. Η αξιολόγηση και σύγκριση των δύο παρατίθεται στο επόμενο εδάφιο, θέτοντας κριτήρια πληρότητας, ορθότητας και ποιότητας. Έπειτα από πληθώρα συνδυασμών, τα καλύτερα αποτελέσματα δόθηκαν έπειτα από 200 επαναλήψεις ALM και 5 επαναλήψεις ML (εικόνα 3.97).



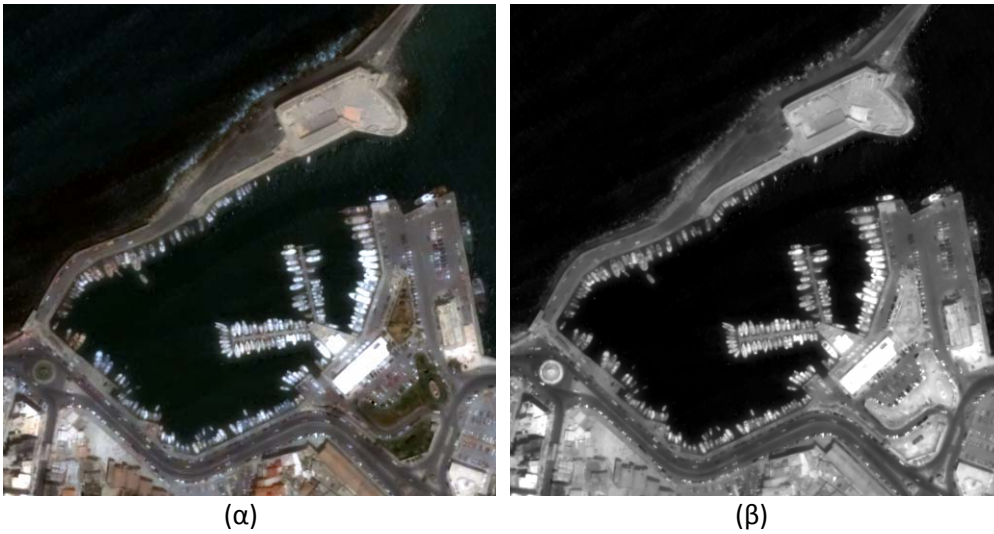
Εικόνα 3.97: (α) 4^η Εφαρμογή, ALM 200 επαναλήψεων, (β) 4^η Εφαρμογή, ALM 200 επαναλήψεων και ML 5 επαναλήψεων.

Τέλος, στην εικόνα 3.98 φαίνεται η διαφοροποίηση του τελεστή Canny σε σχέση με το μορφολογικό Laplace, όπως αυτός υλοποιήθηκε. Η ανίχνευση των ακμών πραγματοποιήθηκε στη φιλτραρισμένη, έπειτα από 100 επαναλήψεις ALM και 5 επαναλήψεις ML, εικόνα. Οι παρατηρήσεις για τους δύο τελεστές είναι οι ίδιες με αυτές που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες εφαρμογές.



Εικόνα 3.98: 4^η Εφαρμογή, ALM 100 επαναλήψεων και ML 5 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.

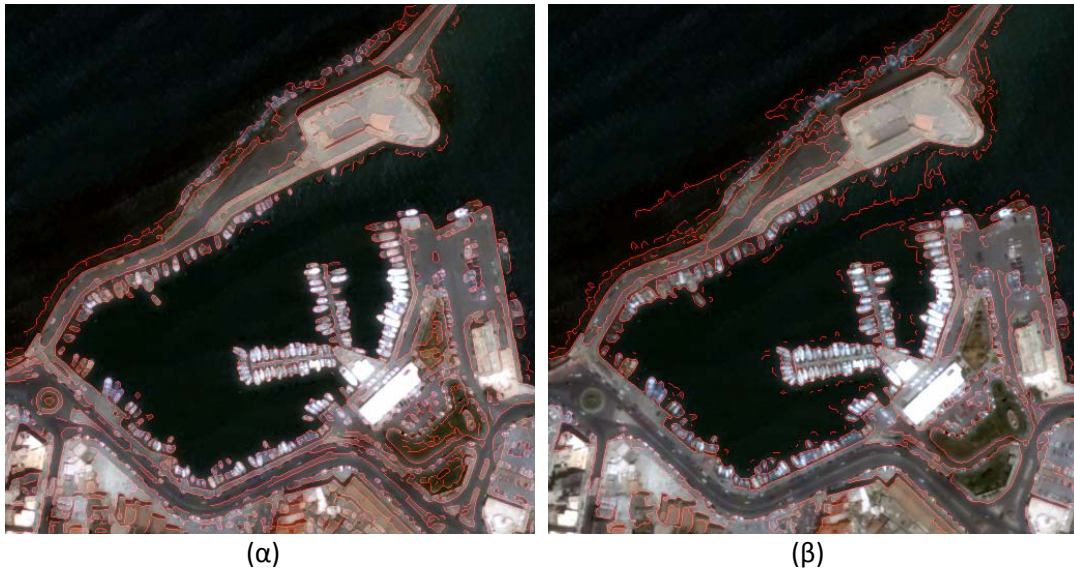
3.2.2.5 5^η Εφαρμογή (ASF, PM, ALM, ML, PM&ML, ALM&ML)



Εικόνα 3.99: (α) 5^η Εφαρμογή, απεικόνιση QUICKBIRD στο φυσικό έγχρωμο σύνθετο, (β) 5^η Εφαρμογή, απεικόνιση QUICKBIRD στο εγγύς υπέρυθρο κανάλι.

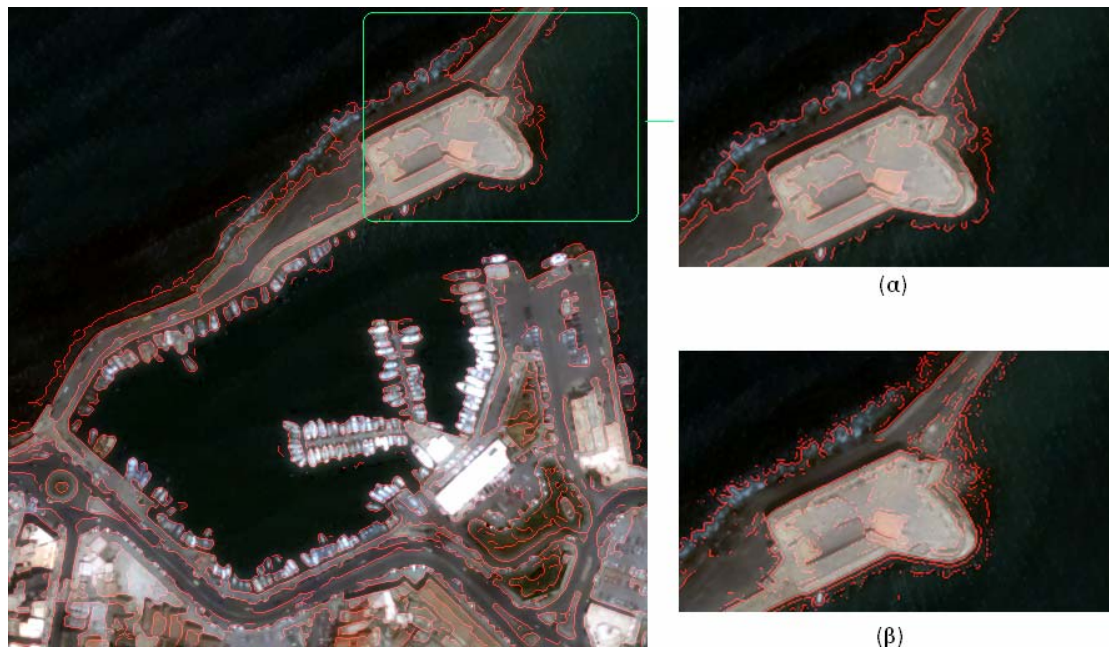
- **Σειριακό Εναλλασσόμενο Φιλτράρισμα, ASF**

Κατά την εφαρμογή σειριακού εναλλασσόμενου φιλτραρίσματος, παρατηρήθηκε ότι τα καλύτερα αποτελέσματα δίνονται έπειτα από 1 επανάληψη, σε σύνολο 21 επαναλήψεων. Τα **προβλήματα** που εντοπίστηκαν για μεγαλύτερο αριθμό επαναλήψεων είναι τα εξής: **(α)** εμφάνιση ακμών στη θαλάσσια περιοχή και **(β)** ανίχνευση βασικών ακμών, με αποτέλεσμα να μην ανιχνεύονται αντικείμενα όπως το λιμάνι (από την πρώτη κιόλας επανάληψη) καθώς και μικρά αντικείμενα (π.χ. αυτοκίνητα, βάρκες, ακόμα και αστικός ιστός), και παρουσιάζονται στις επισυναπτόμενες εικόνες. Η δυσκολία επεξεργασίας της συγκεκριμένης απεικόνισης έγκειται στο γεγονός ότι ως ακτογραμμή δεν θεωρείται το όριο ξηράς – θάλασσας αλλά το όριο του λιμανιού (μέσα από τα καράβια), η ανίχνευση του οποίου σε πολλές περιπτώσεις δεν είναι δυνατή ή ακριβής, γιατί αντιμετωπίζεται ως αντικείμενο μικρότερης κλίμακας. Στο επόμενο εδάφιο αναλύεται ο τρόπος που επηρεάζει τις τεχνικές επεξεργασίας και μετα-επεξεργασίας, εφόσον αυτό έρχεται σε αντίθεση με την υπόλοιπη απεικόνιση όπου τα βράχια αποτελούν το όριο της ακτογραμμής. Σημειώνεται ότι η εφαρμογή των τεχνικών προ-επεξεργασίας και η ανίχνευση των ακμών με τον τελεστή Canny έγιναν στο εγγύς υπέρυθρο κανάλι, λόγω των φασματικών ιδιοτήτων του νερού, ωστόσο τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο φυσικό έγχρωμο σύνθετο με κόκκινο χρώμα.



Εικόνα 3.100: (α) 5^η Εφαρμογή, ASF 1 επανάληψης, (β) 5^η Εφαρμογή, ASF 21 επαναλήψεων.

Τέλος, στην εικόνα 3.101 φαίνεται η διαφοροποίηση του τελεστή Canny σε σχέση με το μορφολογικό Laplace, όπως αυτός υλοποιήθηκε. Η ανίχνευση των ακμών πραγματοποιήθηκε στη φιλτραρισμένη, έπειτα από 4 επαναλήψεις ASF, εικόνα. Οι παρατηρήσεις για τους δύο τελεστές είναι οι ίδιες με αυτές που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες εφαρμογές.



Εικόνα 3.101: 5^η Εφαρμογή, ASF 4 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.

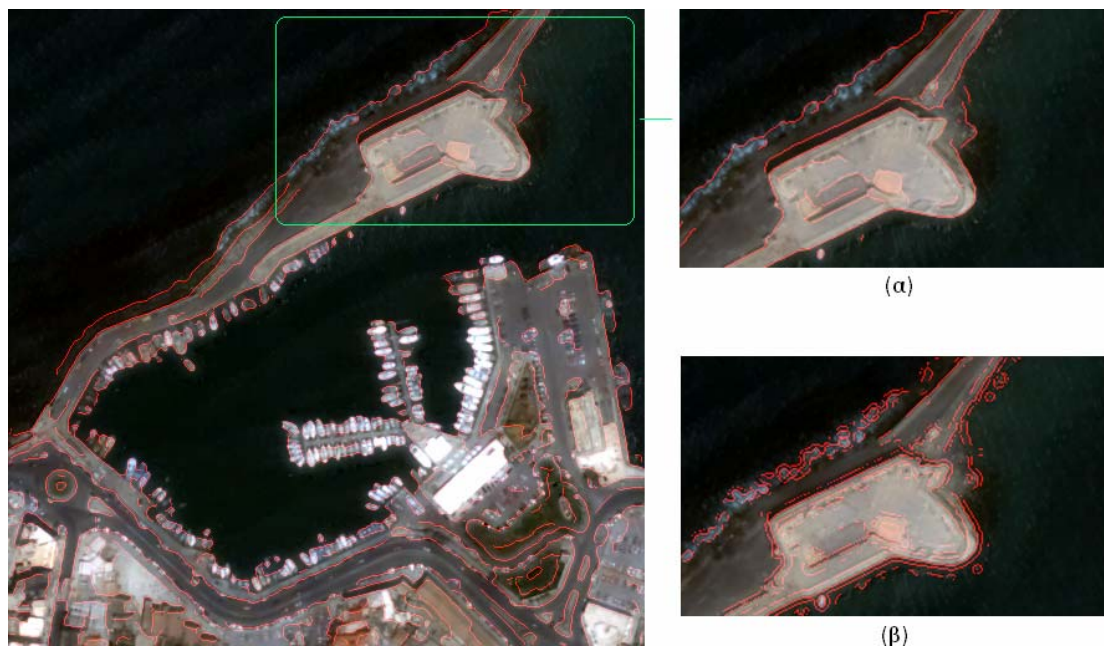
- **Ανισοτροπική Διάχυση PM**

Κατά την εφαρμογή ανισοτροπικής διάχυσης PM παρατηρήθηκε ότι με την αύξηση του αριθμού των επαναλήψεων – σε σύνολο 26 επαναλήψεων – διατηρούνται μόνο οι βασικές ακμές της εικόνας, με αποτέλεσμα να απαλείφονται μικρά αντικείμενα (π.χ. βράχια σε αβαθή νερά). Αυτό είναι και το **μεγαλύτερο μειονέκτημα** της τεχνικής, καθιστώντας την ακατάλληλη. Παράλληλα, παρατηρήθηκε μετατόπιση των περιγραμμάτων των αντικειμένων. Τα συμπεράσματα αυτά φαίνονται στις επισυναπτόμενες εικόνες.



Εικόνα 3.102: (α) 5^η Εφαρμογή, PM 1 επανάληψης, (β) 5^η Εφαρμογή, PM 26 επαναλήψεων.
Παράδειγμα μη σύγκλισης αλγορίθμου.

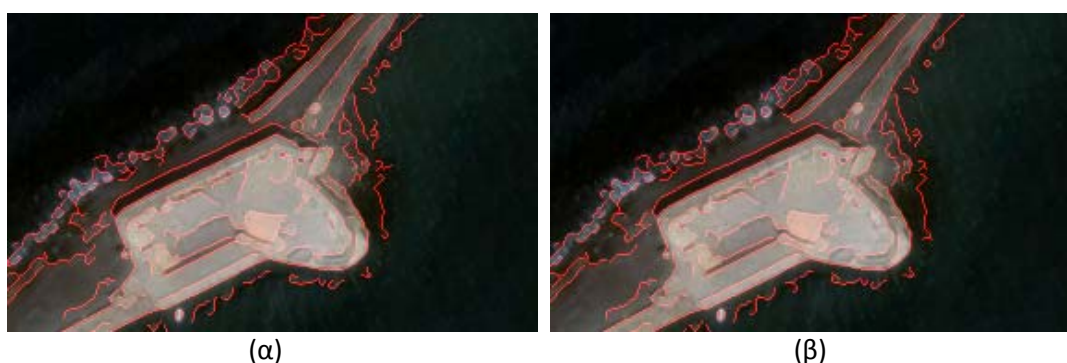
Τέλος, στην εικόνα 3.103 φαίνεται η διαφοροποίηση του τελεστή Canny σε σχέση με το μορφολογικό Laplace, όπως αυτός υλοποιήθηκε. Η ανίχνευση των ακμών πραγματοποιήθηκε στη φιλτραρισμένη, έπειτα από 11 επαναλήψεις PM, εικόνα. Οι παρατηρήσεις για τους δύο τελεστές είναι οι ίδιες με αυτές που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες εφαρμογές.

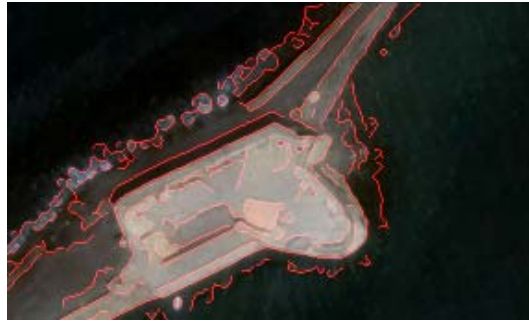


Εικόνα 3.103: 5^η Εφαρμογή, ΡΜ 11 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.

- **Ανισοτροπική Διάχυση ALM**

Όπως τονίστηκε και στις προηγούμενες εφαρμογές, εν αντιθέσει με την ΡΜ ανισοτροπική διάχυση, κατά την εφαρμογή της ALM παρατηρήθηκε ότι ακόμα και σε έντονο φιλτράρισμα ο αλγόριθμος διατηρεί πιστά τις μεταβολές των τιμών φωτεινότητας της αρχικής εικόνας, κι επομένως τη γεωμετρία των αντικειμένων. Αυτό φαίνεται χαρακτηριστικά στην εικόνα 3.104, όπου παρατίθεται το μαρκαρισμένο τμήμα της εικόνας 3.102 έπειτα από εφαρμογή του αλγορίθμου για 1, 100 και 200 επαναλήψεις.





(γ)

Εικόνα 3.104: 5^η Εφαρμογή, ανιστροπική διάχυση ALM (α) 1 επανάληψης, (β) 100 επαναλήψεων, (γ) 200 επαναλήψεων, σε τμήμα της αρχικής εικόνας. Παράδειγμα σύγκλισης του αλγορίθμου.

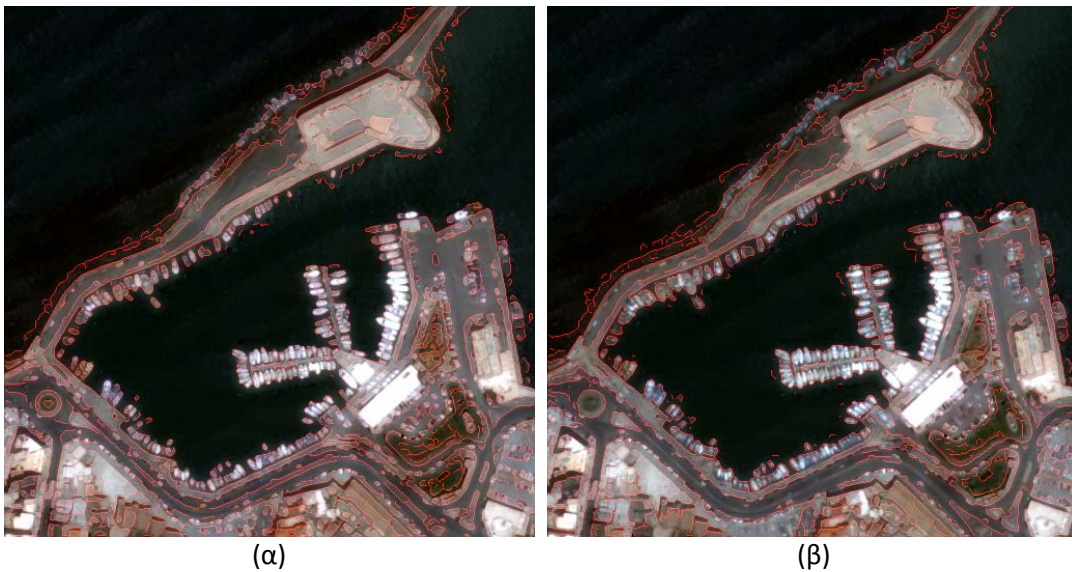
Κατά την εφαρμογή της ALM ανιστροπικής διάχυσης παρατηρήθηκε ότι τα καλύτερα αποτελέσματα δίνονται έπειτα από 200 επαναλήψεις. Σε αντίθεση με τις υπόλοιπες περιπτώσεις – και αυτές που δεν έχουν παρατεθεί ακόμα – η 5^η εφαρμογή είναι η μοναδική όπου ο μορφολογικός Laplace τελεστής έχει καλά αποτελέσματα, κυρίως όσον αφορά στην ανίχνευση του λιμένος, που είναι και το ζητούμενο. Ωστόσο, τα αρνητικά του τελεστή – όπως αυτός έχει υλοποιηθεί – ως προς την ασυνέχεια και το σωστό εντοπισμό των ακμών εμφανίζονται και σε αυτή την περίπτωση (π.χ. βράχια), αν και είναι δύσκολο να αποφανθεί κανείς για την καταλληλότητα του συγκεκριμένου τελεστή έναντι του Canny. Η αξιολόγηση και σύγκριση των δύο παρατίθεται στο επόμενο εδάφιο, θέτοντας κριτήρια πληρότητας, ορθότητας και ποιότητας. Έπειτα από πληθώρα συνδυασμών, τα καλύτερα αποτελέσματα δόθηκαν έπειτα από 200 επαναλήψεις (εικόνα 3.105).



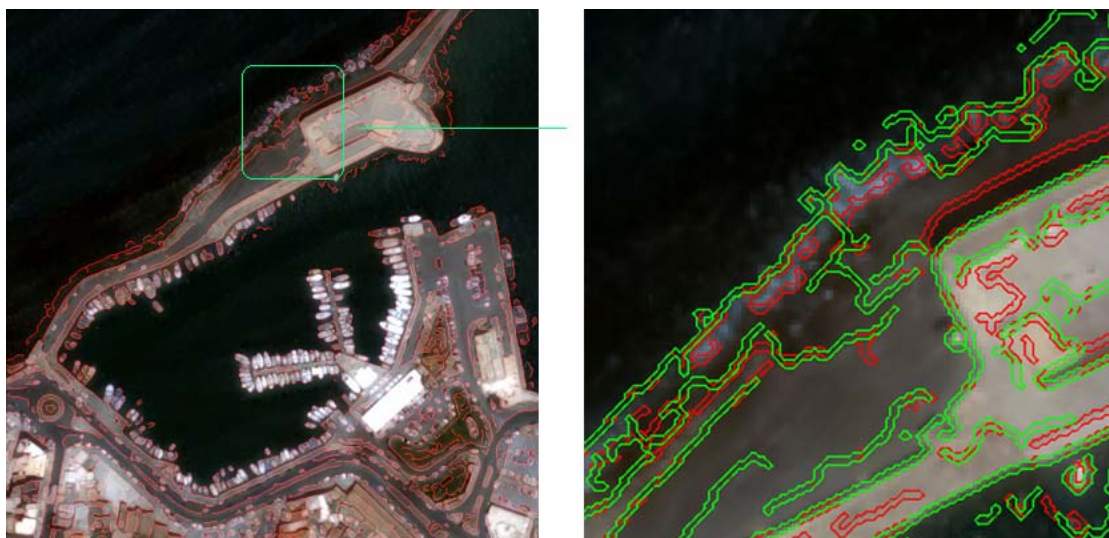
Εικόνα 3.105: 5^η Εφαρμογή, ανιστροπική διάχυση ALM (α) 1 επανάληψης, (β) 200 επαναλήψεων με το μορφολογικό Laplace τελεστή, σε τμήμα της αρχικής εικόνας. Παράδειγμα σύγκλισης του αλγορίθμου.

- **Μορφολογική Εξομάλυνση, ML**

Κατά την εφαρμογή μορφολογικής εξομάλυνσης, παρατηρήθηκε ότι τα καλύτερα αποτελέσματα δίνονται έπειτα από 1 επανάληψη, σε σύνολο 21 επαναλήψεων. Τα **προβλήματα** που εντοπίστηκαν για μεγαλύτερο αριθμό επαναλήψεων είναι τα εξής: **(α)** μετατόπιση περιγραμμάτων (εικόνα 3.107), **(β)** εμφάνιση ακμών στη θάλασσα περιοχή και **(γ)** εξάρτηση της μεθόδου από τους γκαουσιανούς σηματοδευτές, με αποτέλεσμα να μην ανιχνεύονται αντικείμενα όπως ο λιμένας (εικόνα 3.106), και παρουσιάζονται στις επισυναπτόμενες εικόνες. Στην εικόνα 3.107 σημειώνεται η μετατόπιση των περιγραμμάτων τμήματος της αρχικής εικόνας έπειτα από μορφολογική εξομάλυνση 1 και 11 επαναλήψεων (κόκκινο και πράσινο χρώμα, αντίστοιχα).

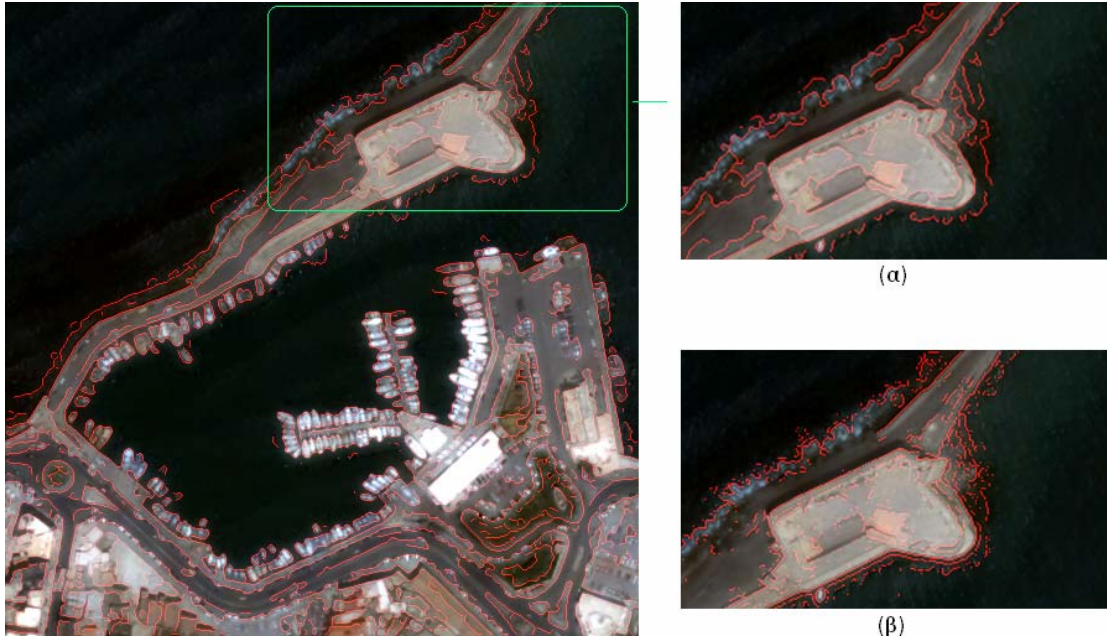


Εικόνα 3.106: 5^η Εφαρμογή, ML (α) 1 επανάληψης, (β) 21 επαναλήψεων.



Εικόνα 3.107: 5^η Εφαρμογή, σύγκριση ανίχνευσης ακμών με τον τελεστή Canny έπειτα από φιλτράρισμα 1 και 11 επαναλήψεων (κόκκινο και πράσινο χρώμα, αντίστοιχα). Παρατηρείται μετατόπιση των περιγραμμάτων.

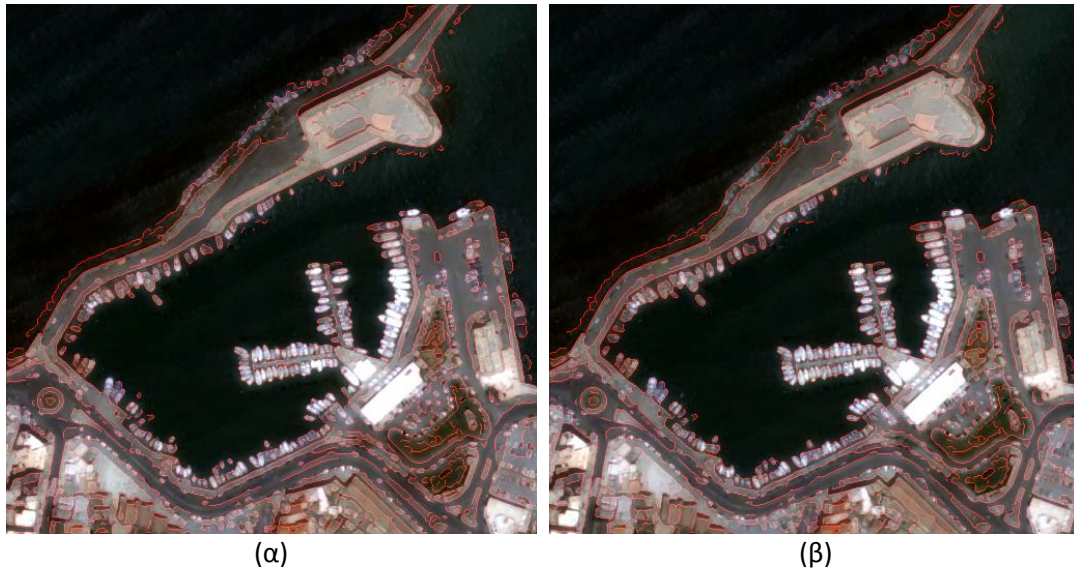
Τέλος, στην εικόνα 3.108 φαίνεται η διαφοροποίηση του τελεστή Canny σε σχέση με το μορφολογικό Laplace, όπως αυτός υλοποιήθηκε. Η ανίχνευση των ακμών πραγματοποιήθηκε στη φιλτραρισμένη, έπειτα από 11 επαναλήψεις ML, εικόνα. Οι παρατηρήσεις για τους δύο τελεστές είναι οι ίδιες με αυτές που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες εφαρμογές.



Εικόνα 3.108: 5^η Εφαρμογή, ML 11 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.

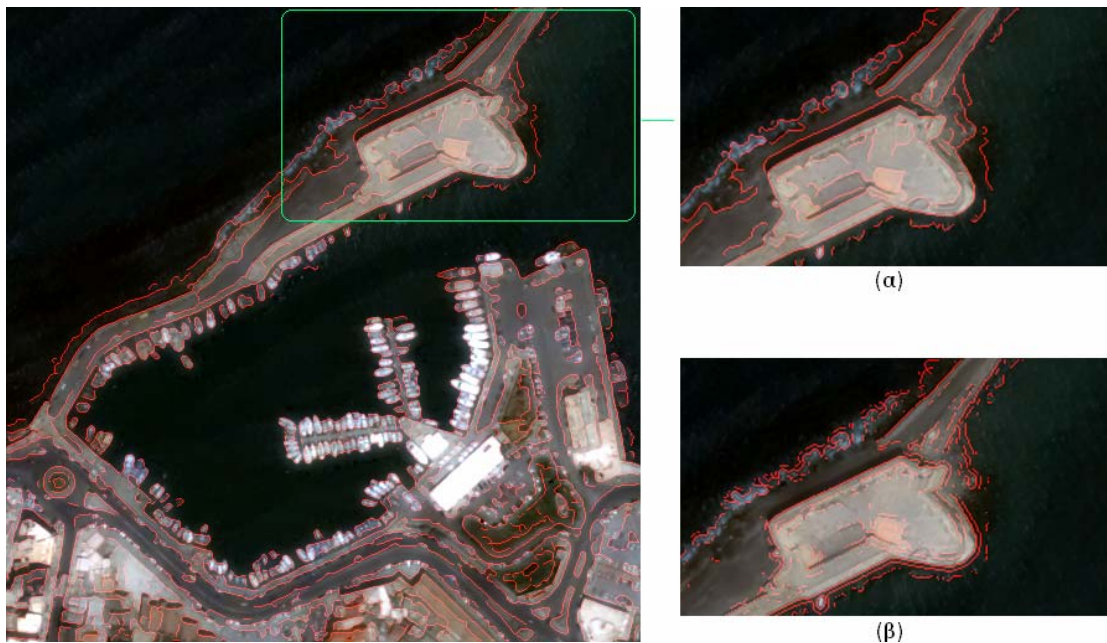
- **Συνδυασμός Ανισοτροπικής Διάχυσης PM και Μορφολογικής Εξομάλυνσης**

Έχει ήδη σημειωθεί ότι στο συνδυασμό της PM ανισοτροπικής διάχυσης με τη μορφολογική εξομάλυνση ενυπάρχουν τα προβλήματα μη σύγκλισης της PM. Επιπλέον, αν και η μορφολογική εξομάλυνση επιτυγχάνει μεγαλύτερη ομαλοποίηση, η εξάρτησή της από τους γκαουσιανούς σημαδευτές, έχει ως αποτέλεσμα να μην ανιχνεύονται αντικείμενα όπως ο λιμένας. Οι παρατηρήσεις αυτές φαίνονται στην εικόνα 3.109 όπου παρατίθενται δύο παραδείγματα εφαρμογής της PM έπειτα από 1 επανάληψη (3.109(α)) και της PM 1 επανάληψης σε συνδυασμό με μορφολογική εξομάλυνση 5 επαναλήψεων (3.109(β)).



Εικόνα 3.109: (α) 5^η Εφαρμογή, PM 1 επανάληψης, (β) 5^η Εφαρμογή, PM 1 επανάληψης και ML 5 επαναλήψεων.

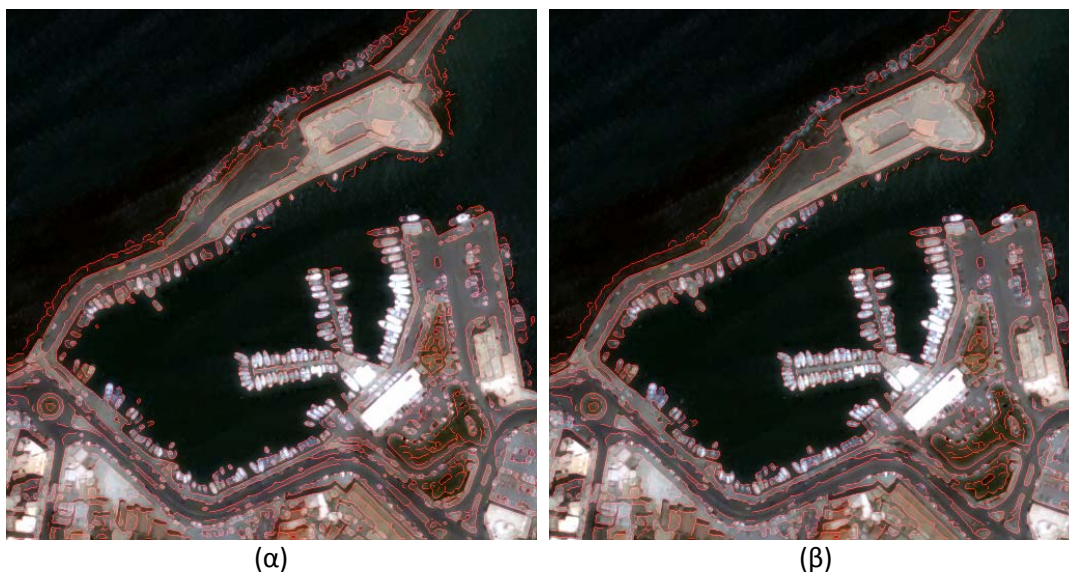
Τέλος, στην εικόνα 3.110 φαίνεται η διαφοροποίηση του τελεστή Canny σε σχέση με το μορφολογικό Laplace, όπως αυτός υλοποιήθηκε. Η ανίχνευση των ακμών πραγματοποιήθηκε στη φιλτραρισμένη, έπειτα από 5 επαναλήψεις PM και 5 επαναλήψεις ML, εικόνα. Οι παρατηρήσεις για τους δύο τελεστές είναι οι ίδιες με αυτές που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες εφαρμογές.



Εικόνα 3.110: 5^η Εφαρμογή, PM 5 επαναλήψεων και ML 5 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.

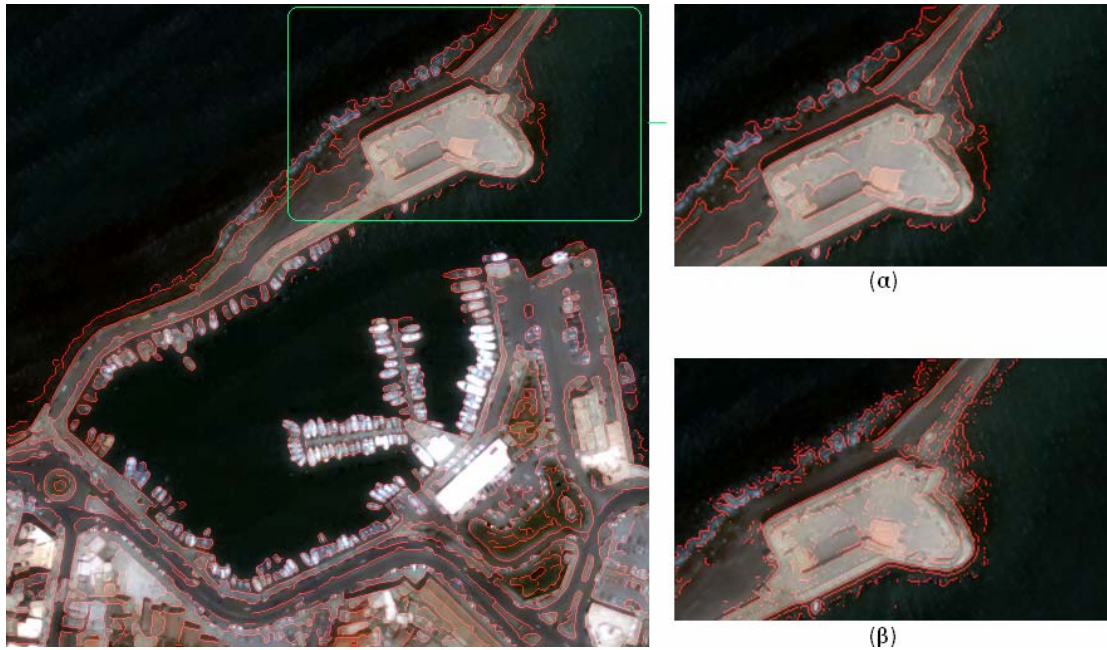
- **Συνδυασμός Ανισοτροπικής Διάχυσης ALM και Μορφολογικής Εξομάλυνσης**

Όπως και στις προηγούμενες εφαρμογές, η μορφολογική εξομάλυνση λειτουργεί επικουρικά στην ενίσχυση των ακμών με την ALM, επιτυγχάνοντας μεγαλύτερη ομαλοποίηση. Ωστόσο, η εξάρτησή της από τους γκαουσιανούς σηματοδευτές – όπως τονίστηκε και προηγουμένως – έχει ως αποτέλεσμα να μην ανιχνεύονται αντικείμενα όπως ο λιμένας, καθιστώντας ακατάλληλη τη μεθοδολογία (εικόνα 3.111).



Εικόνα 3.111: (α) 5^η Εφαρμογή, ALM 5 επαναλήψεων, (β) 5^η Εφαρμογή, ALM 5 επαναλήψεων και ML 5 επαναλήψεων.

Τέλος, στην εικόνα 3.112 φαίνεται η διαφοροποίηση του τελεστή Canny σε σχέση με το μορφολογικό Laplace, όπως αυτός υλοποιήθηκε. Η ανίχνευση των ακμών πραγματοποιήθηκε στη φιλτραρισμένη, έπειτα από 5 επαναλήψεις ALM και 5 επαναλήψεις ML, εικόνα. Οι παρατηρήσεις για τους δύο τελεστές είναι οι ίδιες με αυτές που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες εφαρμογές.



Εικόνα 3.112: 5^η Εφαρμογή, ALM 5 επαναλήψεων και ML 5 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.

3.2.2.6 6^η Εφαρμογή (ASF, PM, ALM, ML, PM&ML, ALM&ML)

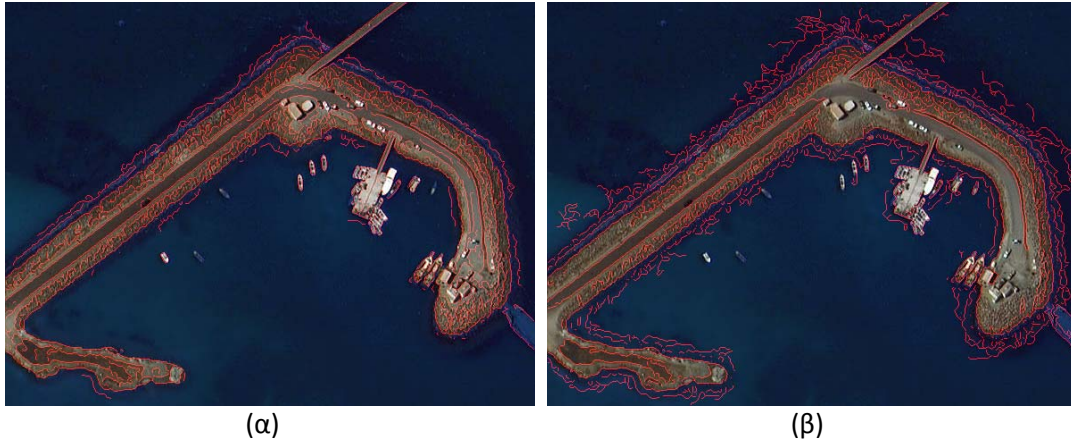


Εικόνα 3.113: (α) 6^η Εφαρμογή, απεικόνιση WORLDVIEW-2 στο φυσικό έγχρωμο σύνθετο, (β) 6^η Εφαρμογή, απεικόνιση WORLDVIEW-2 στο κόκκινο κανάλι.

- **Σειριακό Εναλλασσόμενο Φιλτράρισμα, ASF**

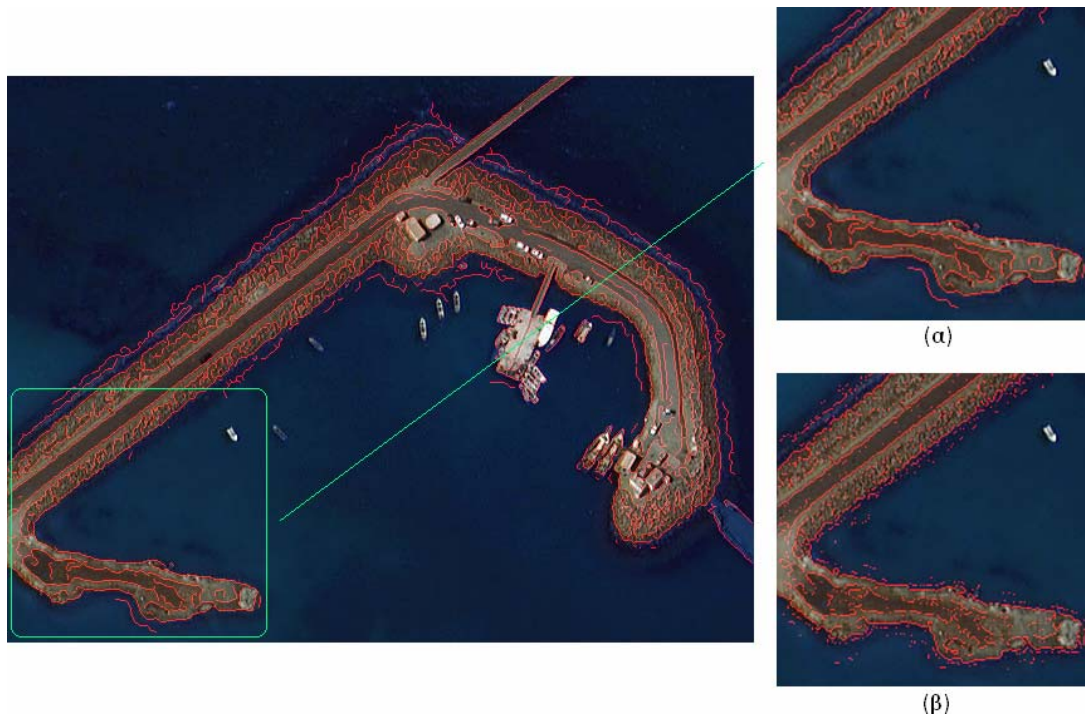
Κατά την εφαρμογή σειριακού εναλλασσόμενου φιλτραρίσματος, παρατηρήθηκε ότι τα καλύτερα αποτελέσματα δίνονται έπειτα από 3 επαναλήψεις, σε σύνολο 26 επαναλήψεων. Τα **προβλήματα** που εντοπίστηκαν για μεγαλύτερο αριθμό επαναλήψεων είναι τα εξής: **(α)** εμφάνιση ακμών στη θαλάσσια περιοχή και **(β)** ανίχνευση βασικών ακμών, με αποτέλεσμα να μην ανιχνεύονται μικρά αντικείμενα

όπως αυτοκίνητα, βάρκες, ακόμα και αστικός ιστός, και παρουσιάζονται στις επισυναπτόμενες εικόνες. Σημειώνεται ότι η εφαρμογή των τεχνικών προεπεξεργασίας και η ανίχνευση των ακμών με τον τελεστή Canny έγιναν στο κόκκινο κανάλι, λόγω των φασματικών ιδιοτήτων του νερού, ωστόσο τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο φυσικό έγχρωμο σύνθετο με κόκκινο χρώμα.



Εικόνα 3.114: (α) 6^η Εφαρμογή, ASF 3 επαναλήψεων, (β) 6^η Εφαρμογή, ASF 26 επαναλήψεων.

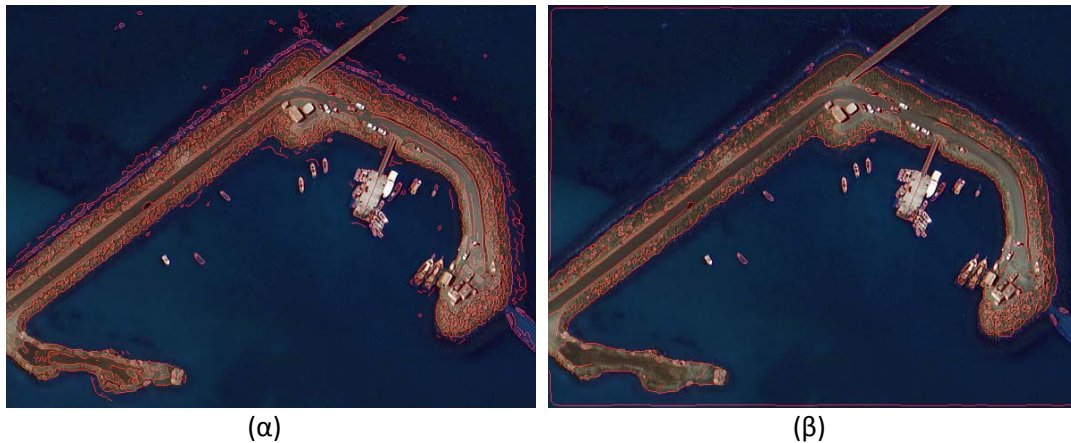
Τέλος, στην εικόνα 3.115 φαίνεται η διαφοροποίηση του τελεστή Canny σε σχέση με το μορφολογικό Laplace, όπως αυτός υλοποιήθηκε. Η ανίχνευση των ακμών πραγματοποιήθηκε στη φιλτραρισμένη, έπειτα από 4 επαναλήψεις ASF, εικόνα. Οι παρατηρήσεις για τους δύο τελεστές είναι οι ίδιες με αυτές που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες εφαρμογές.



Εικόνα 3.115: 6^η Εφαρμογή, ASF 4 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.

• **Ανισοτροπική Διάχυση PM**

Κατά την εφαρμογή ανισοτροπικής διάχυσης PM παρατηρήθηκε ότι με την αύξηση του αριθμού των επαναλήψεων – σε σύνολο 100 επαναλήψεων – διατηρούνται μόνο οι βασικές ακμές της εικόνας, το οποίο παρατηρείται και στις επισυναπτόμενες εικόνες.



Εικόνα 3.116: (α) 6^η Εφαρμογή, PM 1 επανάληψης, (β) 6^η Εφαρμογή, PM 100 επαναλήψεων. Παράδειγμα μη σύγκλισης αλγορίθμου.

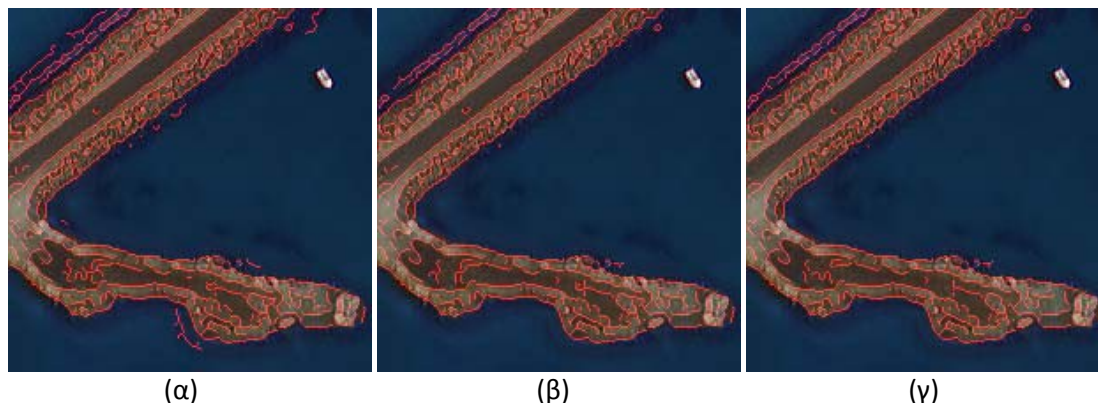
Τέλος, στην εικόνα 3.117 φαίνεται η διαφοροποίηση του τελεστή Canny σε σχέση με το μορφολογικό Laplace, όπως αυτός υλοποιήθηκε. Η ανίχνευση των ακμών πραγματοποιήθηκε στη φιλτραρισμένη, έπειτα από 11 επαναλήψεις PM, εικόνα. Οι παρατηρήσεις για τους δύο τελεστές είναι οι ίδιες με αυτές που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες εφαρμογές.



Εικόνα 3.117: 6^η Εφαρμογή, PM 11 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.

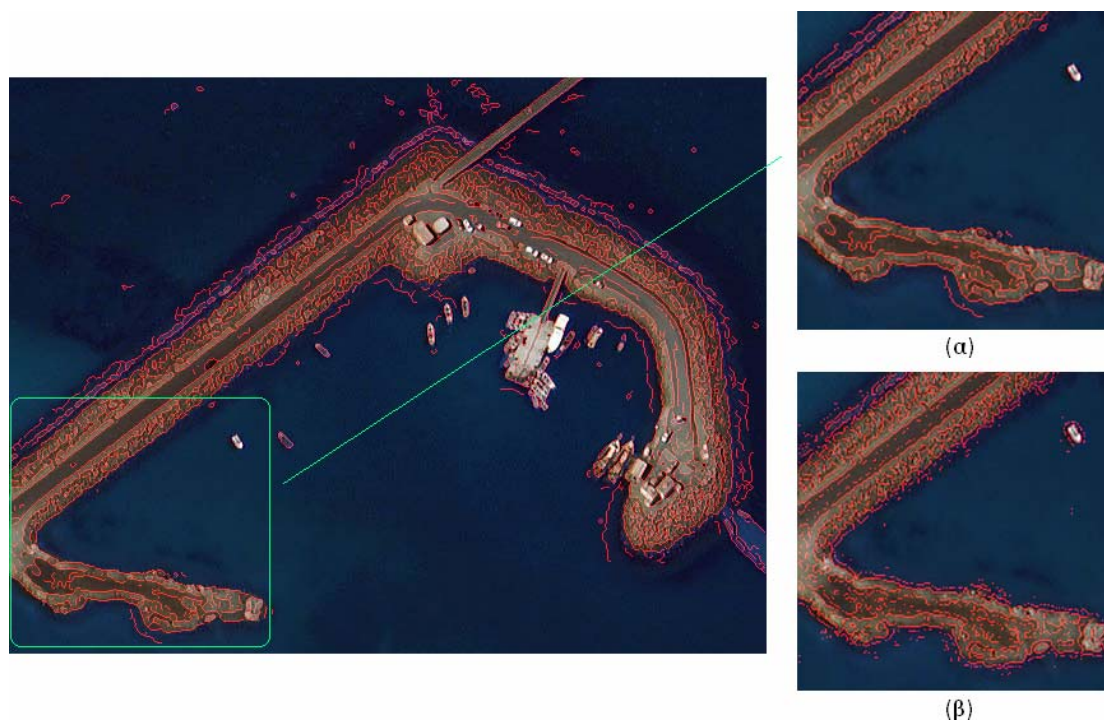
- **Ανισοτροπική Διάχυση ALM**

Όπως τονίστηκε και στις προηγούμενες εφαρμογές, εν αντιθέσει με την PM ανισοτροπική διάχυση, κατά την εφαρμογή της ALM παρατηρήθηκε ότι ακόμα και σε έντονο φιλτράρισμα ο αλγόριθμος διατηρεί πιστά τις μεταβολές των τιμών φωτεινότητας της αρχικής εικόνας, κι επομένως τη γεωμετρία των αντικειμένων. Αυτό φαίνεται χαρακτηριστικά στην εικόνα 3.118, όπου παρατίθεται το μαρκαρισμένο τμήμα της εικόνας 3.117 έπειτα από εφαρμογή του αλγορίθμου για 1, 100 και 300 επαναλήψεις.



Εικόνα 3.118: 6^η Εφαρμογή, ανισοτροπική διάχυση ALM (α) 1 επανάληψης, (β) 100 επαναλήψεων, (γ) 300 επαναλήψεων. Παράδειγμα σύγκλισης του αλγορίθμου.

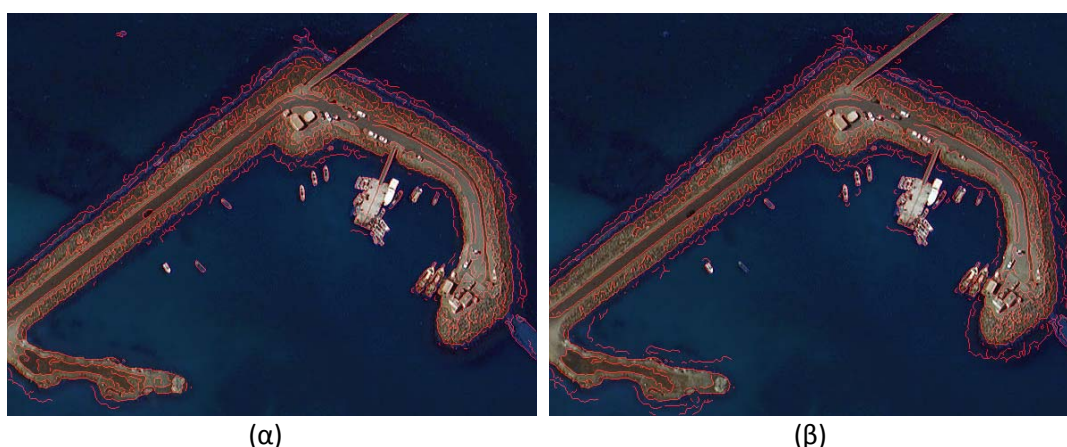
Κατά την εφαρμογή της ALM ανισοτροπικής διάχυσης παρατηρήθηκε ότι τα καλύτερα αποτελέσματα δίνονται έπειτα από 300 επαναλήψεις. Τέλος, στην εικόνα 3.119 φαίνεται η διαφοροποίηση του τελεστή Canny σε σχέση με το μορφολογικό Laplace, όπως αυτός υλοποιήθηκε. Η ανίχνευση των ακμών πραγματοποιήθηκε στη φιλτραρισμένη, έπειτα από 11 επαναλήψεις ALM, εικόνα. Οι παρατηρήσεις για τους δύο τελεστές είναι οι ίδιες με αυτές που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες εφαρμογές.



Εικόνα 3.119: 6^η Εφαρμογή, ALM 11 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.

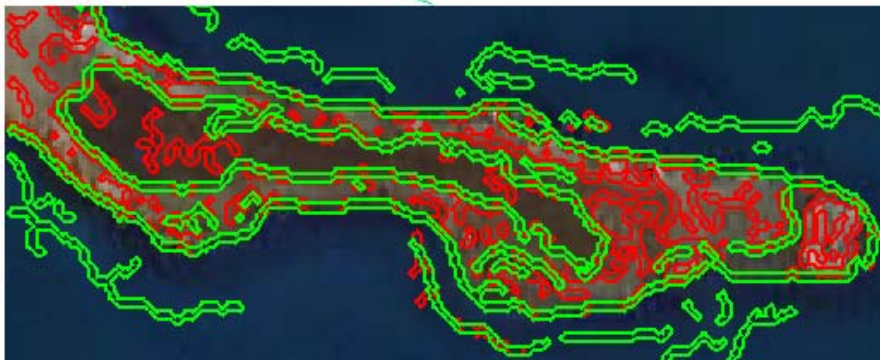
- **Μορφολογική Εξομάλυνση, ML**

Κατά την εφαρμογή μορφολογικής εξομάλυνσης, παρατηρήθηκε ότι τα καλύτερα αποτελέσματα δίνονται έπειτα από 6 επαναλήψεις, σε σύνολο 21 επαναλήψεων. Τα **προβλήματα** που εντοπίστηκαν για μεγαλύτερο αριθμό επαναλήψεων είναι τα εξής: **(α)** μικρή μετατόπιση περιγραμμάτων, **(β)** εμφάνιση λίγων ακμών στη θαλάσσια περιοχή και **(γ)** εξάρτηση της μεθόδου από τους γκαουσιανούς σηματοδευτές, και παρουσιάζονται στις επισυναπτόμενες εικόνες.



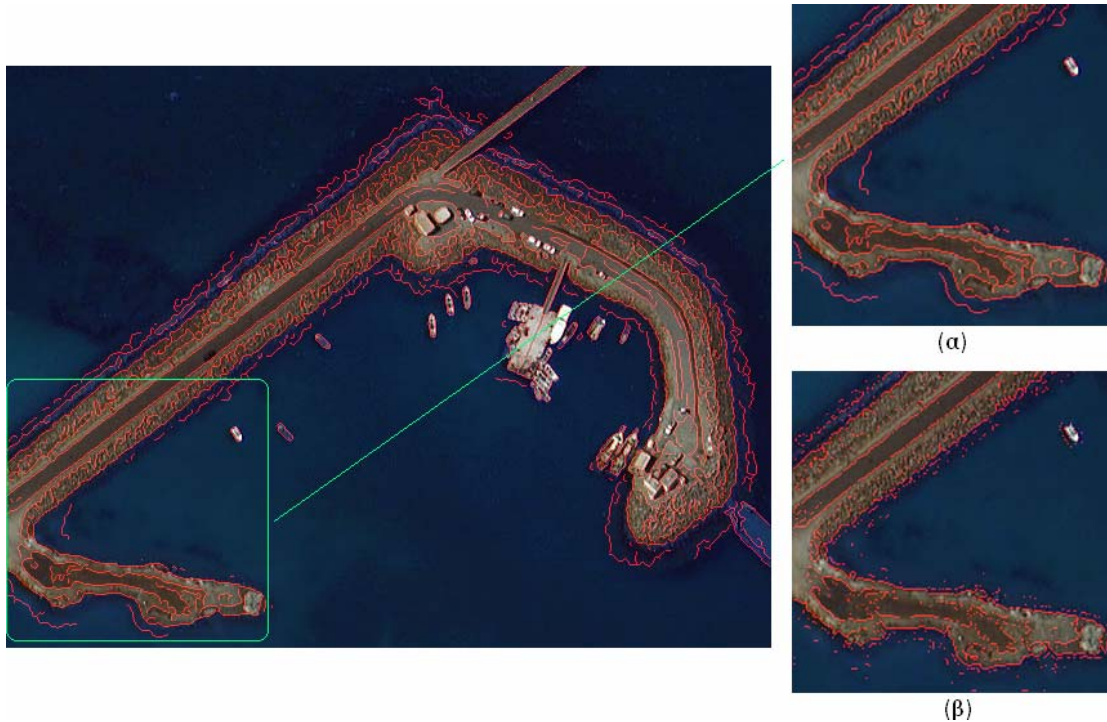
Εικόνα 3.120: 6^η Εφαρμογή, ML (α) 6 επαναλήψεων, (β) 21 επαναλήψεων.

Στην εικόνα 3.121 σημειώνεται η μικρή μετατόπιση των περιγραμμάτων τμήματος της αρχικής εικόνας έπειτα από μορφολογική εξομάλυνση 1 και 21 επαναλήψεων (κόκκινο και πράσινο χρώμα, αντίστοιχα). Όπως και στην εικόνα 3.120, είναι σαφής η εξάρτηση της μεθόδου από τους γκαουσιανούς σηματοδευτές, με αποτέλεσμα τη διατήρηση κυρίως των βασικών ακμών.



Εικόνα 3.121: 6^η Εφαρμογή, σύγκριση ανίχνευσης ακμών με τον τελεστή Canny έπειτα από φιλτράρισμα 1 και 21 επαναλήψεων (κόκκινο και πράσινο χρώμα, αντίστοιχα). Παρατηρείται μετατόπιση των περιγραμμάτων.

Τέλος, στην εικόνα 3.122 φαίνεται η διαφοροποίηση του τελεστή Canny σε σχέση με το μορφολογικό Laplace, όπως αυτός υλοποιήθηκε. Η ανίχνευση των ακμών πραγματοποιήθηκε στη φιλτραρισμένη, έπειτα από 11 επαναλήψεις ML, εικόνα. Οι παρατηρήσεις για τους δύο τελεστές είναι οι ίδιες με αυτές που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες εφαρμογές.



Εικόνα 3.122: 6^η Εφαρμογή, ML 11 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.

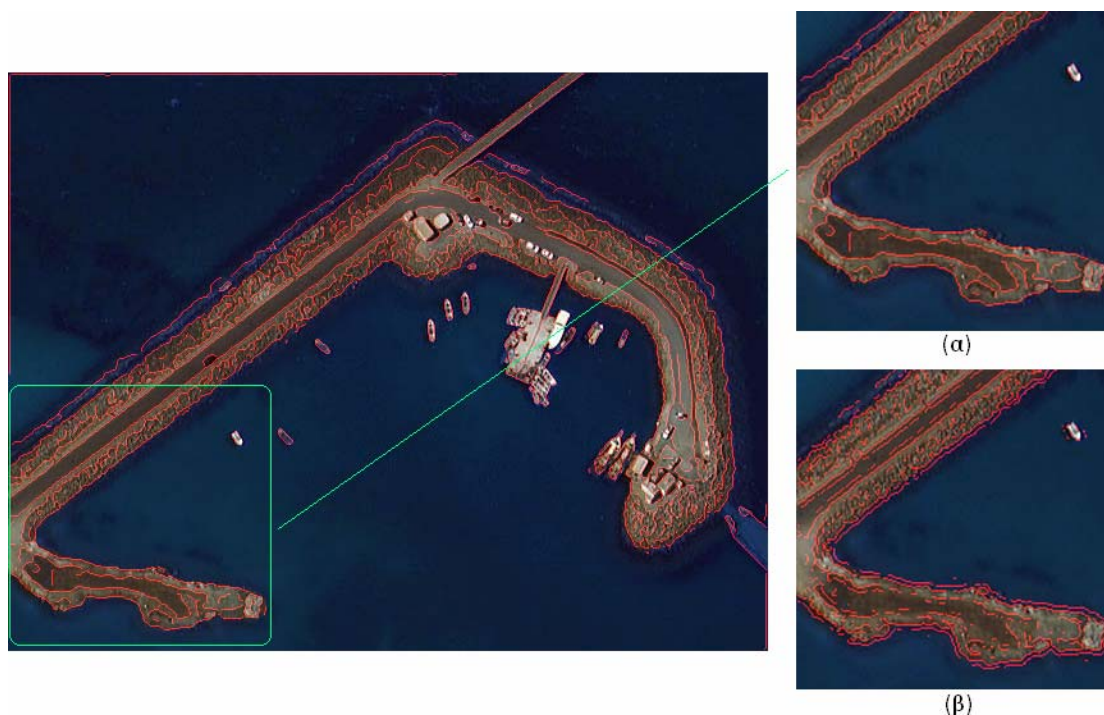
• **Συνδυασμός Ανισοτροπικής Διάχυσης PM και Μορφολογικής Εξομάλυνσης**

Έχει ήδη σημειωθεί ότι στο συνδυασμό της PM ανισοτροπικής διάχυσης με τη μορφολογική εξομάλυνση ενυπάρχουν τα προβλήματα μη σύγκλισης της PM. Επιπλέον, αν και η μορφολογική εξομάλυνση επιτυγχάνει μεγαλύτερη ομαλοποίηση, η εξάρτησή της από τους γκαουσιανούς σηματοδευτές, έχει ως αποτέλεσμα να μην ανιχνεύονται όλες οι ακμές. Οι παρατηρήσεις αυτές φαίνονται στην εικόνα 3.123 όπου παρατίθενται δύο παραδείγματα εφαρμογής της PM έπειτα από 30 επαναλήψεις (3.123(α)) και της PM 30 επαναλήψεων σε συνδυασμό με μορφολογική εξομάλυνση 5 επαναλήψεων (3.123(β)).



Εικόνα 3.123: (α) 6^η Εφαρμογή, PM 30 επαναλήψεων, (β) 6^η Εφαρμογή, PM 30 επαναλήψεων και ML 5 επαναλήψεων.

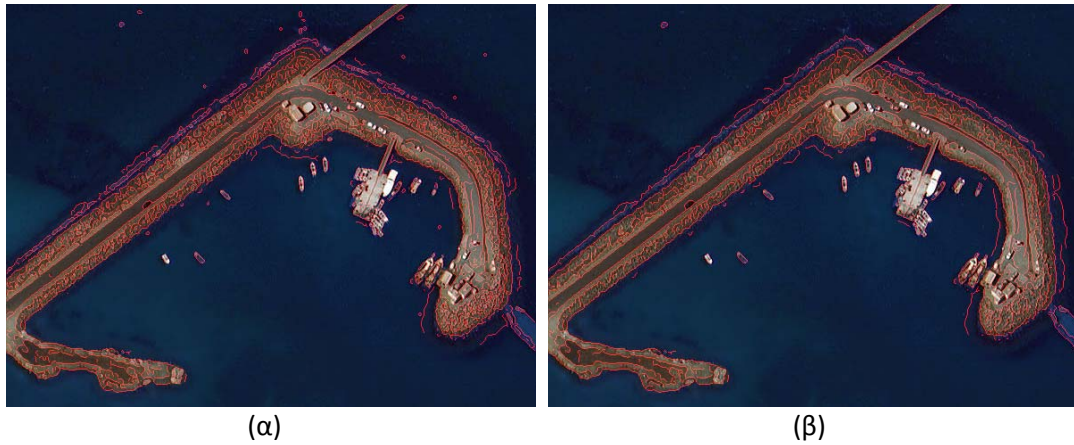
Τέλος, στην εικόνα 3.124 φαίνεται η διαφοροποίηση του τελεστή Canny σε σχέση με το μορφολογικό Laplace, όπως αυτός υλοποιήθηκε. Η ανίχνευση των ακμών πραγματοποιήθηκε στη φιλτραρισμένη, έπειτα από 10 επαναλήψεις PM και 5 επαναλήψεις ML, εικόνα. Οι παρατηρήσεις για τους δύο τελεστές είναι οι ίδιες με αυτές που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες εφαρμογές.



Εικόνα 3.124: 6^η Εφαρμογή, PM 10 επαναλήψεων και ML 5 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.

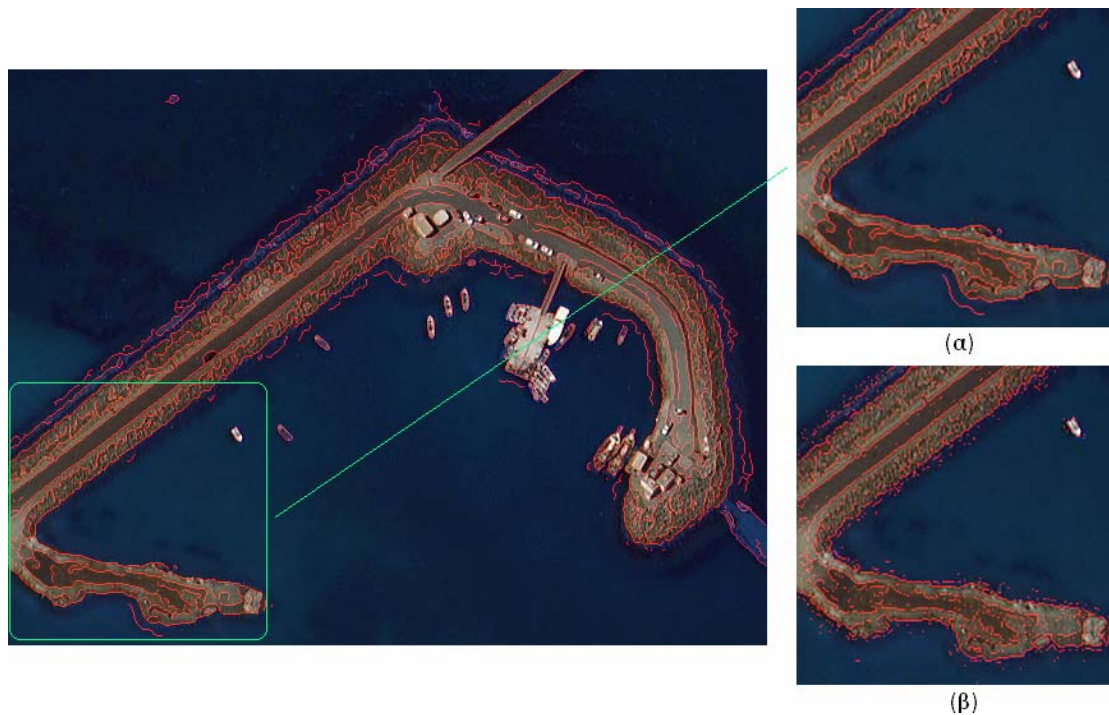
- **Συνδυασμός Ανισοτροπικής Διάχυσης ALM και Μορφολογικής Εξομάλυνσης**

Όπως και στις προηγούμενες εφαρμογές, η μορφολογική εξομάλυνση λειτουργεί επικουρικά στην ενίσχυση των ακμών με την ALM, επιτυγχάνοντας μεγαλύτερη ομαλοποίηση. Ωστόσο, και σε αυτή την εφαρμογή είναι δύσκολο να αποφανθεί κανείς για την καταλληλότητα της συγκεκριμένης μεθοδολογίας έναντι της αποκλειστικής χρήσης της ALM. Η αξιολόγηση και σύγκριση των δύο παρατίθεται στο επόμενο εδάφιο, θέτοντας κριτήρια πληρότητας, ορθότητας και ποιότητας. Έπειτα από πληθώρα συνδυασμών, τα καλύτερα αποτελέσματα δόθηκαν έπειτα από 300 επαναλήψεις ALM και 5 επαναλήψεις ML (εικόνα 3.125).



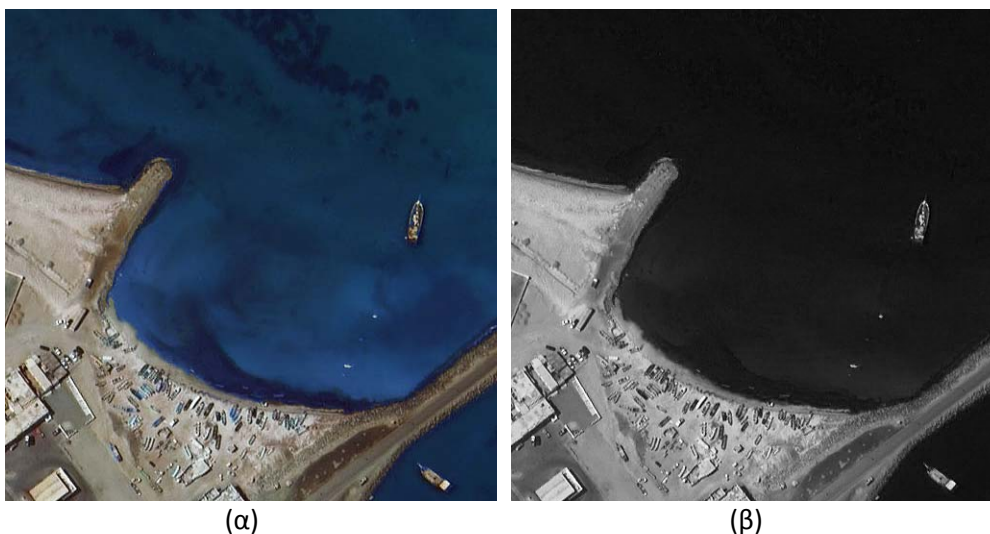
Εικόνα 3.125: (α) 6^η Εφαρμογή, ALM 300 επαναλήψεων, (β) 6^η Εφαρμογή, ALM 300 επαναλήψεων και ML 5 επαναλήψεων.

Τέλος, στην εικόνα 3.126 φαίνεται η διαφοροποίηση του τελεστή Canny σε σχέση με το μορφολογικό Laplace, όπως αυτός υλοποιήθηκε. Η ανίχνευση των ακμών πραγματοποιήθηκε στη φιλτραρισμένη, έπειτα από 20 επαναλήψεις ALM και 5 επαναλήψεις ML, εικόνα. Οι παρατηρήσεις για τους δύο τελεστές είναι οι ίδιες με αυτές που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες εφαρμογές.



Εικόνα 3.126: 6^η Εφαρμογή, ALM 20 επαναλήψεων και ML 5 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.

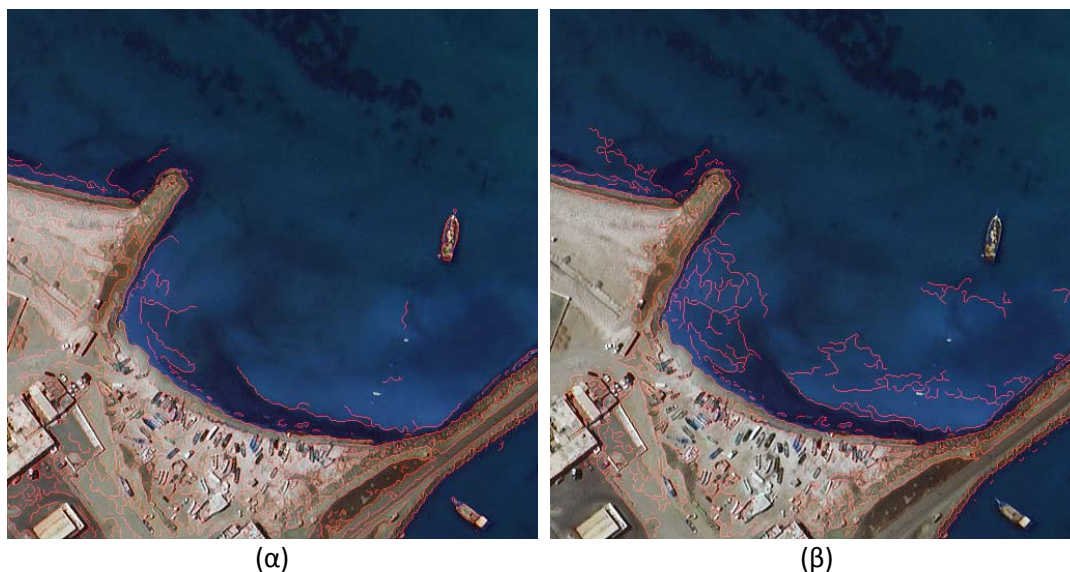
3.2.2.7 7^η Εφαρμογή (ASF, PM, ALM, ML, PM&ML, ALM&ML)



Εικόνα 3.127: (α) 7^η Εφαρμογή, απεικόνιση WORLDVIEW-2 στο φυσικό έγχρωμο σύνθετο, (β) 7^η Εφαρμογή, απεικόνιση WORLDVIEW-2 στο κόκκινο κανάλι.

- **Σειριακό Εναλλασσόμενο Φιλτράρισμα, ASF**

Κατά την εφαρμογή σειριακού εναλλασσόμενου φιλτραρίσματος, παρατηρήθηκε ότι τα καλύτερα αποτελέσματα δίνονται έπειτα από 4 επαναλήψεις, σε σύνολο 50 επαναλήψεων. Τα **προβλήματα** που εντοπίστηκαν για μεγαλύτερο αριθμό επαναλήψεων είναι τα εξής: **(α)** εμφάνιση ακμών στη θαλάσσια περιοχή και **(β)** ανίχνευση βασικών ακμών, με αποτέλεσμα να μην ανιχνεύονται μικρά – αλλά και κάποια μεγάλα – αντικείμενα όπως αυτοκίνητα, βάρκες, ακόμα και αστικός ιστός, και παρουσιάζονται στις επισυναπτόμενες εικόνες. Σημειώνεται ότι η εφαρμογή των τεχνικών προ-επεξεργασίας και η ανίχνευση των ακμών με τον τελεστή Canny έγιναν στο κόκκινο κανάλι, λόγω των φασματικών ιδιοτήτων του νερού, ωστόσο τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο φυσικό έγχρωμο σύνθετο με κόκκινο χρώμα.



Εικόνα 3.128: (α) 7^η Εφαρμογή, ASF 4 επαναλήψεων, (β) 7^η Εφαρμογή, ASF 50 επαναλήψεων.

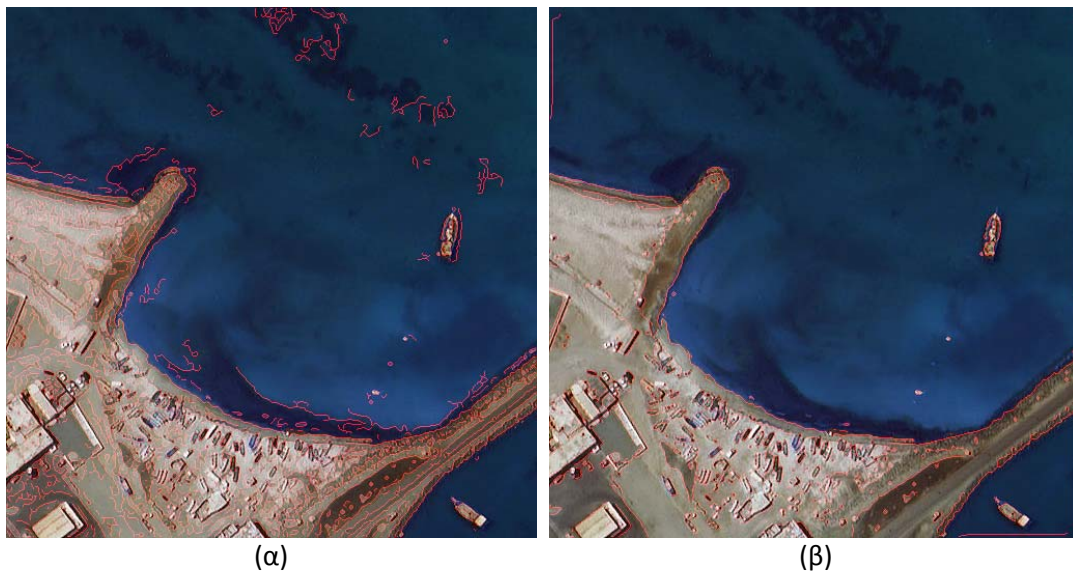
Τέλος, στην εικόνα 3.129 φαίνεται η διαφοροποίηση του τελεστή Canny σε σχέση με το μορφολογικό Laplace, όπως αυτός υλοποιήθηκε. Η ανίχνευση των ακμών πραγματοποιήθηκε στη φιλτραρισμένη, έπειτα από 4 επαναλήψεις ASF, εικόνα. Οι παρατηρήσεις για τους δύο τελεστές είναι οι ίδιες με αυτές που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες εφαρμογές.



Εικόνα 3.129: 7^η Εφαρμογή, ASF 4 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.

• **Ανισοτροπική Διάχυση PM**

Κατά την εφαρμογή ανισοτροπικής διάχυσης PM παρατηρήθηκε ότι με την αύξηση του αριθμού των επαναλήψεων – σε σύνολο 300 επαναλήψεων – διατηρούνται μόνο οι βασικές ακμές της εικόνας, το οποίο παρατηρείται και στις επισυναπτόμενες εικόνες. Στην εικόνα 3.131 φαίνεται η διαφοροποίηση του τελεστή Canny σε σχέση με το μορφολογικό Laplace, όπως αυτός υλοποιήθηκε. Η ανίχνευση των ακμών πραγματοποιήθηκε στη φιλτραρισμένη, έπειτα από 11 επαναλήψεις PM, εικόνα. Οι παρατηρήσεις για τους δύο τελεστές είναι οι ίδιες με αυτές που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες εφαρμογές.



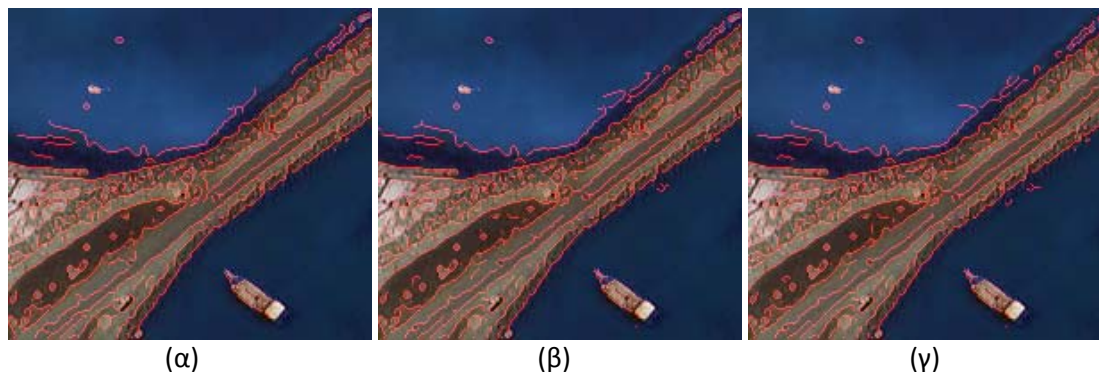
Εικόνα 3.130: (α) 7^η Εφαρμογή, PM 1 επανάληψης, (β) 7^η Εφαρμογή, PM 300 επαναλήψεων. Παράδειγμα μη σύγκλισης αλγορίθμου.



Εικόνα 3.131: 7^η Εφαρμογή, PM 11 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.

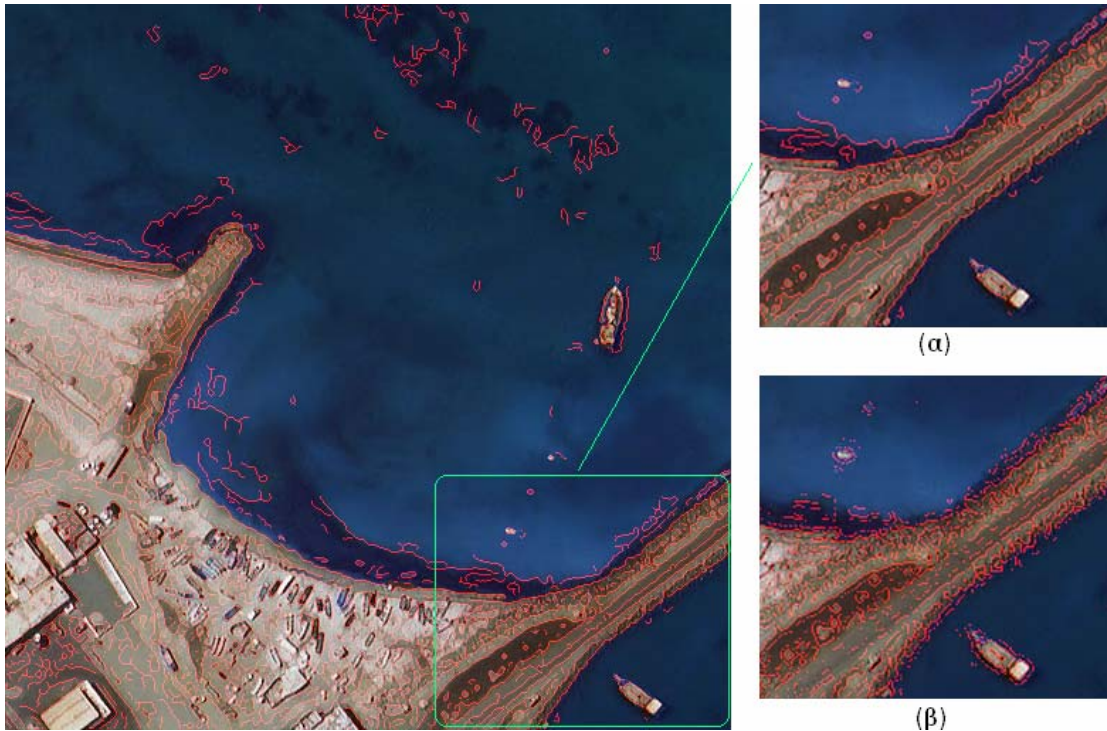
- **Ανισοτροπική Διάχυση ALM**

Όπως τονίστηκε και στις προηγούμενες εφαρμογές, εν αντιθέσει με την PM ανισοτροπική διάχυση, κατά την εφαρμογή της ALM παρατηρήθηκε ότι ακόμα και σε έντονο φιλτράρισμα ο αλγόριθμος διατηρεί πιστά τις μεταβολές των τιμών φωτεινότητας της αρχικής εικόνας, κι επομένως τη γεωμετρία των αντικειμένων. Αυτό φαίνεται χαρακτηριστικά στην εικόνα 3.132, όπου παρατίθεται το μαρκαρισμένο τμήμα της εικόνας 3.131 έπειτα από εφαρμογή του αλγορίθμου για 1, 100 και 200 επαναλήψεις.



Εικόνα 3.132: 7^η Εφαρμογή, ανισοτροπική διάχυση ALM (α) 1 επανάληψης, (β) 100 επαναλήψεων, (γ) 200 επαναλήψεων. Παράδειγμα σύγκλισης του αλγορίθμου.

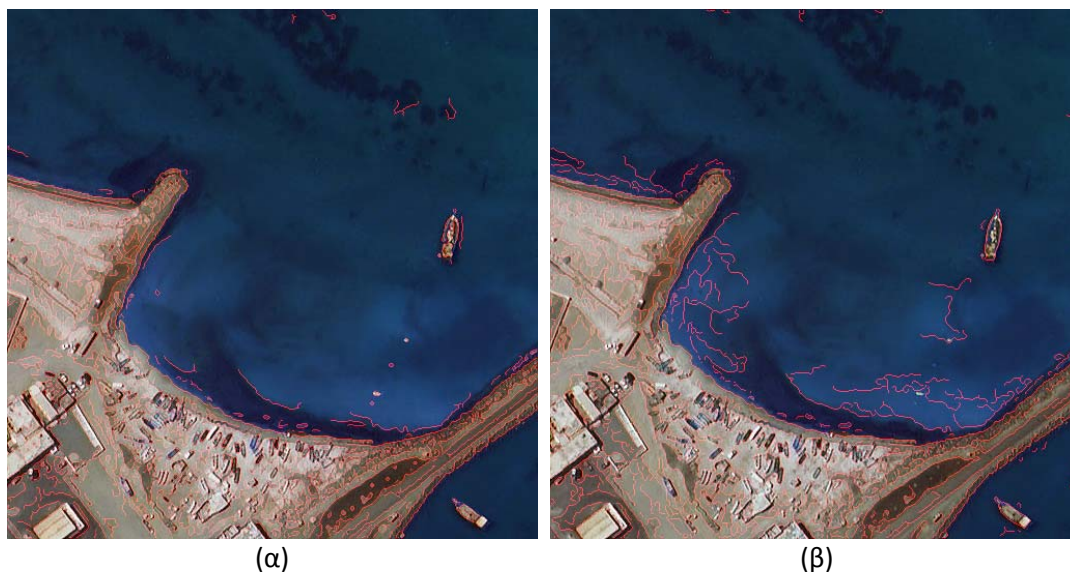
Κατά την εφαρμογή της ALM ανισοτροπικής διάχυσης παρατηρήθηκε ότι τα καλύτερα αποτελέσματα δίνονται έπειτα από 1 επανάληψη, με την αύξηση του αριθμού των οποίων παρουσιάζονται περισσότερες ακμές στο θαλάσσιο χώρο, όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.131. Τέλος, στην εικόνα 3.133 φαίνεται η διαφοροποίηση του τελεστή Canny σε σχέση με το μορφολογικό Laplace, όπως αυτός υλοποιήθηκε. Η ανίχνευση των ακμών πραγματοποιήθηκε στη φιλτραρισμένη, έπειτα από 11 επαναλήψεις ALM, εικόνα. Οι παρατηρήσεις για τους δύο τελεστές είναι οι ίδιες με αυτές που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες εφαρμογές.



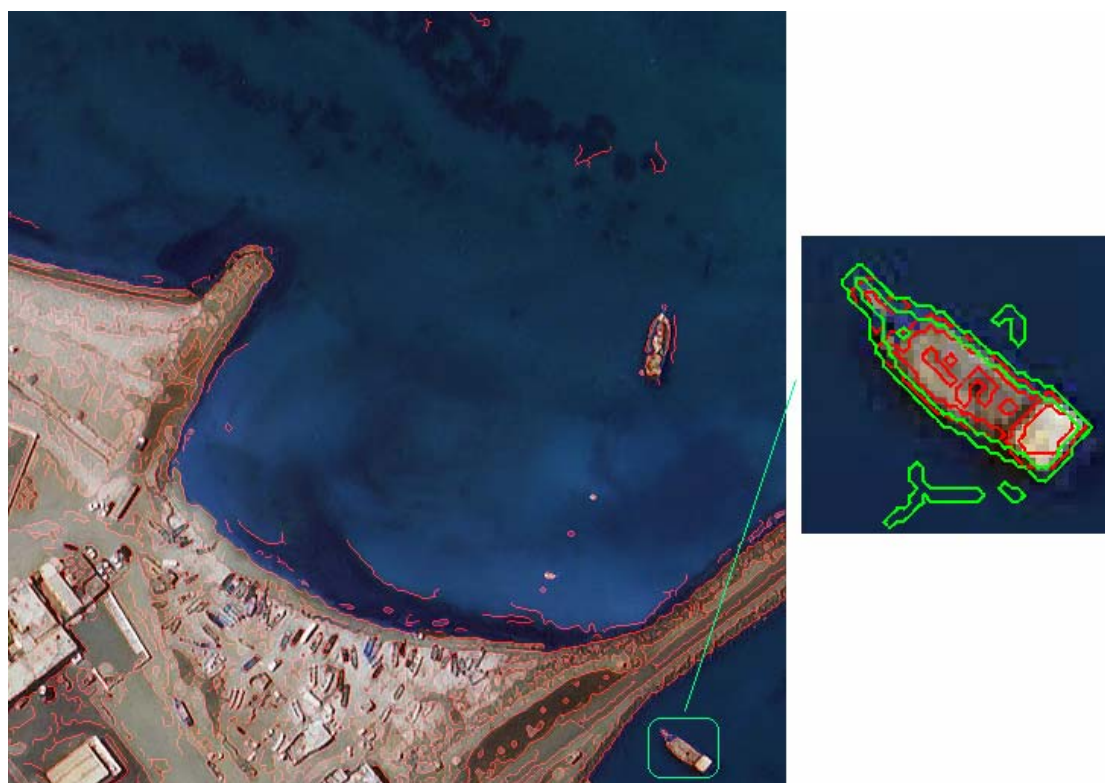
Εικόνα 3.133: 7^η Εφαρμογή, ALM 11 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.

- **Μορφολογική Εξομάλυνση, ML**

Κατά την εφαρμογή μορφολογικής εξομάλυνσης, παρατηρήθηκε ότι τα καλύτερα αποτελέσματα δίνονται έπειτα από 1 επανάληψη, σε σύνολο 21 επαναλήψεων. Τα **προβλήματα** που εντοπίστηκαν για μεγαλύτερο αριθμό επαναλήψεων είναι τα εξής: **(α)** μετατόπιση περιγραμμάτων, **(β)** εμφάνιση ακμών στη θαλάσσια περιοχή και **(γ)** εξάρτηση της μεθόδου από τους γκαουσιανούς σηματοδευτές, και παρουσιάζονται στις επισυναπτόμενες εικόνες. Στην εικόνα 3.135 σημειώνεται η μετατόπιση των περιγραμμάτων τμήματος της αρχικής εικόνας έπειτα από μορφολογική εξομάλυνση 1 και 21 επαναλήψεων (κόκκινο και πράσινο χρώμα, αντίστοιχα).



Εικόνα 3.134: 7^η Εφαρμογή, ML (α) 1 επανάληψης, (β) 21 επαναλήψεων.



Εικόνα 3.135: 7^η Εφαρμογή, σύγκριση ανίχνευσης ακμών με τον τελεστή Canny έπειτα από φιλτράρισμα 1 και 21 επαναλήψεων (κόκκινο και πράσινο χρώμα, αντίστοιχα).

Παρατηρείται μετατόπιση των περιγραμμάτων.

Τέλος, στην εικόνα 3.136 φαίνεται η διαφοροποίηση του τελεστή Canny σε σχέση με το μορφολογικό Laplace, όπως αυτός υλοποιήθηκε. Η ανίχνευση των ακμών πραγματοποιήθηκε στη φιλτραρισμένη, έπειτα από 11 επαναλήψεις ML, εικόνα. Οι παρατηρήσεις για τους δύο τελεστές είναι οι ίδιες με αυτές που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες εφαρμογές.

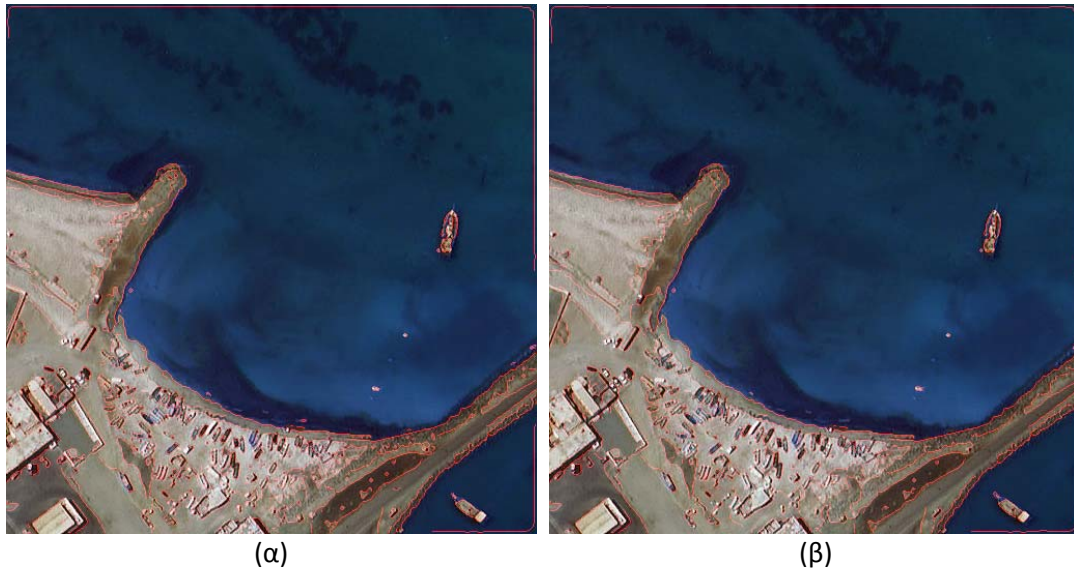


Εικόνα 3.136: 7^η Εφαρμογή, ML 11 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.

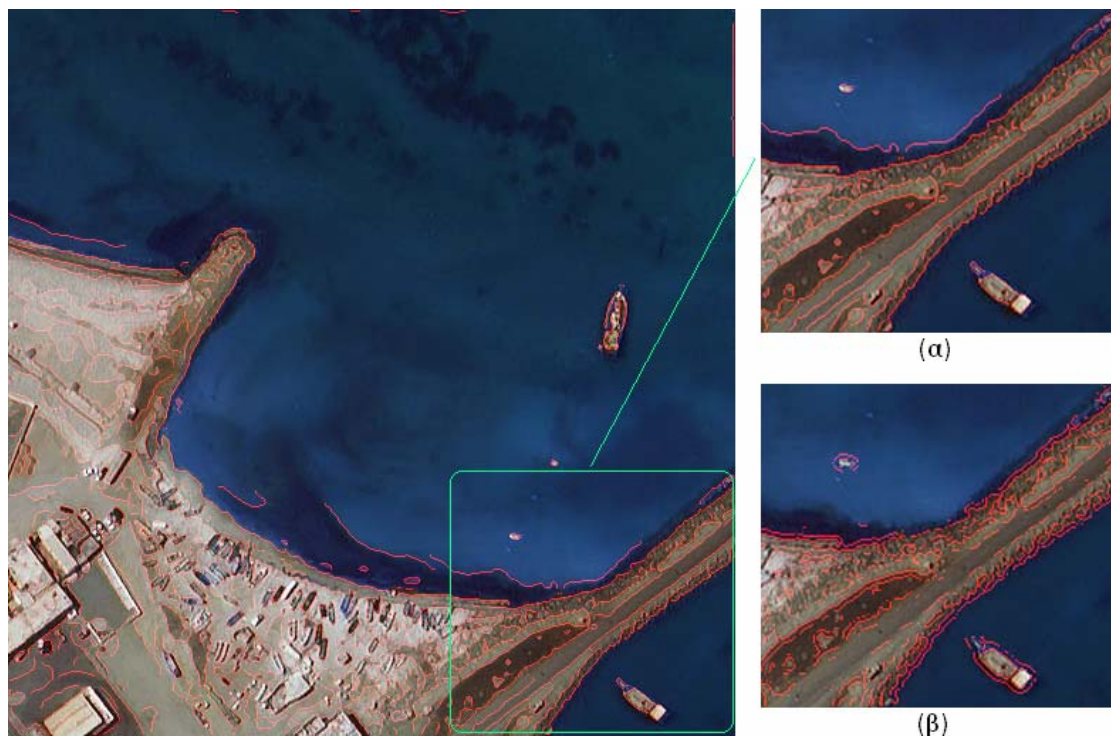
- **Συνδυασμός Ανισοτροπικής Διάχυσης PM και Μορφολογικής Εξομάλυνσης**

Έχει ήδη σημειωθεί ότι στο συνδυασμό της PM ανισοτροπικής διάχυσης με τη μορφολογική εξομάλυνση ενυπάρχουν τα προβλήματα μη σύγκλισης της PM. Επιπλέον, αν και η μορφολογική εξομάλυνση επιτυγχάνει μεγαλύτερη ομαλοποίηση, η εξάρτησή της από τους γκαουσιανούς σημαδευτές, έχει ως αποτέλεσμα να μην ανιχνεύονται όλες οι ακμές. Οι παρατηρήσεις αυτές φαίνονται στην εικόνα 3.137 όπου παρατίθενται δύο παραδείγματα εφαρμογής της PM έπειτα από 100 επαναλήψεις (3.137(α)) και της PM 100 επαναλήψεων σε συνδυασμό με μορφολογική εξομάλυνση 5 επαναλήψεων (3.137(β)).

Τέλος, στην εικόνα 3.138 φαίνεται η διαφοροποίηση του τελεστή Canny σε σχέση με το μορφολογικό Laplace, όπως αυτός υλοποιήθηκε. Η ανίχνευση των ακμών πραγματοποιήθηκε στη φιλτραρισμένη, έπειτα από 10 επαναλήψεις PM και 5 επαναλήψεις ML, εικόνα. Οι παρατηρήσεις για τους δύο τελεστές είναι οι ίδιες με αυτές που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες εφαρμογές.



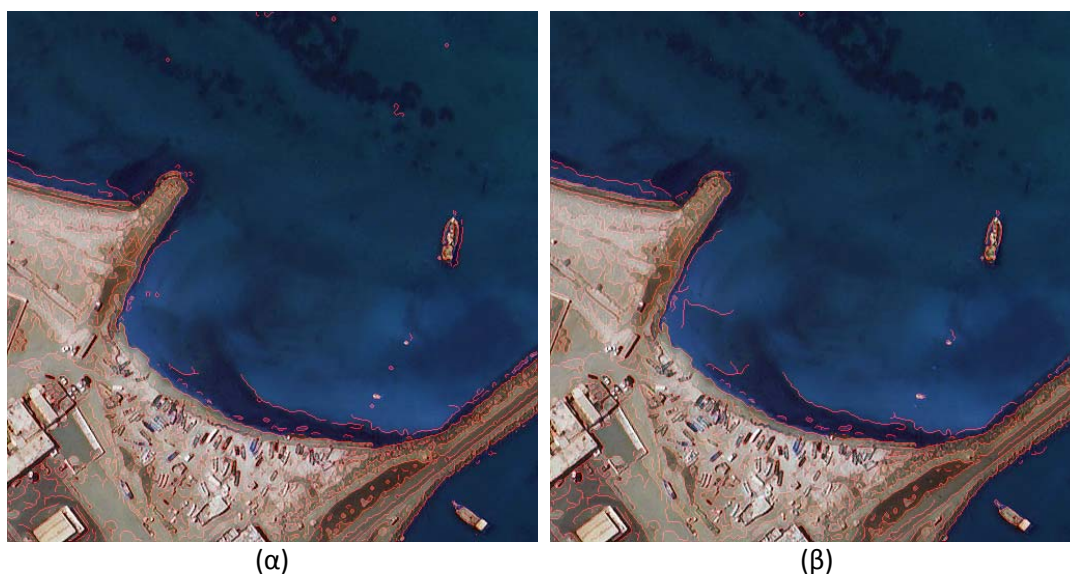
Εικόνα 3.137: (α) 7^η Εφαρμογή, PM 100 επαναλήψεων, (β) 7^η Εφαρμογή, PM 100 επαναλήψεων και ML 5 επαναλήψεων.



Εικόνα 3.138: 7^η Εφαρμογή, PM 10 επαναλήψεων και ML 5 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.

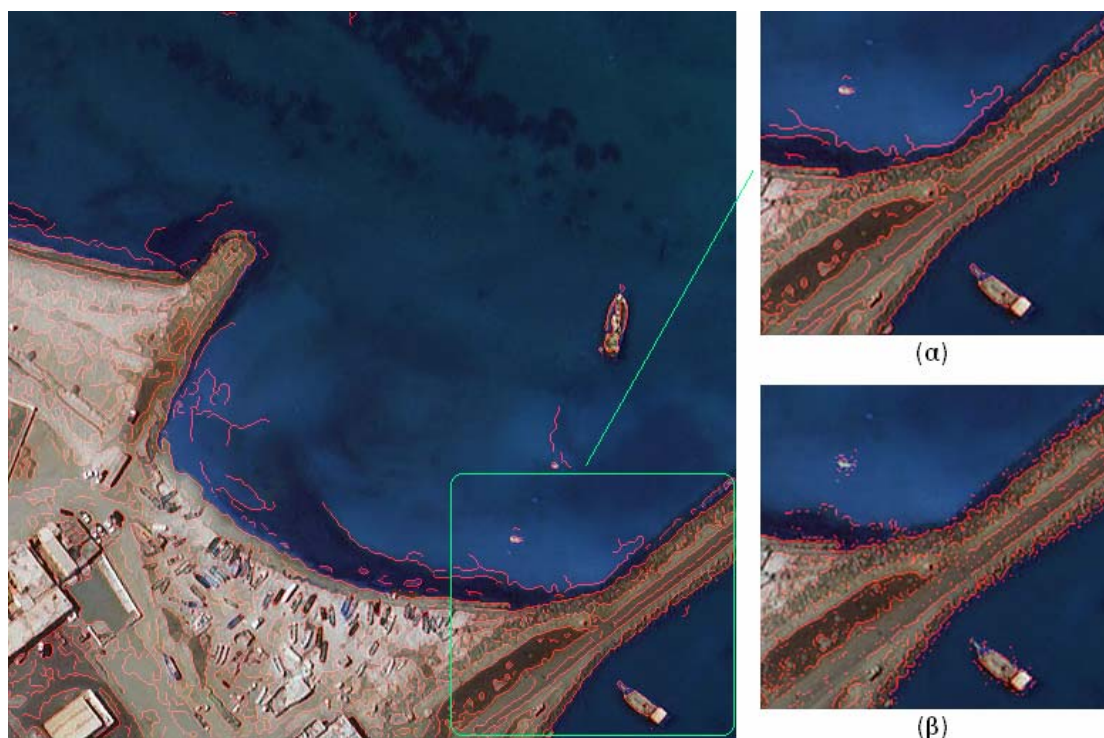
- **Συνδυασμός Ανισοτροπικής Διάχυσης ALM και Μορφολογικής Εξομάλυνσης**

Όπως και στις προηγούμενες εφαρμογές, η μορφολογική εξομάλυνση λειτουργεί επικουρικά στην ενίσχυση των ακμών με την ALM, επιτυγχάνοντας μεγαλύτερη ομαλοποίηση. Ωστόσο, και σε αυτή την εφαρμογή είναι δύσκολο να αποφανθεί κανείς για την καταλληλότητα της συγκεκριμένης μεθοδολογίας έναντι της αποκλειστικής χρήσης της ALM. Η αξιολόγηση και σύγκριση των δύο παρατίθεται στο επόμενο εδάφιο, θέτοντας κριτήρια πληρότητας, ορθότητας και ποιότητας. Έπειτα από πληθώρα συνδυασμών, τα καλύτερα αποτελέσματα δόθηκαν έπειτα από 200 επαναλήψεις ALM και 5 επαναλήψεις ML (εικόνα 3.139).



Εικόνα 3.139: (α) 7^η Εφαρμογή, ALM 200 επαναλήψεων, (β) 7^η Εφαρμογή, ALM 200 επαναλήψεων και ML 5 επαναλήψεων.

Τέλος, στην εικόνα 3.140 φαίνεται η διαφοροποίηση του τελεστή Canny σε σχέση με το μορφολογικό Laplace, όπως αυτός υλοποιήθηκε. Η ανίχνευση των ακμών πραγματοποιήθηκε στη φιλτραρισμένη, έπειτα από 20 επαναλήψεις ALM και 5 επαναλήψεις ML, εικόνα. Οι παρατηρήσεις για τους δύο τελεστές είναι οι ίδιες με αυτές που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες εφαρμογές.



Εικόνα 3.140: 7^η Εφαρμογή, ALM 20 επαναλήψεων και ML 5 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.

3.2.2.8 8^η Εφαρμογή (ASF, PM, ALM, ML, PM&ML, ALM&ML)



Εικόνα 3.141: 8^η Εφαρμογή, απεικόνιση TERRASAR-X.

Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας αφορά σε δεδομένα υψηλής διακριτικής ικανότητας. Κρίνεται, επομένως, σκόπιμο να τονιστεί ότι η εφαρμογή της τόσο σε υπερφασματικά όσο και σε SAR δεδομένα έγινε διερευνητικά. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν μόνο δύο

τέτοιες απεικονίσεις. Δεν θα ήταν δυνατόν σε τέτοιο επίπεδο μελέτης να μελετηθούν όλοι οι τύποι τηλεπισκοπικών δεδομένων και θα ήταν μάλλον αφελές να γενικευτεί η συγκεκριμένη μεθοδολογία σε απεικονίσεις με διαφορετικά χαρακτηριστικά και χωρίς να έχει χρησιμοποιηθεί ένα εύρος απεικονίσεων κατάλληλο για τη διεξαγωγή συμπερασμάτων. Αξιολογώντας, ωστόσο, την εφαρμογή των τεχνικών που χρησιμοποιήθηκαν, είναι δυνατή η διόρθωση ή/ και βελτίωση του αλγορίθμου, με την εφαρμογή πιο προηγμένων τεχνικών.

Σε προηγούμενο εδάφιο έχει γίνει εκτενής αναφορά για το βασικό πρόβλημα των SAR εικόνων, την «κηλίδωση», η οποία είναι θόρυβος του συστήματος κι όχι της απεικόνισης. Η παρουσία της δυσχεραίνει την ερμηνεία των radar απεικονίσεων – διότι επικάθεται της υφής – κι έτσι απαιτείται η αφαίρεσή της. Η προ-επεξεργασία SAR απεικονίσεων αφορά στην αφαίρεση του θορύβου υψηλής συχνότητας κι όχι απλά στην ομαλοποίησή της, όπως γίνεται κατά την προ-επεξεργασία δεδομένων ηλεκτρο-οπτικών δεκτών, και αποτελεί βασικό πρώτο βήμα στην επεξεργασία τους. Το μέγεθος αυτό αντιμετωπίζεται είτε με τεχνικές φιλτραρίσματος είτε με επεξεργασία πολλών όψεων (multi-look processing). Στο πλαίσιο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, για τις δύο επόμενες εφαρμογές (8 και 9), εφαρμόστηκε το φίλτρο Lee πριν από τις γνωστές τεχνικές ομαλοποίησης και ενίσχυσης των ακμών.

Σύμφωνα με τον J. S. Lee (1981) και τους Ju και Moloney (1997), το συγκεκριμένο φίλτρο βασίζεται στο πολλαπλασιαστικό μοντέλο θορύβου σε μια εικόνα, $z_{i,j} = x_{i,j} \cdot u_{i,j}$, όπου z η παρατηρούμενη εικόνα, x η υποκείμενη εικόνα και u ο θόρυβος, αντίστοιχα. Βάσει της υπόθεσης ότι ο θόρυβος είναι άσπρος, με καθολικό μέσο όρο και δεν είναι συναφής με την υποκείμενη εικόνα (uncorrelated), το πολλαπλασιαστικό φίλτρο Lee αναζητά την καλύτερη εκτίμηση \hat{x} του x , βάσει ελαχίστων τετραγώνων. Σε κάθε εικονοστοιχείο $z_{i,j}$, $\hat{x}_{i,j} = \bar{x} + k_{i,j} (z_{i,j} - \bar{x})$, όπου

$k_{i,j} = \frac{Var(x)}{x^2 \sigma_u^2 + Var(x)}$ ο παράγοντας ενίσχυσης. Η τοπική προσαρμογή του φίλτρου

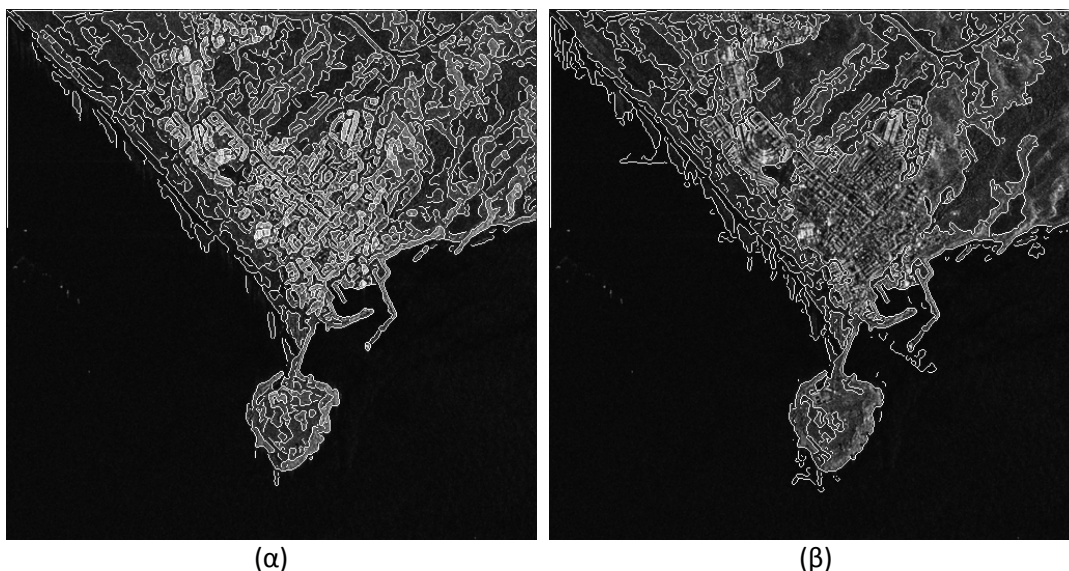
βασίζεται στον υπολογισμό των τοπικών στατιστικών στοιχείων, \bar{x} και $Var(x)$, από τις εκτιμήσεις \bar{z} και $Var(z)$ σε μια γειτονιά. Προσαρμόζοντας τις παραμέτρους του φίλτρου στις περιοχές χαμηλής και υψηλής μεταβλητότητας, το Lee ομαλοποιεί το θόρυβο διατηρώντας τις ακμές. Η διατήρηση των ακμών επιτυγχάνεται με τη «διακοπή» του φίλτρου στις περιοχές υψηλής μεταβλητότητας, ούτως ώστε η εκτίμηση $\hat{x}_{i,j}$ να είναι περίπου ίση με το παρατηρούμενο εικονοστοιχείο $z_{i,j}$, δηλαδή $k_{i,j} \approx 1$. Το φίλτρο Lee είναι πολύ αποτελεσματικό στην αφαίρεση της «κηλίδωσης» ιδίως σε ομοιογενείς περιοχές ή περιοχές χαμηλής μεταβλητότητας. Ωστόσο, σε αντίθετη περίπτωση όπου οι παράμετροι του φίλτρου προσαρμόζονται ούτως ώστε να διατηρούνται οι ακμές, αυτό έχει ως αποτελέσματα να διατηρείται και η «κηλίδωση» στις περιοχές κοντά ή πάνω σε αυτές. Σημειώνεται ότι υπάρχουν αρκετές βελτιώσεις της αρχικής εκδοχής του φίλτρου.

Ένα επιπλέον δίλημμα στην επεξεργασία SAR απεικονίσεων έγκειται στη χρήση μεθοδολογιών που σχετίζονται με τις τιμές φωτεινότητας του γκρι στις εικόνες. Έχει

ήδη τονιστεί ότι αυτό δεν είναι πάντα χρήσιμο στην επεξεργασία SAR απεικονίσεων, επειδή η θάλασσα δεν χαρακτηρίζεται γενικά από ενιαίες τιμές φωτεινότητας του γκρι. Οι τεχνικές επεξεργασίας που χρησιμοποιήθηκαν αφορούν και στη μέτρηση υφής με την εντροπία και βάσει των τιμών φωτεινότητας του γκρι (συσταδοποίηση Κ-μέσου). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε επόμενο εδάφιο.

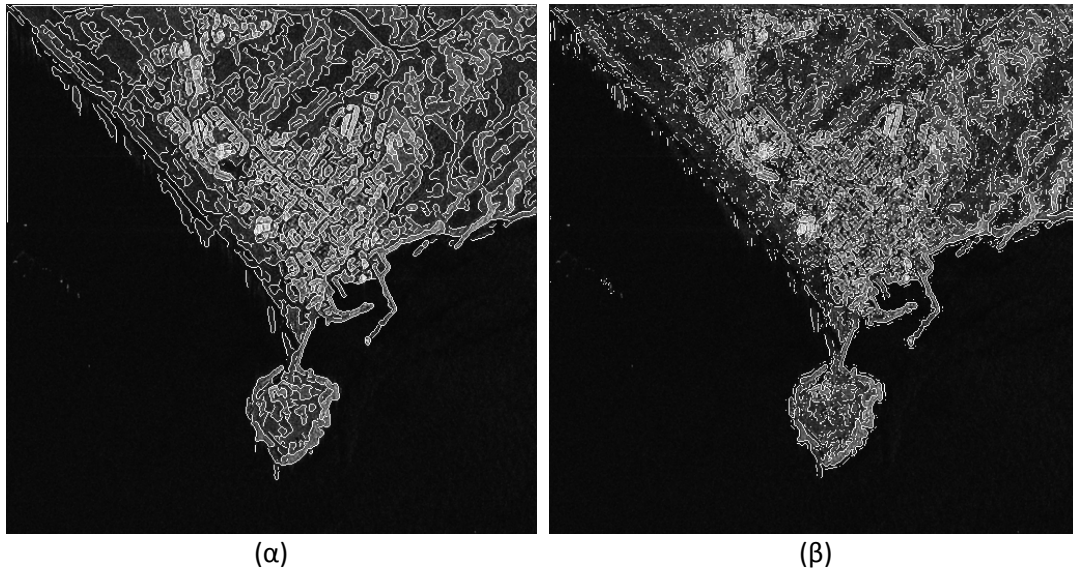
- **Σειριακό Εναλλασσόμενο Φιλτράρισμα, ASF**

Κατά την εφαρμογή σειριακού εναλλασσόμενου φιλτραρίσματος, παρατηρήθηκε ότι τα καλύτερα αποτελέσματα δίνονται έπειτα από 2 επαναλήψεις, σε σύνολο 40 επαναλήψεων. Τα **προβλήματα** που εντοπίστηκαν για μεγαλύτερο αριθμό επαναλήψεων είναι τα εξής: **(α)** εμφάνιση ακμών στη θαλάσσια περιοχή και **(β)** ανίχνευση βασικών ακμών, και παρουσιάζονται στις επισυναπτόμενες εικόνες. Σημειώνεται ότι η ανίχνευση των ακμών έγινε με τον τελεστή Canny.



Εικόνα 3.142: (α) 8^η Εφαρμογή, ASF 2 επαναλήψεων, (β) 8^η Εφαρμογή, ASF 40 επαναλήψεων.

Τέλος, στην εικόνα 3.143 φαίνεται η διαφοροποίηση του τελεστή Canny σε σχέση με το μορφολογικό Laplace, όπως αυτός υλοποιήθηκε. Η ανίχνευση των ακμών πραγματοποιήθηκε στη φιλτραρισμένη, έπειτα από 2 επαναλήψεις ASF, εικόνα. Οι παρατηρήσεις για τους δύο τελεστές είναι οι ίδιες με αυτές που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες εφαρμογές.

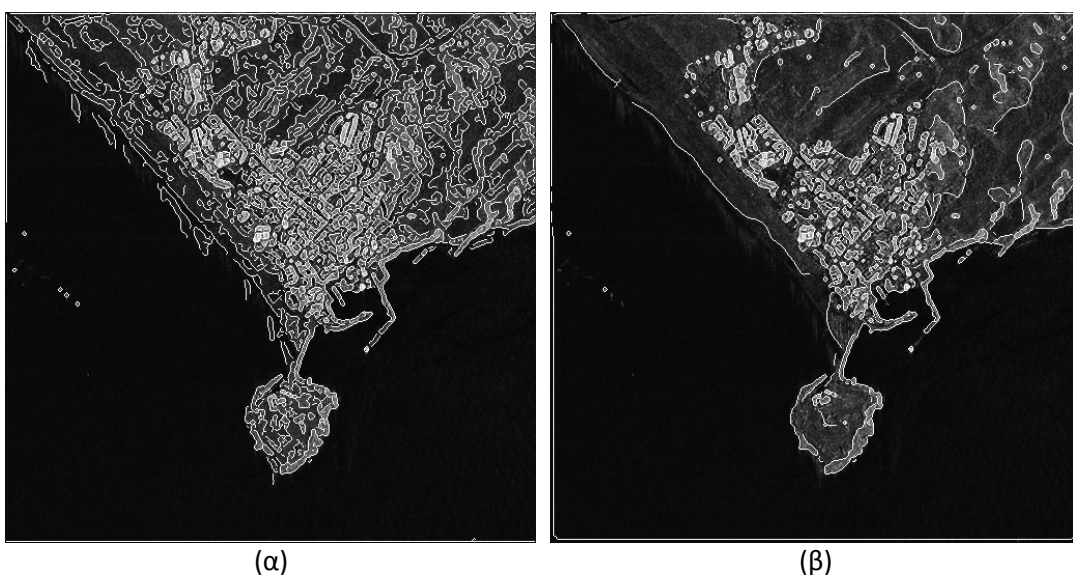


Εικόνα 3.143: 8^η Εφαρμογή, ASF 2 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.

Σημειώνεται ότι το βασικότερο πρόβλημα που παρουσιάστηκε σε όλα τα στάδια της μεθοδολογίας είναι η ανίχνευση των κυμάτων περιμετρικά της ξηράς – ακόμα και με χρήση της εντροπίας – με αποτέλεσμα να παρουσιάζονται δυσκολίες ως προς τη διατήρηση της αληθούς θέσης της ακτογραμμής (βλ. κεφάλαιο 4).

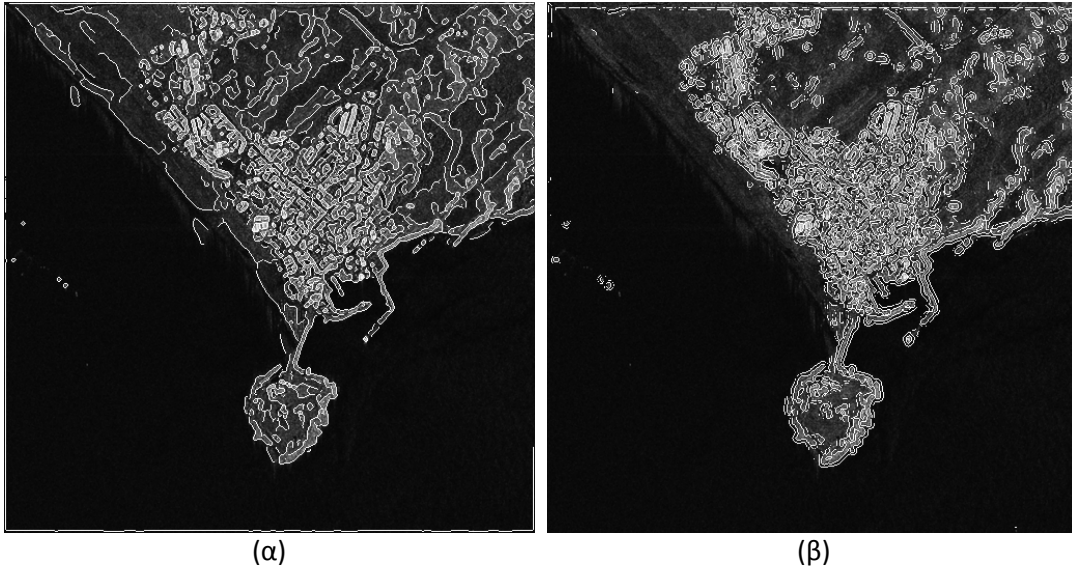
- **Ανισοτροπική Διάχυση PM**

Κατά την εφαρμογή ανισοτροπικής διάχυσης PM παρατηρήθηκε ότι με την αύξηση του αριθμού των επαναλήψεων – σε σύνολο 100 επαναλήψεων – διατηρούνται μόνο οι βασικές ακμές της εικόνας, το οποίο παρατηρείται και στις επισυναπτόμενες εικόνες.



Εικόνα 3.144: (α) 8^η Εφαρμογή, PM 1 επανάληψης, (β) 8^η Εφαρμογή, PM 100 επαναλήψεων. Παράδειγμα μη σύγκλισης αλγορίθμου.

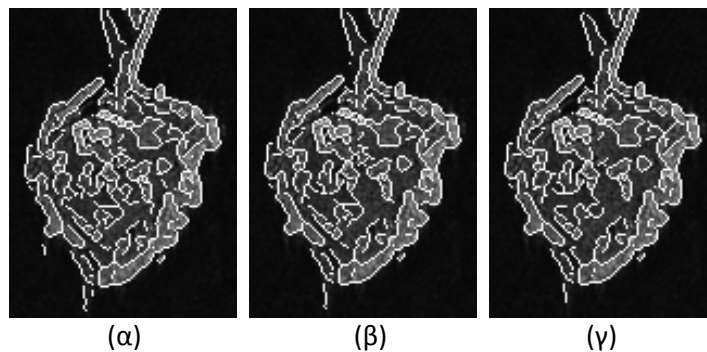
Στην εικόνα 3.145 φαίνεται η διαφοροποίηση του τελεστή Canny σε σχέση με το μορφολογικό Laplace, όπως αυτός υλοποιήθηκε. Η ανίχνευση των ακμών πραγματοποιήθηκε στη φιλτραρισμένη, έπειτα από 11 επαναλήψεις PM, εικόνα. Οι παρατηρήσεις για τους δύο τελεστές είναι οι ίδιες με αυτές που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες εφαρμογές.



Εικόνα 3.145: 8^η Εφαρμογή, PM 11 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.

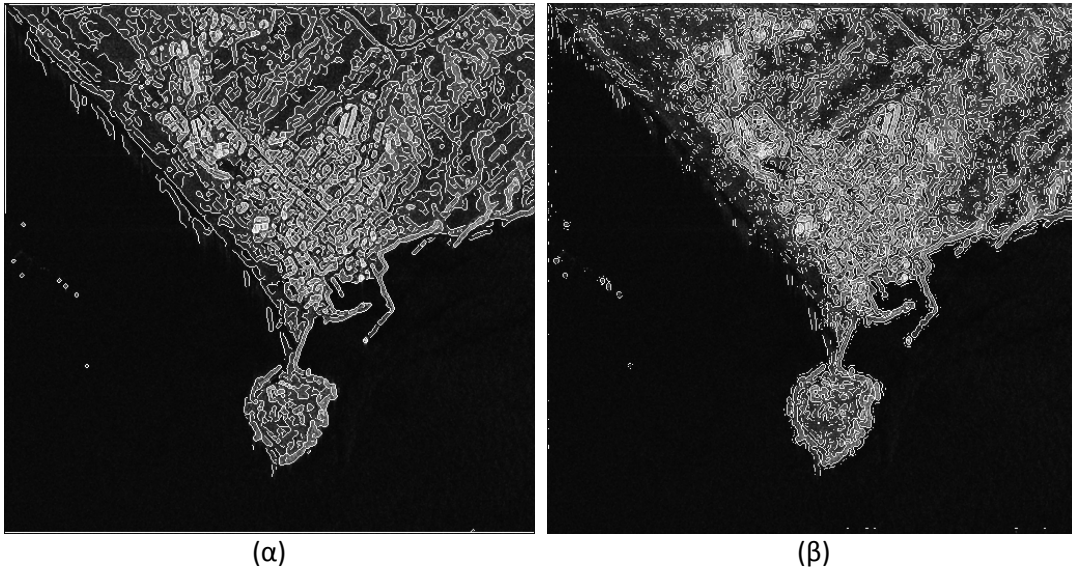
- **Ανισοτροπική Διάχυση ALM**

Όπως τονίστηκε και στις προηγούμενες εφαρμογές, εν αντιθέσει με την PM ανισοτροπική διάχυση, κατά την εφαρμογή της ALM παρατηρήθηκε ότι διατηρούνται πιο πιστά οι μεταβολές των τιμών φωτεινότητας της αρχικής εικόνας, κι επομένως η γεωμετρία των αντικειμένων. Ωστόσο, σε σύγκριση με τις προηγούμενες εφαρμογές, παρατηρείται ότι σε έντονο φιλτράρισμα ο αλγόριθμος διατηρεί λιγότερες ακμές. Τα συμπεράσματα αυτά φαίνονται χαρακτηριστικά στην εικόνα 3.146, σε τμήμα της αρχικής εικόνας, έπειτα από εφαρμογή του αλγορίθμου για 1, 100 και 300 επαναλήψεις.



Εικόνα 3.146: 8^η Εφαρμογή, ανισοτροπική διάχυση ALM (α) 1 επανάληψης, (β) 100 επαναλήψεων, (γ) 300 επαναλήψεων, σε τμήμα της αρχικής εικόνας.

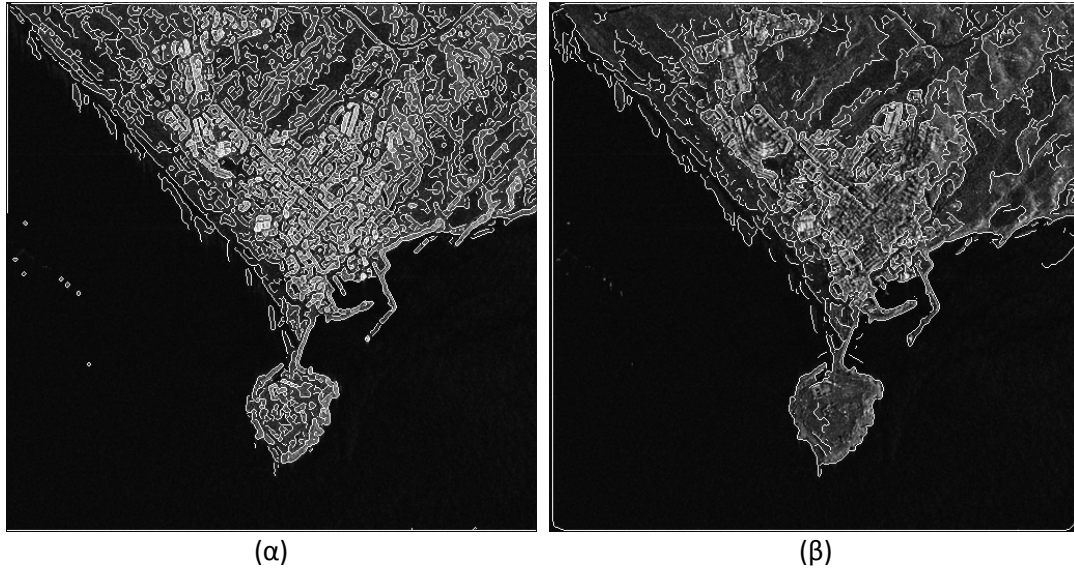
Κατά την εφαρμογή της ALM ανιστροπικής διάχυσης παρατηρήθηκε ότι τα καλύτερα αποτελέσματα δίνονται έπειτα από 100 επαναλήψεις, με την αύξηση του αριθμού των οποίων η ομαλοποίηση γίνεται πιο έντονη, όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.146. Τέλος, στην εικόνα 3.147 φαίνεται η διαφοροποίηση του τελεστή Canny σε σχέση με το μορφολογικό Laplace, όπως αυτός υλοποιήθηκε. Η ανίχνευση των ακμών πραγματοποιήθηκε στη φιλτραρισμένη, έπειτα από 11 επαναλήψεις ALM, εικόνα. Οι παρατηρήσεις για τους δύο τελεστές είναι οι ίδιες με αυτές που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες εφαρμογές.



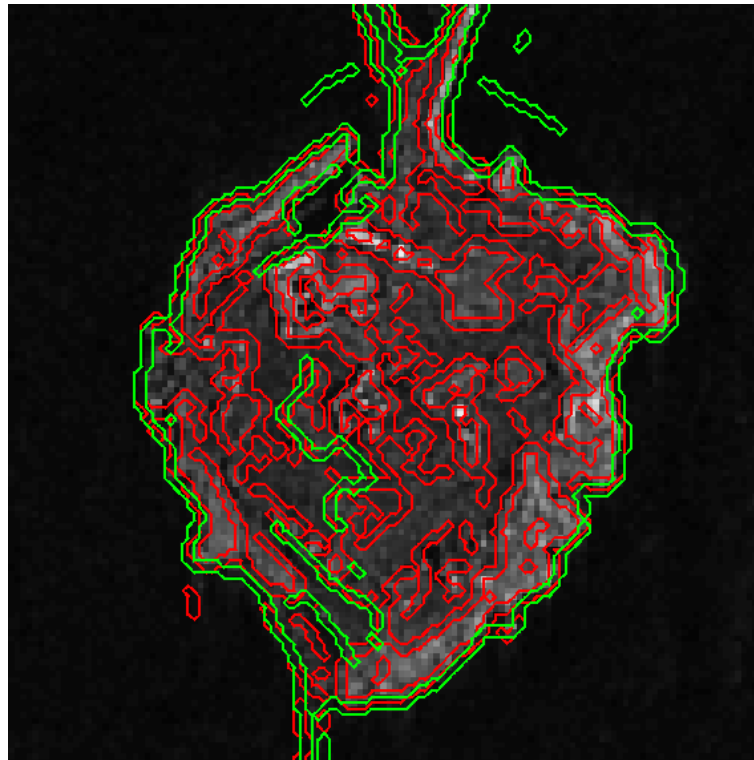
Εικόνα 3.147: 8^η Εφαρμογή, ALM 11 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.

- **Μορφολογική Εξομάλυνση, ML**

Κατά την εφαρμογή μορφολογικής εξομάλυνσης, παρατηρήθηκε ότι τα καλύτερα αποτελέσματα δίνονται έπειτα από 1 επανάληψη, σε σύνολο 50 επαναλήψεων. Τα **προβλήματα** που εντοπίστηκαν για μεγαλύτερο αριθμό επαναλήψεων είναι τα εξής: **(α)** μετατόπιση περιγραμμάτων και **(β)** εξάρτηση της μεθόδου από τους γκαουσιανούς σηματοδευτές, και παρουσιάζονται στις επισυναπτόμενες εικόνες. Στην εικόνα 3.149 σημειώνεται η μετατόπιση των περιγραμμάτων του τμήματος της εικόνας 3.146, έπειτα από μορφολογική εξομάλυνση 1 και 50 επαναλήψεων (κόκκινο και πράσινο χρώμα, αντίστοιχα).

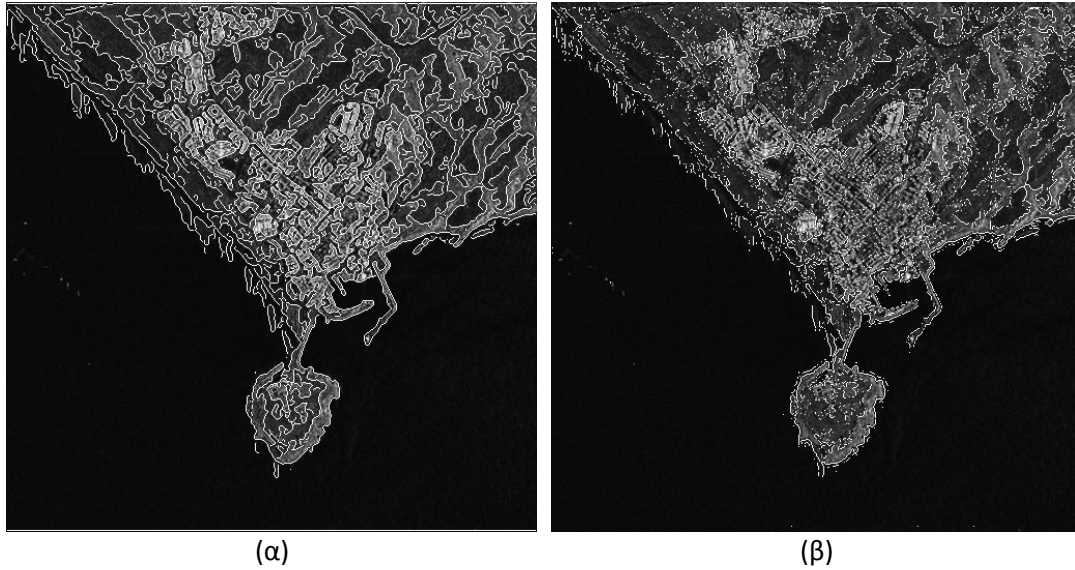


Εικόνα 3.148: 8^η Εφαρμογή, ML (α) 1 επανάληψης, (β) 50 επαναλήψεων.



Εικόνα 3.149: 8^η Εφαρμογή, σύγκριση ανίχνευσης ακμών με τον τελεστή Canny έπειτα από φιλτράρισμα 1 και 50 επαναλήψεων (κόκκινο και πράσινο χρώμα, αντίστοιχα). Παρατηρείται μετατόπιση των περιγραμμάτων.

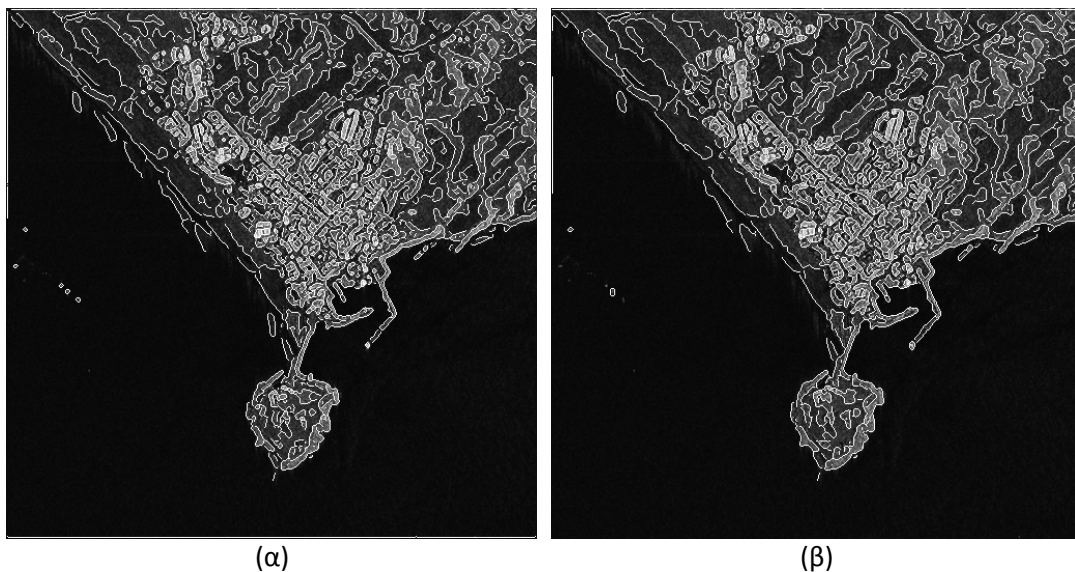
Τέλος, στην εικόνα 3.150 φαίνεται η διαφοροποίηση του τελεστή Canny σε σχέση με το μορφολογικό Laplace, όπως αυτός υλοποιήθηκε. Η ανίχνευση των ακμών πραγματοποιήθηκε στη φιλτραρισμένη, έπειτα από 16 επαναλήψεις ML, εικόνα. Οι παρατηρήσεις για τους δύο τελεστές είναι οι ίδιες με αυτές που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες εφαρμογές.



Εικόνα 3.150: 8^η Εφαρμογή, ML 16 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.

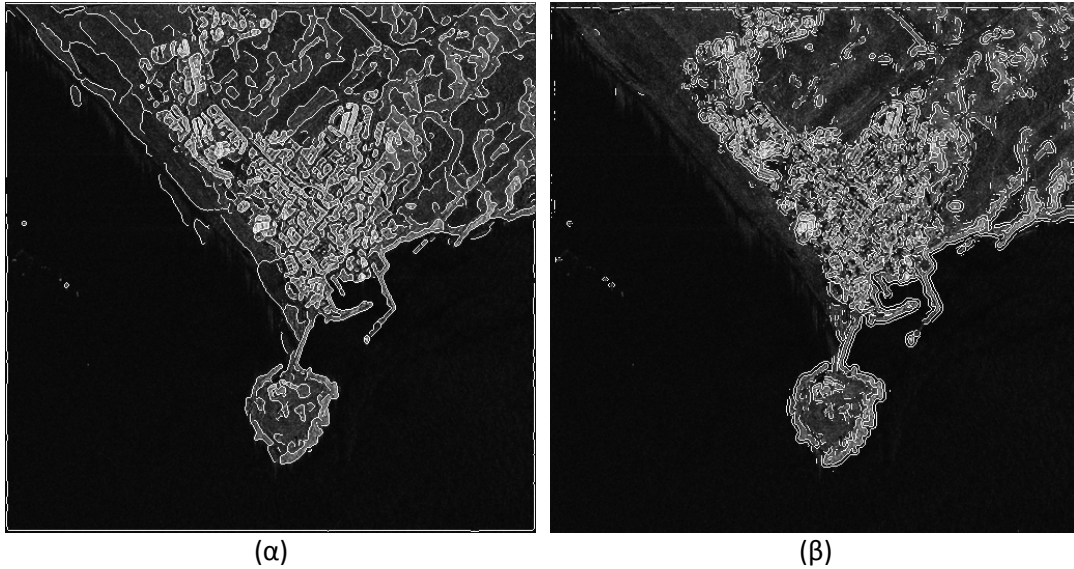
- **Συνδυασμός Ανισοτροπικής Διάχυσης PM και Μορφολογικής Εξομάλυνσης**

Έχει ήδη σημειωθεί ότι στο συνδυασμό της PM ανισοτροπικής διάχυσης με τη μορφολογική εξομάλυνση ενυπάρχουν τα προβλήματα μη σύγκλισης της PM – αν και η ML επιτυγχάνει το στόχο της, παρότι εξαρτημένη από τους γκαουσιανούς σηματοδευτές. Αυτό παρατηρείται και στην εικόνα 3.151 όπου παρατίθενται δύο παραδείγματα εφαρμογής της PM έπειτα από 6 επαναλήψεις (3.151(α)) και της PM 6 επαναλήψεων σε συνδυασμό με μορφολογική εξομάλυνση 5 επαναλήψεων (3.151(β)).



Εικόνα 3.151: (α) 8^η Εφαρμογή, PM 6 επαναλήψεων, (β) 8^η Εφαρμογή, PM 6 επαναλήψεων και ML 5 επαναλήψεων.

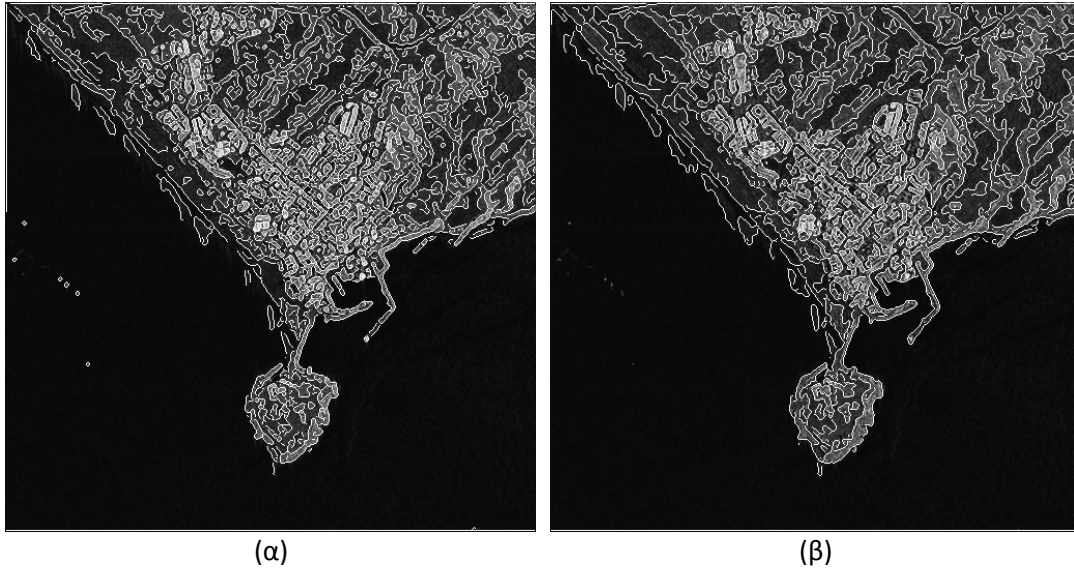
Τέλος, στην εικόνα 3.152 φαίνεται η διαφοροποίηση του τελεστή Canny σε σχέση με το μορφολογικό Laplace, όπως αυτός υλοποιήθηκε. Η ανίχνευση των ακμών πραγματοποιήθηκε στη φιλτραρισμένη, έπειτα από 15 επαναλήψεις PM και 5 επαναλήψεις ML, εικόνα. Οι παρατηρήσεις για τους δύο τελεστές είναι οι ίδιες με αυτές που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες εφαρμογές.



Εικόνα 3.152: 8^η Εφαρμογή, PM 15 επαναλήψεων και ML 5 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.

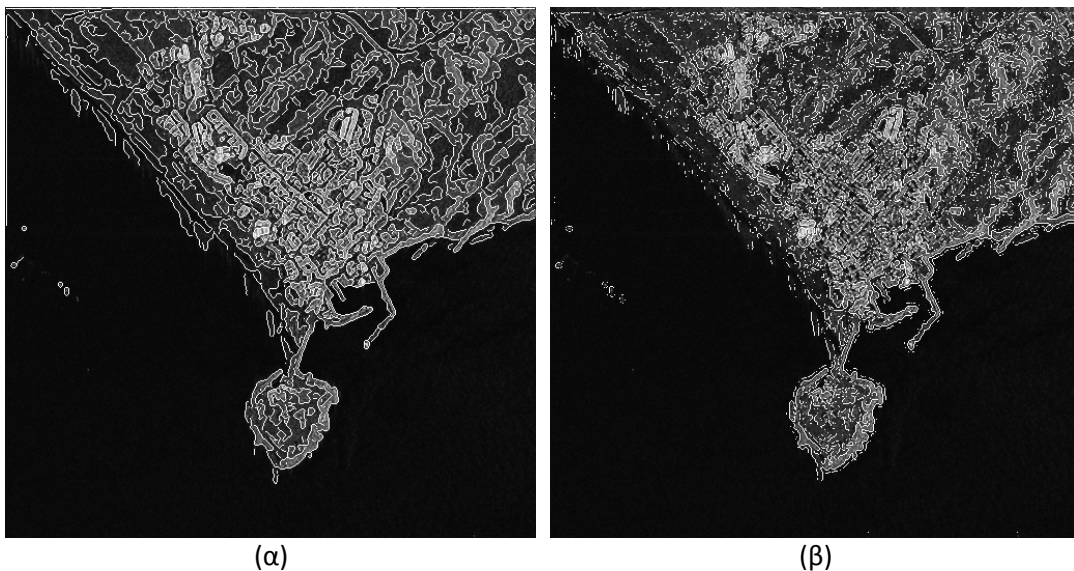
- **Συνδυασμός Ανισοτροπικής Διάχυσης ALM και Μορφολογικής Εξομάλυνσης**

Όπως και στις προηγούμενες εφαρμογές, η μορφολογική εξομάλυνση λειτουργεί επικουρικά στην ενίσχυση των ακμών με την ALM, επιτυγχάνοντας μεγαλύτερη ομαλοποίηση. Ωστόσο, και σε αυτή την εφαρμογή είναι δύσκολο να αποφανθεί κανείς για την καταλληλότητα της συγκεκριμένης μεθοδολογίας έναντι της αποκλειστικής χρήσης της ALM. Η αξιολόγηση και σύγκριση των δύο παρατίθεται στο επόμενο εδάφιο, θέτοντας κριτήρια πληρότητας, ορθότητας και ποιότητας. Έπειτα από πληθώρα συνδυασμών, τα καλύτερα αποτελέσματα δόθηκαν έπειτα από 100 επαναλήψεις ALM και 10 επαναλήψεις ML (εικόνα 3.153).



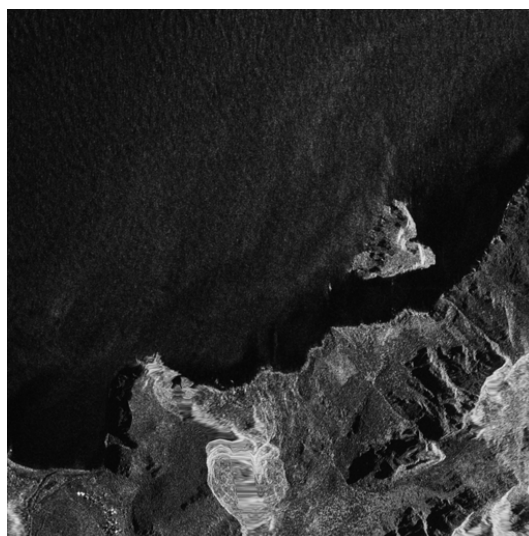
Εικόνα 3.153: (α) 8^η Εφαρμογή, ALM 100 επαναλήψεων, (β) 8^η Εφαρμογή, ALM 100 επαναλήψεων και ML 10 επαναλήψεων.

Τέλος, στην εικόνα 3.154 φαίνεται η διαφοροποίηση του τελεστή Canny σε σχέση με το μορφολογικό Laplace, όπως αυτός υλοποιήθηκε. Η ανίχνευση των ακμών πραγματοποιήθηκε στη φιλτραρισμένη, έπειτα από 20 επαναλήψεις ALM και 5 επαναλήψεις ML, εικόνα. Οι παρατηρήσεις για τους δύο τελεστές είναι οι ίδιες με αυτές που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες εφαρμογές.



Εικόνα 3.154: 8^η Εφαρμογή, ALM 20 επαναλήψεων και ML 5 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.

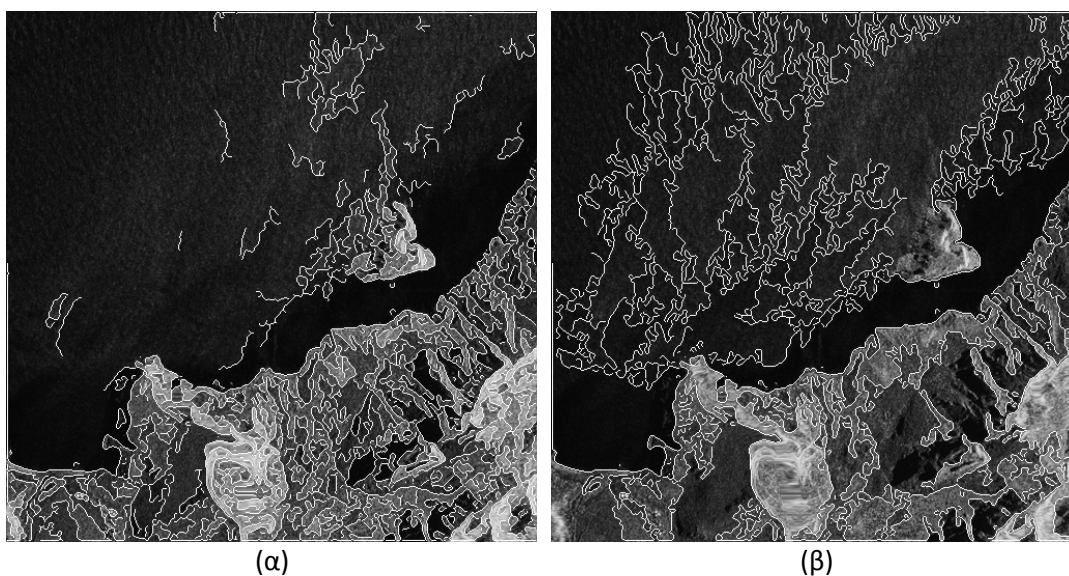
3.2.2.9 9^η Εφαρμογή (ASF, PM, ALM, ML, PM&ML, ALM&ML)



Εικόνα 3.155: 9^η Εφαρμογή, απεικόνιση TERRASAR-X.

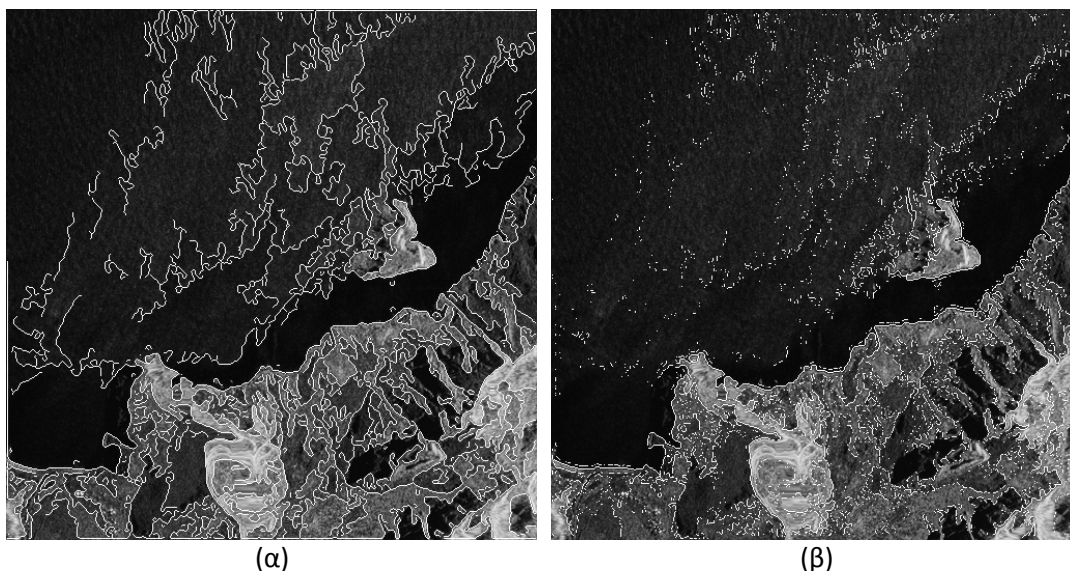
- **Σειριακό Εναλλασσόμενο Φιλτράρισμα, ASF**

Κατά την εφαρμογή σειριακού εναλλασσόμενου φιλτραρίσματος, παρατηρήθηκε ότι τα καλύτερα αποτελέσματα δίνονται έπειτα από 3 επαναλήψεις, σε σύνολο 31 επαναλήψεων. Τα **προβλήματα** που εντοπίστηκαν για μεγαλύτερο αριθμό επαναλήψεων είναι τα εξής: **(α)** εμφάνιση ακμών στη θαλάσσια περιοχή και **(β)** ανίχνευση βασικών ακμών στην ξηρά, και παρουσιάζονται στις επισυναπτόμενες εικόνες. Σημειώνεται ότι η ανίχνευση των ακμών έγινε με τον τελεστή Canny.



Εικόνα 3.156: (α) 9^η Εφαρμογή, ASF 3 επαναλήψεων, (β) 9^η Εφαρμογή, ASF 31 επαναλήψεων.

Τέλος, στην εικόνα 3.157 φαίνεται η διαφοροποίηση του τελεστή Canny σε σχέση με το μορφολογικό Laplace, όπως αυτός υλοποιήθηκε. Η ανίχνευση των ακμών πραγματοποιήθηκε στη φιλτραρισμένη, έπειτα από 11 επαναλήψεις ASF, εικόνα. Οι παρατηρήσεις για τους δύο τελεστές είναι οι ίδιες με αυτές που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες εφαρμογές.

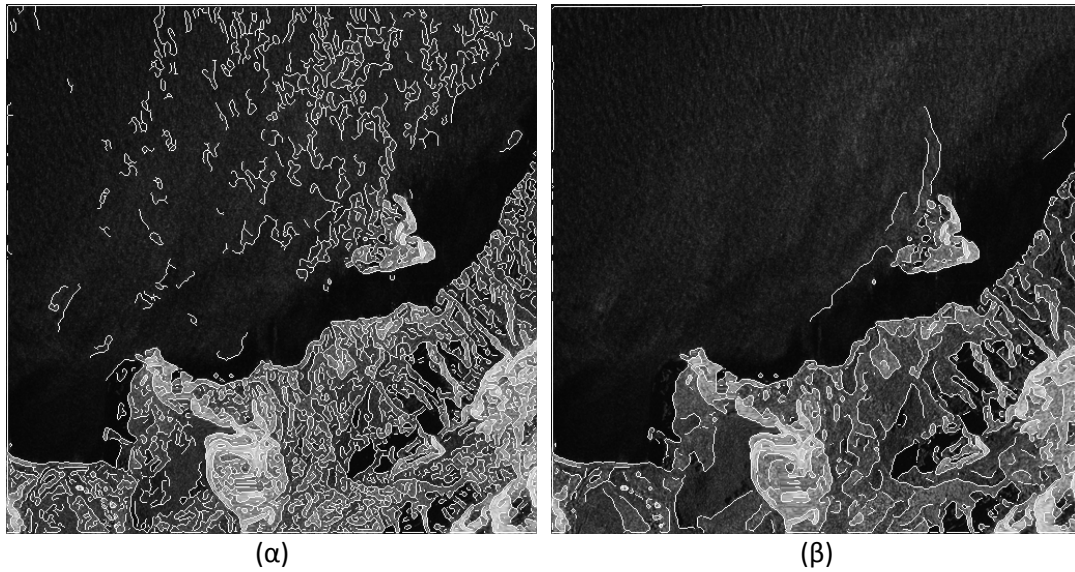


Εικόνα 3.157: 9^η Εφαρμογή, ASF 11 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.

Σημειώνεται ότι τα βασικότερα προβλήματα που παρουσιάστηκαν σε όλα τα στάδια της μεθοδολογίας είναι η εμφάνιση σκιών στην εικόνα, με αποτέλεσμα να παρουσιάζονται δυσκολίες ως προς τη διατήρηση της αληθούς θέσης της ακτογραμμής (βλ. κεφάλαιο 4).

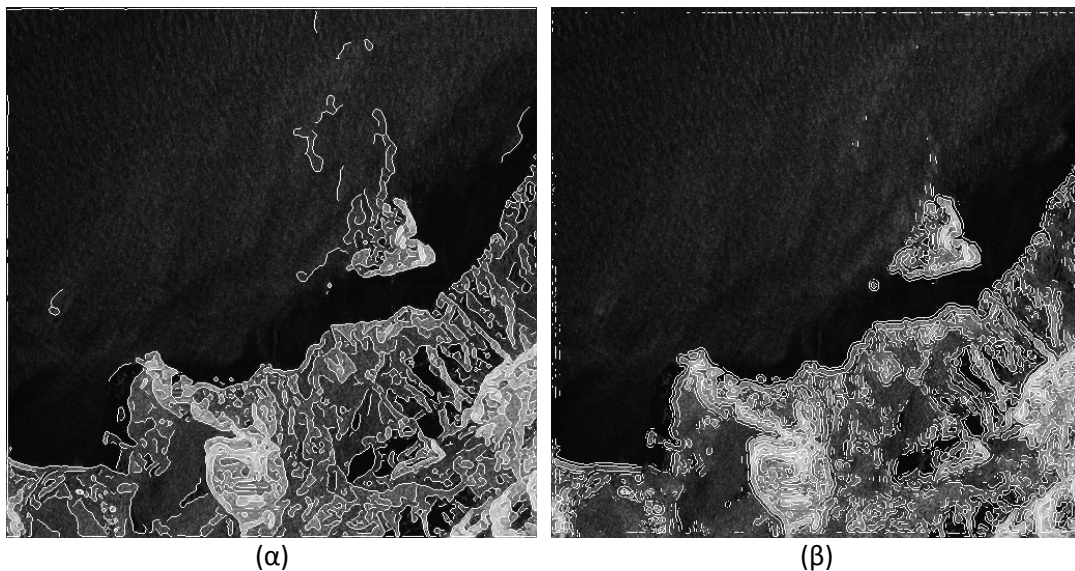
- **Ανισοτροπική Διάχυση PM**

Κατά την εφαρμογή ανισοτροπικής διάχυσης PM παρατηρήθηκε ότι με την αύξηση του αριθμού των επαναλήψεων – σε σύνολο 41 επαναλήψεων – διατηρούνται μόνο οι βασικές ακμές της εικόνας, το οποίο παρατηρείται και στις επισυναπτόμενες εικόνες.



Εικόνα 3.158: (α) 9^η Εφαρμογή, PM 1 επανάληψης, (β) 9^η Εφαρμογή, PM 41 επαναλήψεων. Παράδειγμα μη σύγκλισης αλγορίθμου.

Στην εικόνα 3.159 φαίνεται η διαφοροποίηση του τελεστή Canny σε σχέση με το μορφολογικό Laplace, όπως αυτός υλοποιήθηκε. Η ανίχνευση των ακμών πραγματοποιήθηκε στη φιλτραρισμένη, έπειτα από 11 επαναλήψεις PM, εικόνα. Οι παρατηρήσεις για τους δύο τελεστές είναι οι ίδιες με αυτές που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες εφαρμογές.

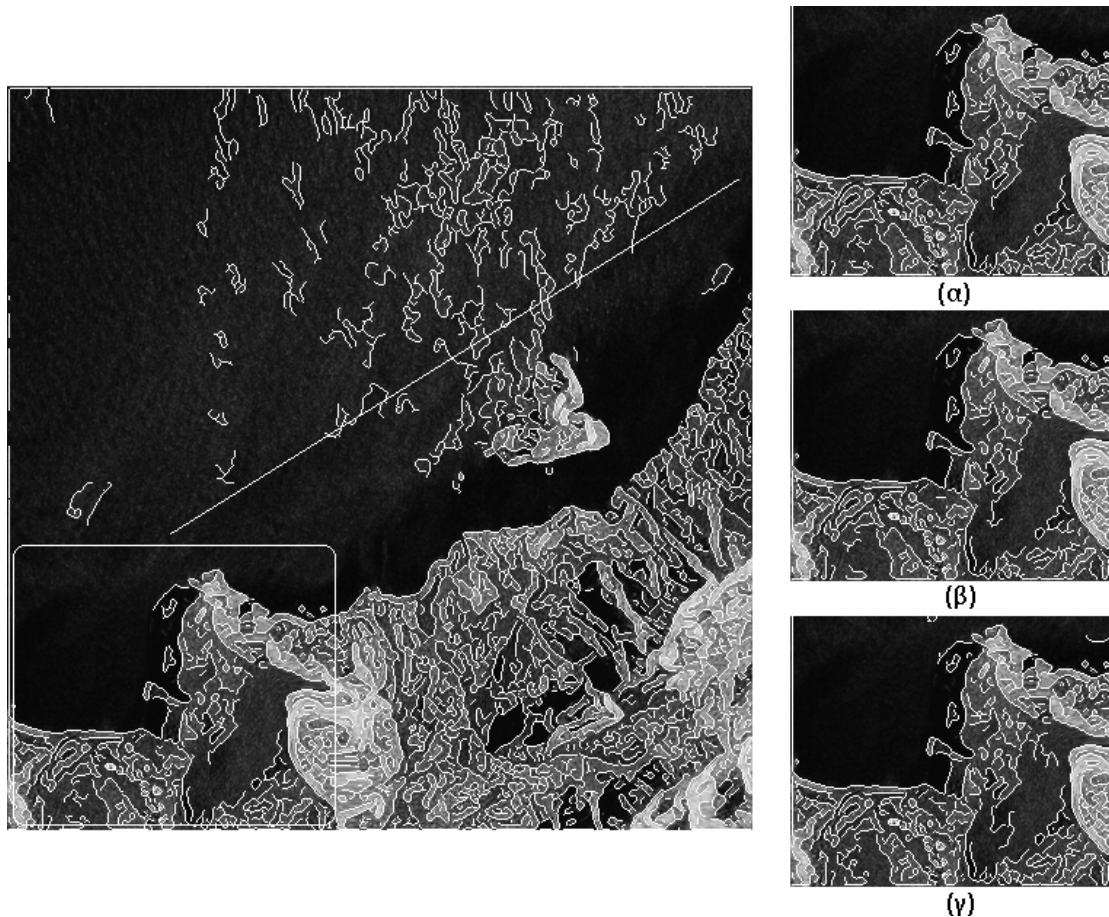


Εικόνα 3.159: 9^η Εφαρμογή, PM 11 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.

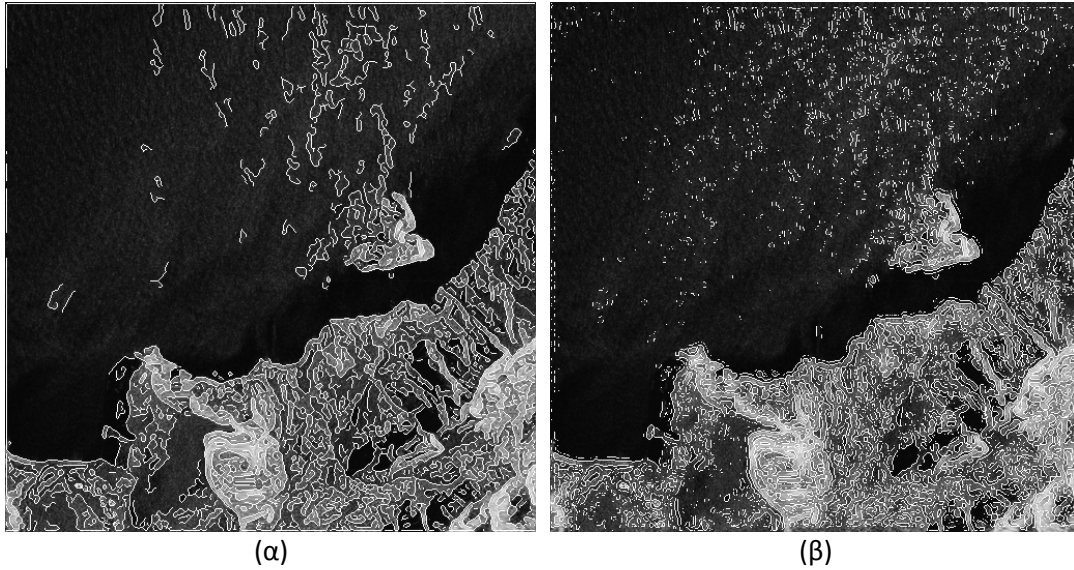
• **Ανισοτροπική Διάχυση ALM**

Όπως τονίστηκε και στις προηγούμενες εφαρμογές, εν αντιθέσει με την PM ανισοτροπική διάχυση, κατά την εφαρμογή της ALM παρατηρήθηκε ότι ακόμα και σε έντονο φιλτράρισμα ο αλγόριθμος διατηρεί πιστά τις μεταβολές των τιμών φωτεινότητας της αρχικής εικόνας, κι επομένως τη γεωμετρία των αντικειμένων. Αυτό φαίνεται χαρακτηριστικά στην εικόνα 3.160, έπειτα από εφαρμογή του αλγορίθμου για 1, 100 και 300 επαναλήψεις, σε τμήμα της αρχικής εικόνας.

Κατά την εφαρμογή της ALM ανισοτροπικής διάχυσης παρατηρήθηκε ότι τα καλύτερα αποτελέσματα δίνονται έπειτα από 300 επαναλήψεις. Τέλος, στην εικόνα 3.161 φαίνεται η διαφοροποίηση του τελεστή Canny σε σχέση με το μορφολογικό Laplace, όπως αυτός υλοποιήθηκε. Η ανίχνευση των ακμών πραγματοποιήθηκε στη φιλτραρισμένη, έπειτα από 100 επαναλήψεις ALM, εικόνα. Οι παρατηρήσεις για τους δύο τελεστές είναι οι ίδιες με αυτές που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες εφαρμογές.



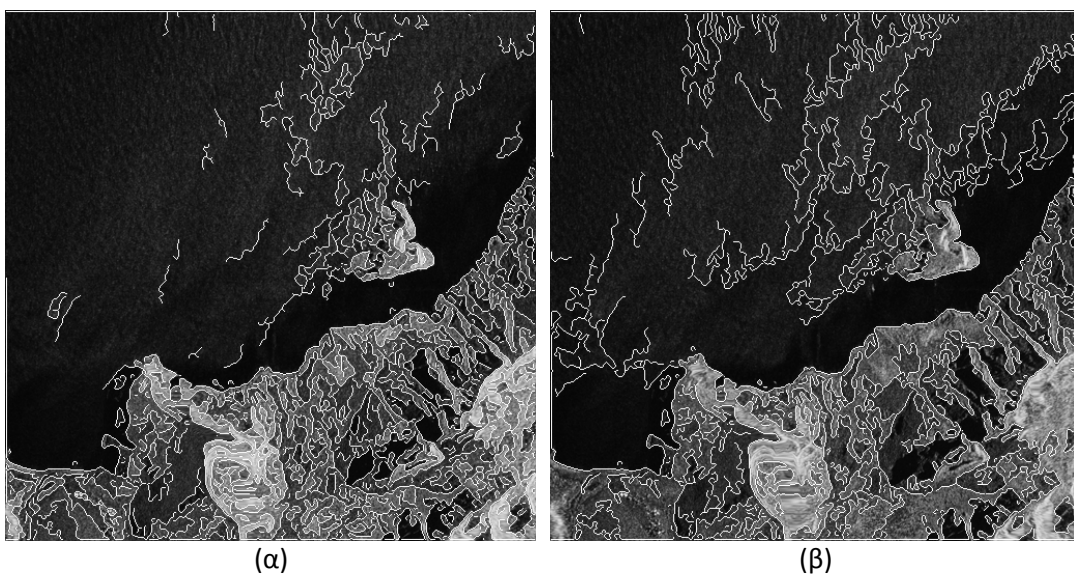
Εικόνα 3.160: 9^η Εφαρμογή, ανισοτροπική διάχυση ALM (α) 1 επανάληψης, (β) 100 επαναλήψεων, (γ) 300 επαναλήψεων, σε τμήμα της αρχικής εικόνας.



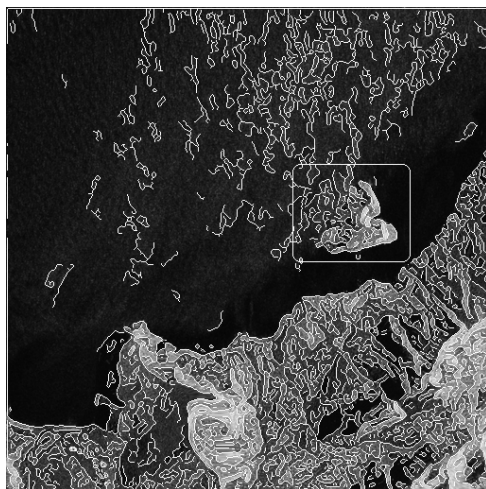
Εικόνα 3.161: 9^η Εφαρμογή, ALM 100 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών σε τμήμα της αρχικής εικόνας (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.

- **Μορφολογική Εξομάλυνση, ML**

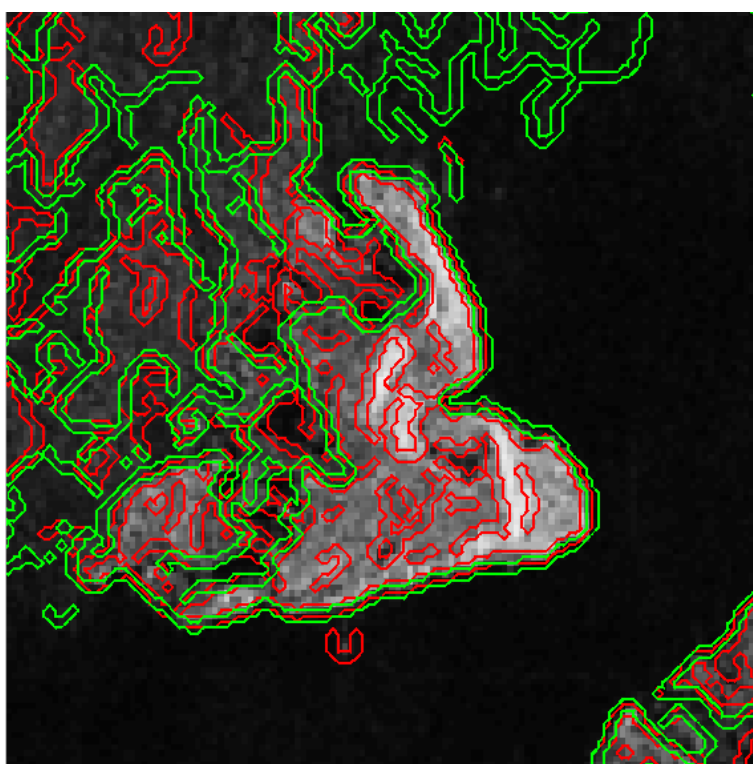
Κατά την εφαρμογή μορφολογικής εξομάλυνσης, παρατηρήθηκε ότι τα καλύτερα αποτελέσματα δίνονται έπειτα από 6 επαναλήψεις, σε σύνολο 46 επαναλήψεων. Τα **προβλήματα** που εντοπίστηκαν για μεγαλύτερο αριθμό επαναλήψεων είναι τα εξής: **(α)** μετατόπιση περιγραμμάτων, **(β)** εξάρτηση της μεθόδου από τους γκαουσιανούς σηματοδευτές και **(γ)** εμφάνιση πολλών ακμών στη θαλάσσια περιοχή, και παρουσιάζονται στις επισυναπτόμενες εικόνες. Στην εικόνα 3.163(β) σημειώνεται η μετατόπιση των περιγραμμάτων, έπειτα από μορφολογική εξομάλυνση 1 και 46 επαναλήψεων (κόκκινο και πράσινο χρώμα, αντίστοιχα), στο μαρκαρισμένο τμήμα της εικόνας 3.163(α).



Εικόνα 3.162: 9^η Εφαρμογή, ML (α) 6 επαναλήψεων, (β) 46 επαναλήψεων.



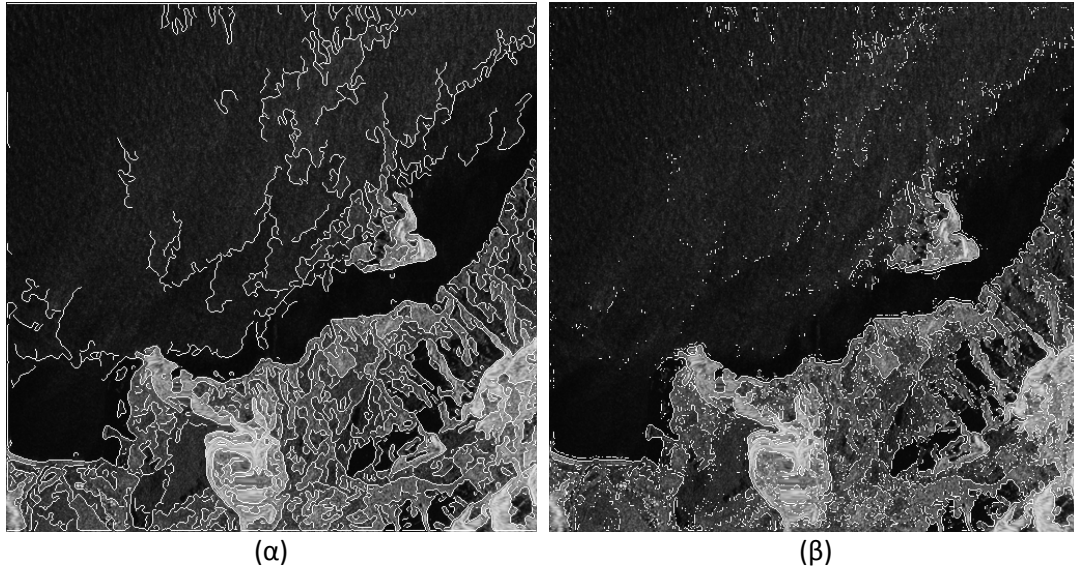
(α)



(β)

Εικόνα 3.163: 9^η Εφαρμογή, (α) αρχική εικόνα, (β) σύγκριση ανίχνευσης ακμών με τον τελεστή Canny έπειτα από φιλτράρισμα 1 και 46 επαναλήψεων (κόκκινο και πράσινο χρώμα, αντίστοιχα). Παρατηρείται μετατόπιση των περιγραμμάτων.

Τέλος, στην εικόνα 3.164 φαίνεται η διαφοροποίηση του τελεστή Canny σε σχέση με το μορφολογικό Laplace, όπως αυτός υλοποιήθηκε. Η ανίχνευση των ακμών πραγματοποιήθηκε στη φιλτραρισμένη, έπειτα από 16 επαναλήψεις ML, εικόνα. Οι παρατηρήσεις για τους δύο τελεστές είναι οι ίδιες με αυτές που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες εφαρμογές.

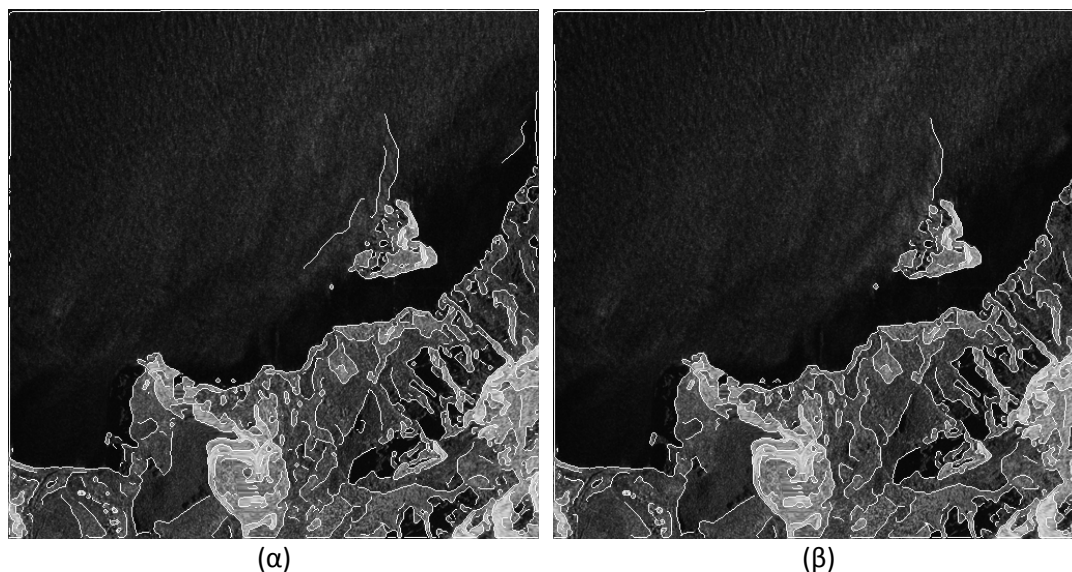


Εικόνα 3.164: 9^η Εφαρμογή, ML 16 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.

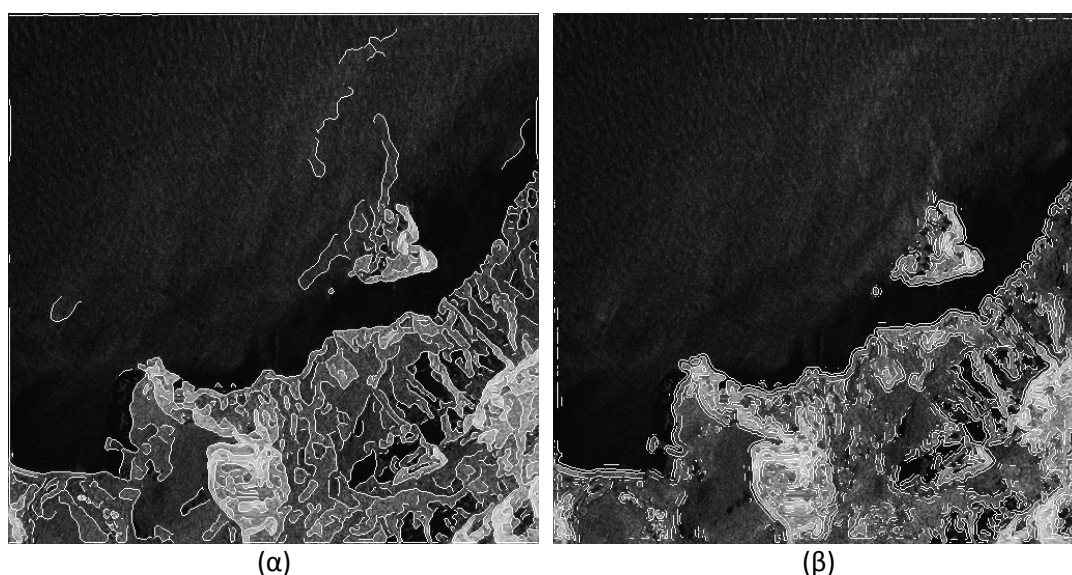
- **Συνδυασμός Ανισοτροπικής Διάχυσης PM και Μορφολογικής Εξομάλυνσης**

Έχει ήδη σημειωθεί ότι στο συνδυασμό της PM ανισοτροπικής διάχυσης με τη μορφολογική εξομάλυνση ενυπάρχουν τα προβλήματα μη σύγκλισης της PM – αν και η ML επιτυγχάνει το στόχο της, παρότι εξαρτημένη από τους γκαουσιανούς σηματοδευτές. Αυτό παρατηρείται και στην εικόνα 3.165 όπου παρατίθενται δύο παραδείγματα εφαρμογής της PM έπειτα από 50 επαναλήψεις (3.165(α)) και της PM 50 επαναλήψεων σε συνδυασμό με μορφολογική εξομάλυνση 5 επαναλήψεων (3.165(β)).

Τέλος, στην εικόνα 3.166 φαίνεται η διαφοροποίηση του τελεστή Canny σε σχέση με το μορφολογικό Laplace, όπως αυτός υλοποιήθηκε. Η ανίχνευση των ακμών πραγματοποιήθηκε στη φιλτραρισμένη, έπειτα από 20 επαναλήψεις PM και 5 επαναλήψεις ML, εικόνα. Οι παρατηρήσεις για τους δύο τελεστές είναι οι ίδιες με αυτές που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες εφαρμογές.



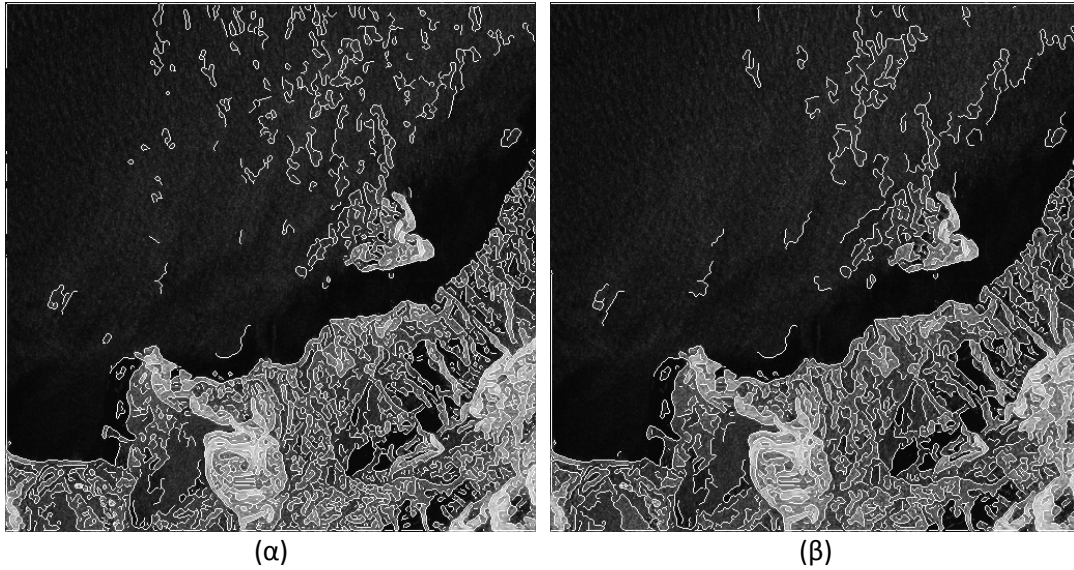
Εικόνα 3.165: (α) 9^η Εφαρμογή, PM 50 επαναλήψεων, (β) 9^η Εφαρμογή, PM 50 επαναλήψεων και ML 5 επαναλήψεων.



Εικόνα 3.166: 9^η Εφαρμογή, PM 20 επαναλήψεων και ML 5 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.

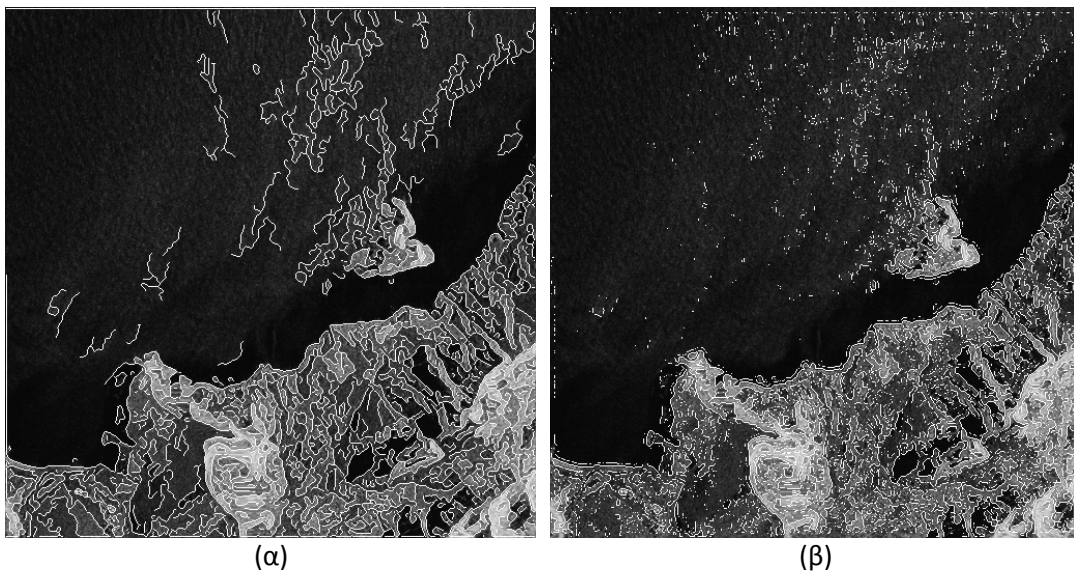
- **Συνδυασμός Ανισοτροπικής Διάχυσης ALM και Μορφολογικής Εξομάλυνσης**

Όπως και στις προηγούμενες εφαρμογές, η μορφολογική εξομάλυνση λειτουργεί επικουρικά στην ενίσχυση των ακμών με την ALM, επιτυγχάνοντας μεγαλύτερη ομαλοποίηση. Ωστόσο, και σε αυτή την εφαρμογή είναι δύσκολο να αποφανθεί κανείς για την καταλληλότητα της συγκεκριμένης μεθοδολογίας έναντι της αποκλειστικής χρήσης της ALM. Η αξιολόγηση και σύγκριση των δύο παρατίθεται στο επόμενο εδάφιο, θέτοντας κριτήρια πληρότητας, ορθότητας και ποιότητας. Έπειτα από πληθώρα συνδυασμών, τα καλύτερα αποτελέσματα δόθηκαν έπειτα από 300 επαναλήψεις ALM και 5 επαναλήψεις ML (εικόνα 3.167).



Εικόνα 3.167: (α) 9^η Εφαρμογή, ALM 300 επαναλήψεων, (β) 9^η Εφαρμογή, ALM 300 επαναλήψεων και ML 5 επαναλήψεων.

Τέλος, στην εικόνα 3.168 φαίνεται η διαφοροποίηση του τελεστή Canny σε σχέση με το μορφολογικό Laplace, όπως αυτός υλοποιήθηκε. Η ανίχνευση των ακμών πραγματοποιήθηκε στη φιλτραρισμένη, έπειτα από 50 επαναλήψεις ALM και 5 επαναλήψεις ML, εικόνα. Οι παρατηρήσεις για τους δύο τελεστές είναι οι ίδιες με αυτές που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες εφαρμογές.



Εικόνα 3.168: 9^η Εφαρμογή, ALM 50 επαναλήψεων και ML 5 επαναλήψεων. Ανίχνευση ακμών (α) με τον τελεστή Canny, (β) με το μορφολογικό Laplace τελεστή.

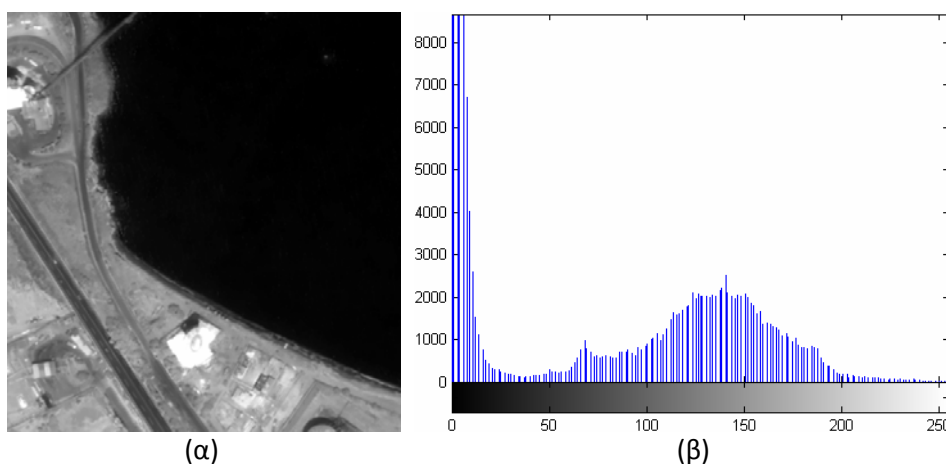
Συνοψίζοντας, κατά την προ-επεξεργασία των απεικονίσεων εφαρμόστηκαν όλες οι τεχνικές ομαλοποίησης και ενίσχυσης των ακμών που παρουσιάστηκαν. Η ανίχνευση των ακμών έγινε με τον Canny και το μορφολογικό Laplace. Έπειτα από την ποιοτική αξιολόγησή τους που προηγήθηκε, προέκυψε ότι οι βέλτιστες τεχνικές

προ-επεξεργασίας είναι η ανιστροπική διάχυση ALM, καθώς και ο συνδυασμός της με ένα μικρό αριθμό επαναλήψεων μορφολογικής εξομάλυνσης. Για την ανίχνευση των ακμών προτιμάται ο τελεστής Canny. Σημειώνεται ότι στο επόμενο εδάφιο αξιολογούνται και οι δυο τεχνικές, με κριτήρια πληρότητας, ορθότητας και ποιότητας.

3.2.3 Επεξεργασία δεδομένων

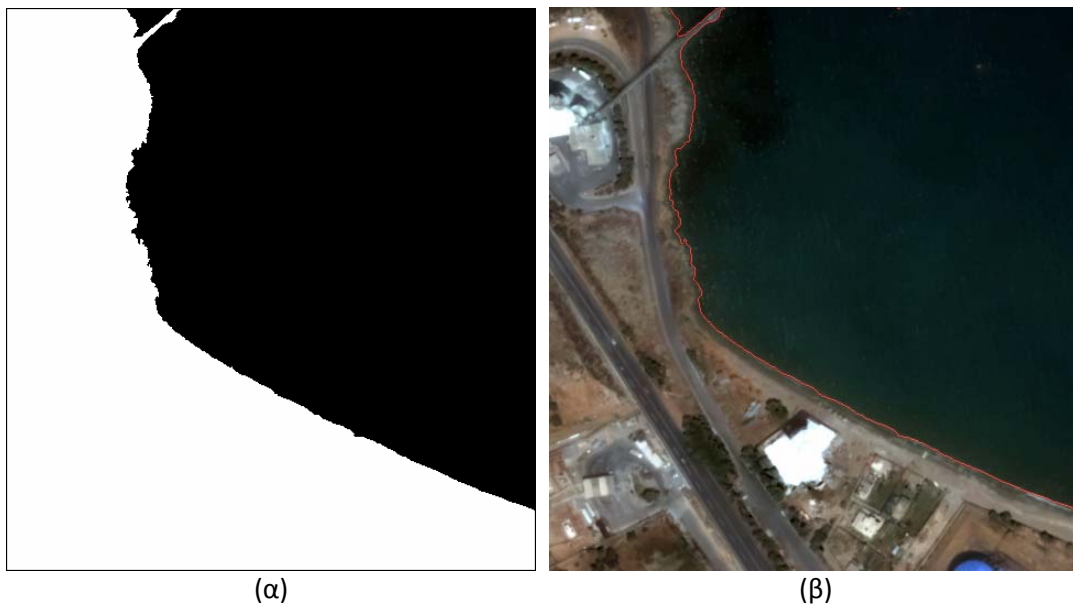
Επειδή οι τελεστές ανίχνευσης ακμών είναι ευαίσθητοι σε όλες τις εναλλαγές των τιμών φωτεινότητας στο πεδίο της εικόνας, οδηγούν και στην ανίχνευση μη επιθυμητών ή μη πραγματικών ακμών. Αυτό αποτελεί και το βασικό πρόβλημα στην ανίχνευση μιας ακτογραμμής – δηλαδή η αφαίρεση όλων των υπολοίπων ανεπιθύμητων ακμών, εκτός της ακτογραμμής – πρόβλημα τα οποίο λύνεται με τη μέτρηση της εναλλαγής της υφής, κατάτμηση, ταξινόμηση (classification) και συσταδοποίηση (clustering). Στο πλαίσιο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας εφαρμόστηκαν οι αλγόριθμοι **Κ-μέσου** (συσταδοποίηση) και **εντροπίας** (ανάλυση υφής), οι οποίοι υπάρχουν στο περιβάλλον του Matlab. Επιπλέον, για καλύτερη εποπτεία των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε και **κατωφλίωση** στεριάς – θάλασσας στο υπέρυθρο κανάλι, σε όσες απεικονίσεις διέθεταν. Υπενθυμίζεται ότι σύμφωνα με τους ευρωπαϊκούς κανονισμούς, ως ακτογραμμή ορίζεται «**η γραμμή που διαχωρίζει μια χερσαία επιφάνεια από έναν ωκεανό ή μια θάλασσα**», και αναφέρεται σε μια χωρικά συνεχή γραμμή επαφής (Boak και Turner, 2005).

Εφόσον στο υπέρυθρο κανάλι οι υδάτινες επιφάνειες παρουσιάζονται μαύρες λόγω απορρόφησης της ακτινοβολίας στα συγκεκριμένα μήκη κύματος του φάσματος, η χρήση κατωφλίωσης είναι μια πολύ απλή διαδικασία και γίνεται βάσει του ιστογράμματος της κάθε απεικόνισης. Η κατωφλίωση χρησιμοποιήθηκε μόνο στις εικόνες που διέθεταν υπέρυθρο κανάλι, δηλαδή στις εφαρμογές 1, 2, 3, 4 και 5. Για παράδειγμα, στην εικόνα 3.169 παρουσιάζεται η πρώτη εφαρμογή στο υπέρυθρο κανάλι, όπου απεικονίζεται τμήμα ακτής από το Ηράκλειο Κρήτης, και το ιστόγραμμα συχνοτήτων της.



Εικόνα 3.169: 1^η Εφαρμογή, (α) απεικόνιση QUICKBIRD στο εγγύς υπέρυθρο κανάλι, (β) το ιστόγραμμα συχνοτήτων της απεικόνισης.

Οι δύο «καμπάνες» του ιστογράμματος παρουσιάζουν την κατανομή των τιμών φωτεινότητας στην υδάτινη και τη χερσαία επιφάνεια, αντίστοιχα. Επομένως, το κατάλληλο κατώφλι ορίζεται στην τιμή 40, που εκτιμάται ως οριακή τιμή φωτεινότητας για τη θαλάσσια περιοχή. Ωστόσο, δοκιμάστηκαν και άλλες τιμές φωτεινότητας για την επιλογή κατάλληλου κατωφλίου. Τελικά, η δυαδική εικόνα που προέκυψε καθώς και η θέση της ακτογραμμής, παρουσιάζονται στην εικόνα 3.170. Σημειώνεται ότι η ακτογραμμή που προέκυψε από την κατωφλίωση και παρουσιάζεται στην εικόνα 3.170(β) δεν είναι η τελική θέση της ακτογραμμής – όπως αυτή ανιχνεύτηκε με τον τελεστή Canny στο προηγούμενο στάδιο – ωστόσο θα χρησιμοποιηθεί για την αφαίρεση των ανεπιθύμητων ακμών.



Εικόνα 3.170: 1^η Εφαρμογή, (α) διαχωρισμός χερσαίας-υδάτινης επιφάνειας έπειτα από κατωφλίωση (δυαδική εικόνα), (β) υπέρθεση ακτογραμμής στην αρχική απεικόνιση έπειτα από κατωφλίωση.

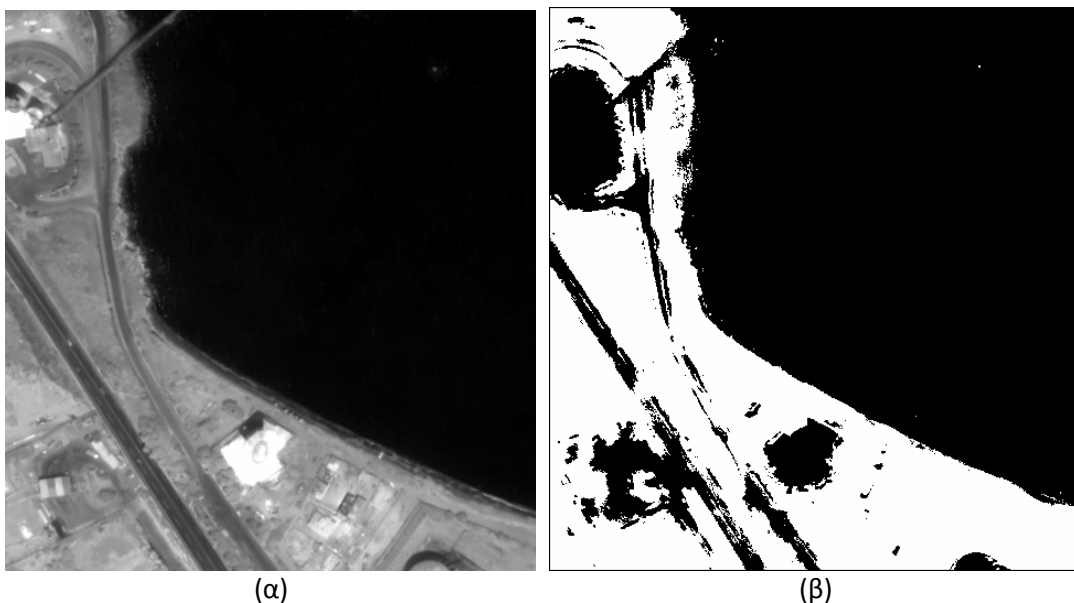
Αντίστοιχα, και στις υπόλοιπες απεικονίσεις που διέθεταν υπέρυθρο κανάλι έγινε διαχωρισμός χερσαίων – υδάτινων επιφανειών με χρήση κατωφλίωσης βάσει του ιστογράμματος. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον επόμενο εδάφιο. Ωστόσο, πρέπει να τονιστεί ότι αναζητάται μια κατά το δυνατόν ενιαία τεχνική για δεδομένα ίδιων χαρακτηριστικών. Η χρήση κατωφλίωσης παραμένει μια χρονοβόρα διαδικασία ως προς την επιλογή κατάλληλου κατωφλίου. Προς αυτή την κατεύθυνση χρησιμοποιήθηκαν η K-μέσου συσταδοποίηση και η μέτρησης της υφής με χρήση της εντροπίας. Οι τεχνικές αυτές – όπως και η κατωφλίωση – εφαρμόστηκαν στις αρχικές εικόνες και όχι στις ομαλοποιημένες.

Η K-μέσου συσταδοποίηση από το περιβάλλον του Matlab εκτελείται με την εντολή *'kmeans'*. Σε προηγούμενο εδάφιο έχει αναφερθεί ότι στην K-μέσου συσταδοποίηση υπολογίζονται οι ευκλείδειες αποστάσεις. Επιπλέον, απαιτείται η μετατροπή της οποιασδήποτε εικόνας εισόδου στην κλίμακα $L*a*b^*$, η οποία διευκολύνει την ποσοτικοποίηση οπτικών διαφορών (π.χ. πόσα χρώματα μπορεί κανείς να ξεχωρίσει σε μια εικόνα). Η κλίμακα $L*a*b^*$ αποτελείται από το επίπεδο φωτεινότητας L^* , το

επίπεδο χρωματικότητας 'a*' το οποίο υποδηλώνει πού βρίσκεται το χρώμα στον άξονα κόκκινου – πράσινου, και το επίπεδο χρωματικότητας 'b*' το οποίο υποδηλώνει πού βρίσκεται το χρώμα στον άξονα μπλε – κίτρινου. Επειδή η μετατροπή στη συγκεκριμένη κλίμακα απαιτεί δεδομένα εισόδου τριών διαστάσεων (π.χ. XYZ, RGB), αρχικά δημιουργήθηκε ένας πίνακας $M \times N \times 3$, μόνο με το υπέρυθρο κανάλι και 2 μηδενικούς πίνακες.

Έπειτα από τη μετατροπή στη χρωματική κλίμακα $L^*a^*b^*$ με τις εντολές 'makecform' και 'applycform', εκτελείται η K-μέσου συσταδοποίηση στα επίπεδα 'a*b*' όπου υπάρχει η πληροφορία του χρώματος. Εκτός της εικόνας στην οποία θα γίνει η συσταδοποίηση και του αριθμού των κλάσεων, ο χρήστης μπορεί να ορίσει κι τις παραμέτρους εισόδου στην εντολή 'kmeans', όπως τη μέτρηση της απόστασης και τις επαναλήψεις εκτέλεσης της συσταδοποίησης. Η χρήση K-μέσου συσταδοποίησης έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία κλάσεων σε μια εικόνα βάσει των τιμών φωτεινότητας των εικονοστοιχείων της. Οι κλάσεις αυτές, ανάλογα με τον αριθμό τους, έχουν μια τιμή (label) – π.χ. 1, 2, 3 στην περίπτωση τριών κλάσεων. Τα αποτελέσματα της συσταδοποίησης περιλαμβάνουν την κλάση που ανήκει κάθε εικονοστοιχείο (δηλώνεται με την τιμή – label κάθε κλάσης) και το εκάστοτε κεντροειδές. Χρησιμοποιώντας την τιμή – label κάθε κλάσης, είναι δυνατός ο διαχωρισμός χερσαίων – υδάτινων επιφανειών.

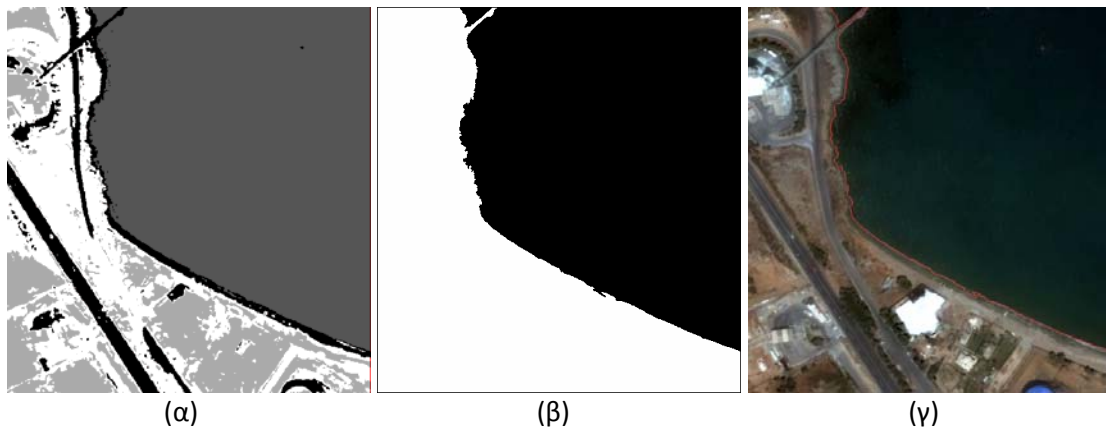
Ωστόσο, το βασικό πρόβλημα με τον αλγόριθμο K-μέσου του Matlab ήταν η τυχαιότητα επιλογής του πρώτου εικονοστοιχείου. Επειδή ο συγκεκριμένος αλγόριθμος συσταδοποίησης κάθε φορά που εφαρμόζεται ξεκινά από ένα τυχαίο εικονοστοιχείο, αυτό είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία διαφορετικών κλάσεων έπειτα από κάθε εφαρμογή (δηλαδή διαφορετικής τιμής – label για την ίδια κλάση). Επίσης, η επιλογή δύο μόνο κλάσεων δεν είχε σωστά αποτελέσματα. Για παράδειγμα, η συσταδοποίηση σε δύο κλάσεις της πρώτης εφαρμογής έχει τα παρακάτω αποτελέσματα.



Εικόνα 3.171: 1^η Εφαρμογή, (α) απεικόνιση QUICKBIRD στο εγγύς υπέρυθρο κανάλι, (β) συσταδοποίηση K-μέσου σε δύο κλάσεις.

Ως εκ τούτου, υλοποιήθηκε ένας νέος αλγόριθμος που να λύνει το συγκεκριμένο πρόβλημα. Με βάσει το γεγονός ότι στο υπέρυθρο κανάλι η θάλασσα χαρακτηρίζεται από σχεδόν ενιαίες τιμές φωτεινότητας πολύ κοντά στο 0, αποτελεί μια υπερ-κλάση, κι επομένως θα έχει τα περισσότερα εικονοστοιχεία. Επομένως, ανεξάρτητα από τον αριθμό και την τιμή – label των κλάσεων, καθώς και από την επανάληψη του αλγορίθμου, **η κλάση με τα περισσότερα εικονοστοιχεία θα είναι η υδάτινη επιφάνεια** και όλες οι υπόλοιπες κλάσεις αποτελούν τη χερσαία επιφάνεια. Η παρατήρηση αυτή ισχύει για τα συγκεκριμένα τηλεπισκοπικά δεδομένα. Έτσι, προκύπτουν δύο μόνο κλάσεις σε μια δυαδική εικόνα, στην οποία είναι δυνατή περαιτέρω επεξεργασία. Στις εφαρμογές που δεν ήταν διαθέσιμο υπέρυθρο κανάλι (εφαρμογές 6 και 7), χρησιμοποιήθηκε το κόκκινο, επειδή το νερό σε αυτό έχει χαμηλή ανακλαστικότητα και παρουσιάζεται με σκούρους τόνους του γκριζου (σχήμα 3.15). Στις SAR απεικονίσεις δεν προτείνονται τεχνικές επεξεργασίας βάσει των τιμών φωτεινότητας των εικονοστοιχείων, ωστόσο διερευνήθηκε η εφαρμογή της K-μέσου συσταδοποίησης σε αυτές.

Έπειτα από την εφαρμογή της συσταδοποίησης στην εκάστοτε απεικόνιση, το αποτέλεσμα είναι μια δυαδική εικόνα από την οποία η ακτογραμμή προκύπτει ως το όριο των δύο κλάσεων. Για παράδειγμα, παρατίθεται η πρώτη εφαρμογή έπειτα από συσταδοποίηση σε τέσσερις κλάσεις.



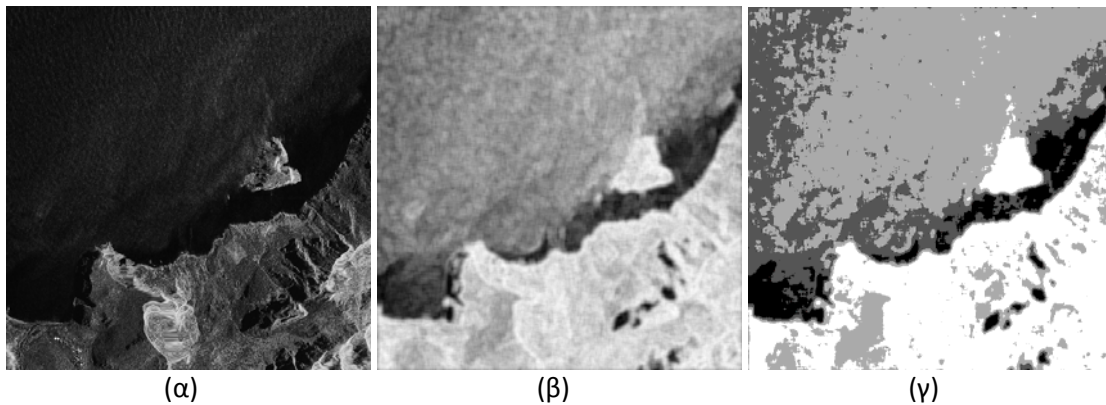
Εικόνα 3.172: 1^η Εφαρμογή, (α) συσταδοποίηση K-μέσου σε τέσσερις κλάσεις, (β) διαχωρισμός χερσαίας-υδάτινης επιφάνειας σε δύο κλάσεις, (γ) υπέρθεση ακτογραμμής στην αρχική απεικόνιση έπειτα από συσταδοποίηση K-μέσου.

Η ακτογραμμή που προκύπτει έπειτα από τη συσταδοποίηση – ομοίως με την κατωφλίωση – χρησιμοποιείται σε επόμενο στάδιο για την εξαγωγή της τελικής θέσης της ακτογραμμής, και περιγράφεται παρακάτω. Σημειώνεται ότι τα αποτελέσματα της συσταδοποίησης για τις υπόλοιπες εφαρμογές παρουσιάζονται στο επόμενο εδάφιο.

Μια διαφορετική λύση στο πρόβλημα της ανίχνευσης μη επιθυμητών ή μη πραγματικών ακμών από τους τελεστές ανίχνευσης ακμών είναι η μέτρηση της εναλλαγής της υψής με χρήση της εντροπίας, η οποία αποτελεί μια στατιστική μέθοδο. Υπενθυμίζεται ότι κατά μία έννοια η εντροπία ενός μηνύματος είναι η μέτρηση της πληροφορίας που αληθινά εμπεριέχει. Δηλαδή, στην περίπτωση μιας

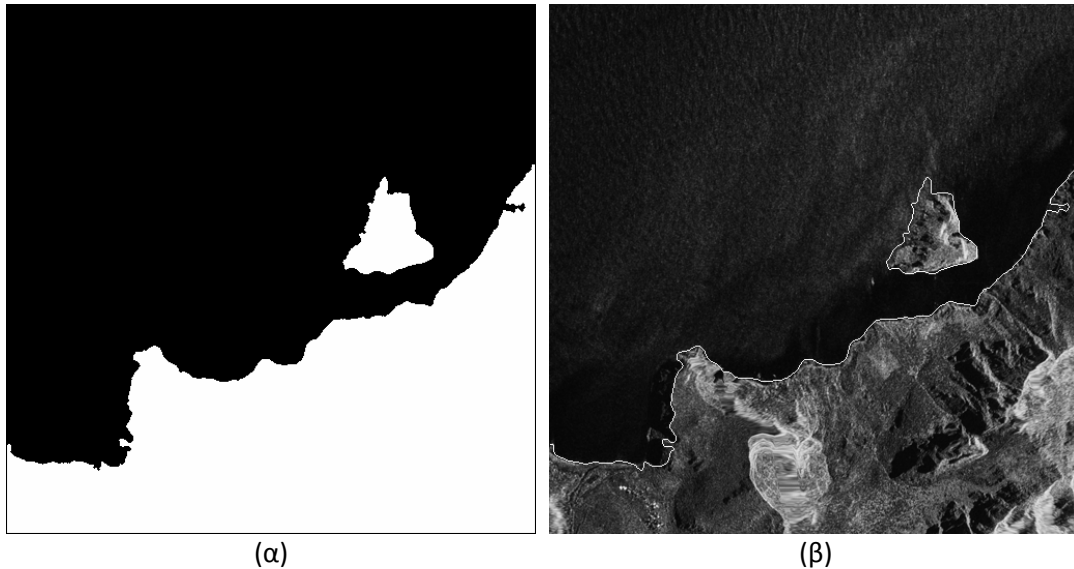
εικόνας, ο (θεωρητικά) ελάχιστος αριθμός bits/pixel (τιμή φωτεινότητας) που απαιτείται για την κωδικοποίησή της. Η μέτρηση της εντροπίας στο περιβάλλον του Matlab εκτελείται με την εντολή *'entropyfilt'*, σε εικόνες με τιμές φωτεινότητας στην κλίμακα του γκρι. Κάθε εικονοστοιχείο της εικόνας εξόδου περιέχει την τιμή της εντροπίας υπολογισμένη σε μια γειτονιά 9x9 εικονοστοιχείων, ωστόσο ο χρήστης μπορεί να ορίσει άλλο εύρος γειτονιάς.

Στη συνέχεια παρατίθεται παράδειγμα εφαρμογής της εντροπίας σε SAR εικόνα (9^η εφαρμογή). Στην εικόνα 3.173(β) φαίνεται η διαφορετική υφή των χερσαίων επιφανειών, καθώς και των υδάτινων με υψηλή και χαμηλή μεταβλητότητα. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι συγχώνευσης (fusion) της πληροφορίας από την ανίχνευση των ακμών και την ανάλυση υφής, η πολυπλοκότητα των οποίων δεν κατέστησε δυνατή την εφαρμογή τους στο πλαίσιο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας. Επομένως, διερευνήθηκε η δυνατότητα αξιοποίησης της εντροπίας ως μετρητικού μεγέθους με χρήση πολυεπίπεδης κατωφλίωσης (multilevel thresholding). Έτσι, για την ίδια εφαρμογή, η κατωφλίωση σε τέσσερα επίπεδα έδωσε τα παρακάτω αποτελέσματα.



Εικόνα 3.173: 9^η Εφαρμογή, (α) απεικόνιση TERRASAR-X, (β) ανάλυση υφής με μέτρηση της εντροπίας, (γ) κατωφλίωση τεσσάρων επιπέδων στην εικόνα υφής.

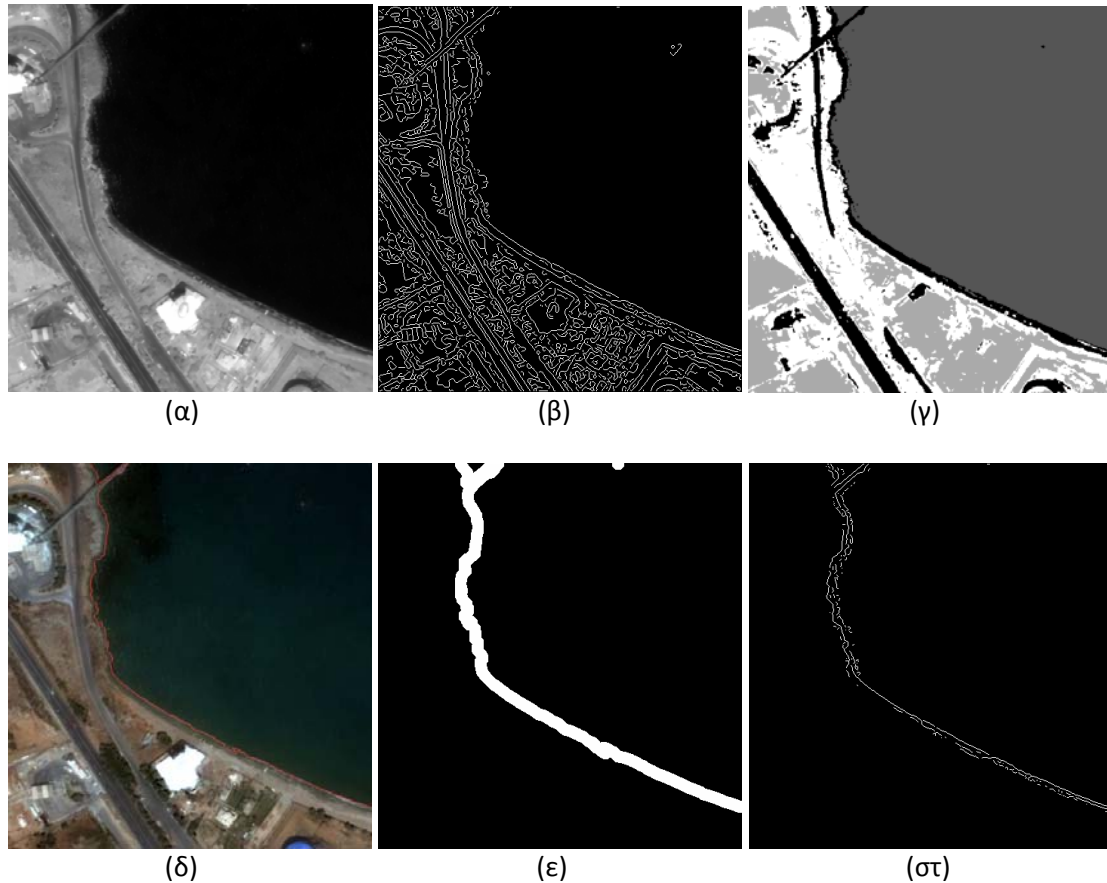
Χρησιμοποιώντας λειτουργίες μορφολογικής ανακατασκευής – διαφορετικές για την κάθε απεικόνιση – προκύπτει τελικά η δυαδική εικόνα χερσαίων – υδάτινων επιφανειών, και τελικά η θέση της ακτογραμμής (εικόνα 3.174). Αν και σε κάποιες εφαρμογές η μέτρηση της εντροπίας είχε καλά αποτελέσματα σύμφωνα με τα κριτήρια αξιολόγησης αλλά και με φωτοερμηνεία, η εξαγωγή της ακτογραμμής με συγχώνευση πληροφορίας είναι πολύ πιθανό να δίνει πολύ καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με την πολυεπίπεδη κατωφλίωση. Σημειώνεται ότι τα αποτελέσματα μέτρησης της εντροπίας για τις υπόλοιπες εφαρμογές παρουσιάζονται στο επόμενο εδάφιο.



Εικόνα 3.174: 9^η Εφαρμογή, (α) διαχωρισμός χερσαίας-υδάτινης επιφάνειας, (β) υπέρθεση ακτογραμμής στην αρχική απεικόνιση έπειτα από μέτρηση της εντροπίας.

Η ακτογραμμή που προκύπτει έπειτα από κατωφλίωση στο υπέρυθρο κανάλι, συσταδοποίηση Κ-μέσου και μέτρηση της εντροπίας δεν είναι η τελική θέση της ακτογραμμής. Σε αυτήν τέθηκε ένα εύρος ζώνης 3-25 εικονοστοιχείων, ανάλογα με την εφαρμογή. Το εκάστοτε εύρος εξαρτάται τόσο από τα αποτελέσματα των τεχνικών επεξεργασίας (κατωφλίωση, συσταδοποίηση, εντροπία) όσο και από την ανίχνευση των ακμών με τον Canny ή το μορφολογικό Laplace. Αναλυτικά τα αποτελέσματα παρατίθενται στο επόμενο εδάφιο, ωστόσο σημειώνεται ότι όσο πιο επιτυχείς είναι οι προαναφερθείσες τεχνικές – ως προς την πληρότητα, την ορθότητα και την ποιότητα των ακμών – τόσο μικρότερο είναι το εύρος ζώνης (έως 8 εικονοστοιχεία). Βεβαίως αυτό δεν είναι απαγορευτικό για την επιτυχία ή την αποτυχία της μεθοδολογίας ανά εφαρμογή.

Οι ακμές – που έχουν ανιχνευτεί με τον τελεστή Canny έπειτα από την προ-επεξεργασία των απεικονίσεων – εντός του εύρους ζώνης που έχει τεθεί στην εκάστοτε εφαρμογή, αποτελούν μια πρώτη προσέγγιση της τελικής θέσης της ακτογραμμής, η οποία βελτιώνεται εφαρμόζοντας εργαλεία μορφολογικής ανακατασκευής. Εφόσον από τον Canny και την επεξεργασία προκύπτουν δυαδικές εικόνες (0: υπόβαθρο, 1: ακμή), οι ζητούμενες ακμές θα είναι τα εικονοστοιχεία με άθροισμα 2 (1: οι ακμές που ανιχνεύονται με τον Canny + 1: οι ακμές που προκύπτουν κατά την επεξεργασία). Για παράδειγμα, παρατίθεται η πρώτη εφαρμογή στην οποία έχουν εφαρμοστεί η ανισοτροπική διάχυση ALM κατά την προ-επεξεργασία, ανίχνευση των ακμών με τον τελεστή Canny, αφαίρεση των ανεπιθύμητων ακμών με συσταδοποίηση Κ-μέσου σε τέσσερις κλάσεις και εύρος ζώνης 8 εικονοστοιχείων.



Εικόνα 3.175: 1^η Εφαρμογή, (α) απεικόνιση QUICKBIRD στο εγγύς υπέρυθρο κανάλι, (β) ανίχνευση ακμών με τον τελεστή Canny έπειτα από ALM 200 επαναλήψεων, (γ) συσταδοποίηση K-μέσου σε τέσσερις κλάσεις, (δ) υπέρθεση ακτογραμμής στην αρχική απεικόνιση έπειτα από συσταδοποίηση K-μέσου, (ε) εύρος ζώνης 8 εικονοστοιχείων στην ακτογραμμή που προκύπτει από τη συσταδοποίηση, (στ) διατήρηση των ακμών της (β) εντός του εύρους ζώνης με αποτέλεσμα την αφαίρεση πολλών ανεπιθύμητων ακμών.

3.2.4 Μετα-επεξεργασία δεδομένων

Η τελική θέση της ακτογραμμής προκύπτει, τελικά, χρησιμοποιώντας μορφολογικά εργαλεία. Ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή τα εργαλεία αυτά και οι συνδυασμοί τους ποικίλουν. Για παράδειγμα, η ανακατασκευή της ακτογραμμής του προηγούμενου παραδείγματος επιτυγχάνεται έπειτα από εφαρμογή των bwareaopen, imclose και bwareaopen, και παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 3.176: 1^η Εφαρμογή, (α) υπέρθεση των ακμών εντός του εύρους ζώνης (εικόνα 4.175(στ)) στην αρχική απεικόνιση, (β) τελική θέση ακτογραμμής.

Όπως παρατηρείται στην εικόνα 3.176(β) η θέση της ακτογραμμής βελτιώνεται σημαντικά, αφαιρώντας περισσότερες μικρές ακμές τόσο στην χερσαία όσο και στην υδάτινη περιοχή και παράλληλα διορθώνοντας κάποια κενά. Ωστόσο, επειδή οι ακμές δεν είναι συνεχείς και δεν ήταν δυνατή η αποκατάσταση αυτού του προβλήματος (π.χ. με παρεμβολή) λόγω προγραμματιστικής δυσκολίας, πολλές φορές αφαιρούνται και επιθυμητές ακμές που αποτελούν τμήματα της ακτογραμμής. Επίσης, λόγω του εύρους ζώνης, ανιχνεύονται και πολλές ακμές οι οποίες δεν μπορούν να αφαιρεθούν στη συνέχεια. Όλοι οι προβληματισμοί και οι δυσκολίες που ανέκυψαν ανά εφαρμογή αναλύονται στο κεφάλαιο 4.

3.2.5 Κριτήρια αξιολόγησης των εξαγόμενων αποτελεσμάτων

Για την αξιολόγηση του εξαγόμενου αποτελέσματος δεν αρκεί μόνο η φωτοερμηνεία. Οι Heipke et al. (1997) και Wiedemann et al. (1998) τονίζουν τη σημασία της **εξωτερικής αξιολόγησης** για οποιοδήποτε αυτοματοποιημένο σύστημα, βάσει της οποίας δίνεται προτεραιότητα σε ποσοτικοποιημένα αποτελέσματα ανεξάρτητα από τον ανθρώπινο παρατηρητή. Για την εξωτερική αξιολόγηση απαιτούνται δεδομένα αναφοράς τα οποία συγκρίνονται με τα εξαγόμενα αποτελέσματα. Η σύγκριση πραγματοποιείται «ταιριαζοντας» τα δεδομένα αναφοράς με τα εξαγόμενα αποτελέσματα χρησιμοποιώντας ένα εύρος ζώνης (buffer method). Κάθε ομόλογο εικονοστοιχείο που ανιχνεύεται μέσα σε αυτό το εύρος, θεωρείται «ταιριασμένο».

Για την αξιολόγηση της εξαγόμενης ακτογραμμής ορίζονται κάποιες ποιοτικές μετρήσεις. Οι μετρήσεις αυτές δεν στοχεύουν στην αξιολόγηση της εξαγόμενης ακτογραμμής σε σχέση με την ακτογραμμή αναφοράς με απόλυτο τρόπο, αλλά χρησιμοποιούνται για τη σύγκριση ενός εξαγόμενου αποτελέσματος που έχει

προκύψει με διαφορετικό τρόπο ή αλγορίθμους. Οι βιβλιογραφικά καθιερωμένοι δείκτες ποιότητας, ουσιαστικά απαντούν σε δύο ερωτήματα: (α) πόσο ολοκληρωμένο είναι το εξαγόμενο αποτέλεσμα – Completeness: δείκτης πληρότητας – και (β) πόσο ορθό είναι το αποτέλεσμα – Correctness: δείκτης ορθότητας.

Σε ψηφιδωτά δεδομένα οι δείκτες υπολογίζονται με βάση τον αριθμό των εικονοστοιχείων τα οποία έχουν σωστά ανιχνευτεί – χαρακτηρίζονται ως True Positives (TP) – τον αριθμό των εικονοστοιχείων που έχουν από λάθος του αλγορίθμου ανιχνευτεί – False Positives (FP) – και τον αριθμό των εικονοστοιχείων που από λάθος του αλγορίθμου δεν έχουν ανιχνευτεί – False Negatives (FN). Με βάση τις παραπάνω μετρήσεις υπολογίζονται σύμφωνα με τις παρακάτω διατυπώσεις οι διεθνώς καθιερωμένοι δείκτες πληρότητας, ορθότητας και ολικής ποιότητας του αλγορίθμου.

$$\text{Πληρότητα} = \frac{\text{ορθά ανιχνευμένα εικονοστοιχεία}}{\text{εικονοστοιχεία αναφοράς}} = \frac{TP}{TP + FN}$$

$$\text{Ορθότητα} = \frac{\text{ορθά ανιχνευμένα εικονοστοιχεία}}{\text{όλα τα ανιχνευμένα εικονοστοιχεία}} = \frac{TP}{TP + FP}$$

$$\text{Ποιότητα} = \frac{TP}{TP + FP + FN}$$

Και οι τρεις δείκτες παίρνουν τιμές στο πεδίο [0, 1], με βέλτιστη τιμή την τιμή 1. Η πληρότητα προσδιορίζει το ποσοστό των δεδομένων ελέγχου που έχουν ανιχνευθεί από τον αλγόριθμο, η ορθότητα το ποσοστό των δεδομένων ελέγχου που έχουν ανιχνευθεί σωστά από τον αλγόριθμο και η ποιότητα προσδιορίζει το πόσο «καλό» είναι το τελικό αποτέλεσμα (γενικευμένη μέτρηση), συνδυάζοντας τις μετρήσεις για την πληρότητα και την ορθότητα των αποτελεσμάτων.

Με βάση τα παραπάνω, ψηφιοποιούνται χειροκίνητα σε περιβάλλον AutoCAD οι ακτογραμμές όλων των εφαρμογών – καθώς και τα περιγράμματα των απεικονίσεων – οι οποίες αποτελούν τα δεδομένα αναφοράς (βλ. Παράρτημα). Η χειροκίνητη ψηφιοποίηση, ωστόσο, έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία αρχείων σε διανυσματική μορφή, ενώ οι εξαγόμενες ακτογραμμές βρίσκονται σε ψηφιακή μορφή. Ως εκ τούτου, είναι απαραίτητη η μετατροπή των διανυσματικών αρχείων αναφοράς σε ψηφιδωτά δεδομένα τύπου '.tif'. Η διαδικασία η οποία ακολουθήθηκε ήταν η εξής:

- Εξαγωγή του διανυσματικού αρχείου σε αρχείο τύπου '.tif', από το περιβάλλον του AutoCAD. Η εξαγόμενη απεικόνιση, ωστόσο, δεν βρίσκεται στις πραγματικές της διαστάσεις.
- Μετατροπή του '.tif' από RGB σε grayscale (κλίμακα του γκρι) και τέλος σε bitmap (δυναμική μορφή), στο περιβάλλον του Adobe Photoshop.
- Αφαίρεση του ψηφιοποιημένου πλαισίου της απεικόνισης, στο περιβάλλον του IrfanView.
- Επαναφορά της απεικόνισης στις αρχικές της διαστάσεις, στο περιβάλλον του Adobe Photoshop.

- Εκλέπτυνση της ακτογραμμής αναφοράς ούτως ώστε να είναι πάχους ενός εικονοστοιχείου, στο περιβάλλον του Matlab.

Η παραπάνω μετατροπή είναι απαραίτητη προκειμένου να αξιολογηθούν τα εξαγόμενα αποτελέσματα. Ωστόσο, παρουσιάστηκαν προβλήματα κατά την εκτέλεσή της. Αρχικά, η εξαγωγή του διανυσματικού αρχείου σε αρχείο τύπου '.tif' (βήμα 1) είχε ως αποτέλεσμα να χαθούν κάποιες ακμές. Επομένως, ορθά ανιχνευμένα εικονοστοιχεία μπορεί να χαρακτηρίζονται εσφαλμένα ως FP (από λάθος του αλγορίθμου έχουν ανιχνευτεί). Επιπλέον, το πάχος των ακτογραμμών ήταν μεγαλύτερο του ενός εικονοστοιχείου. Κάποιες ακμές που προκύπτουν όμως κατά την εκλέπτυνσή τους (βήμα 5) είναι ψευδείς και δεν οριοθετούν τη χερσαία επιφάνεια. Επομένως, ορθά ανιχνευμένα εικονοστοιχεία μπορεί εσφαλμένα να χαρακτηρίζονται ως FN (από λάθος του αλγορίθμου δεν έχουν ανιχνευτεί). Τέλος, κατά την επαναφορά απεικονίσεων από μεγαλύτερες σε μικρότερες διαστάσεις (βήμα 4), παρουσιάστηκαν κάποια κενά στην ακτογραμμή αναφοράς, με αποτέλεσμα και σε αυτή την περίπτωση ορθά ανιχνευμένα εικονοστοιχεία να χαρακτηρίζονται εσφαλμένα ως FP.

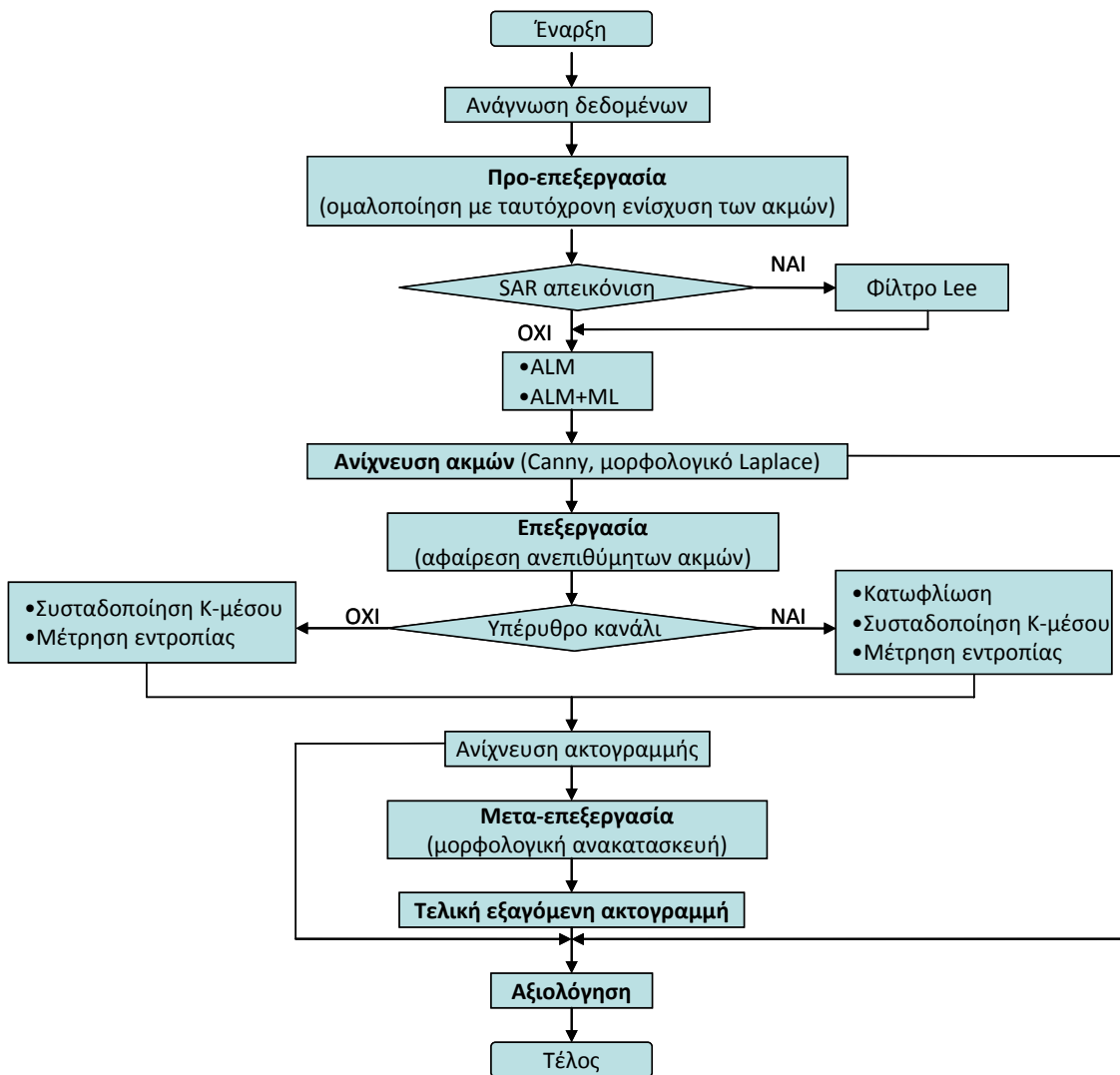
Έτσι, μπορεί να συμπεράνει κανείς ότι η αξιολόγηση του τελικού προϊόντος εξαρτάται από: **(α)** την ποιότητα των απεικονίσεων, **(β)** τη δεινότητα του φωτοερμηνευτή κι επομένως την ορθότητα της ψηφιοποίησης, και **(γ)** τη διαδικασία μετατροπής των διανυσματικών σε ψηφιδωτά αρχεία.

Όπως σημειώθηκε, η σύγκριση του εξαγόμενου αποτελέσματος με τα δεδομένα αναφοράς πραγματοποιείται «ταιριάζοντας» τα δεδομένα αναφοράς με τα εξαγόμενα αποτελέσματα χρησιμοποιώντας ένα εύρος ζώνης (buffer method), έτσι ώστε κάθε ομόλογο εικονοστοιχείο που ανιχνεύεται μέσα σε αυτό το εύρος θεωρείται «ταιριασμένο». Η χρήση του έγκειται στο γεγονός ότι ακόμα και τα δεδομένα αναφοράς εμπεριέχουν φωτοερμηνευτικά σφάλματα κι επομένως κρίθηκε ότι η αξιολόγηση σε αυτό το επίπεδο θα είναι πιο αξιόπιστη. Στο πλαίσιο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας χρησιμοποιήθηκαν τρεις ζώνες, εύρους 1, 3 και 5 εικονοστοιχείων, ενώ η αξιολόγηση πραγματοποιήθηκε για τρία προϊόντα ακτογραμμής: την ακτογραμμή που ανιχνεύεται με τον τελεστή Canny έπειτα από την προ-επεξεργασία των απεικονίσεων, την ακτογραμμή που προκύπτει κατά το στάδιο της επεξεργασίας από την κατωφλίωση, τη συσταδοποίηση και τη μέτρηση της εντροπίας, και την ακτογραμμή που προκύπτει κατά την εφαρμογή όλης της μεθοδολογίας που παρουσιάστηκε και περιλαμβάνει την προ-επεξεργασία, την επεξεργασία και τη μετα-επεξεργασία των απεικονίσεων. Τα αποτελέσματα της αξιολόγησης με κριτήρια πληρότητας, ορθότητας και ποιότητας παρουσιάζονται αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4 Εφαρμογές και αξιολόγηση

Στο προηγούμενο εδάφιο περιγράφηκε αναλυτικά η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε για την αυτόματη εξαγωγή ακτογραμμών σε εννέα – συνολικά – τηλεπισκοπικά δεδομένα, SAR και ηλεκτρο-οπτικά υψηλής και μεσαίας διακριτικής ικανότητας. Στο παρόν εδάφιο, περιγράφονται αναλυτικά τα αποτελέσματα της μεθόδου και τα προβλήματα που ανέκυψαν, σε κάθε εφαρμογή. Στο παρακάτω σχήμα παρατίθενται με τη μορφή διαγράμματος ροής όλα τα στάδια της μεθοδολογίας. Το διάγραμμα ροής αποτελεί τη γραφική αναπαράσταση μιας διαδικασίας.

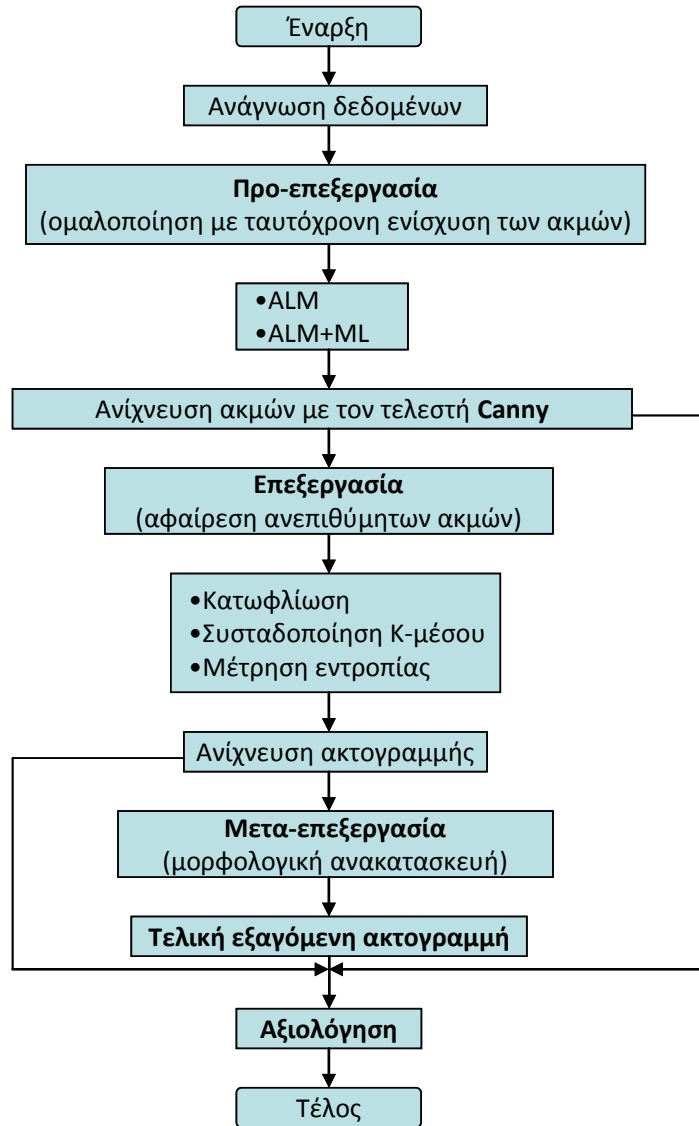


Σχήμα 4.1: Διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε, με σκοπό τη διερεύνηση ανίχνευσης ακτογραμμής από τηλεπισκοπικά δεδομένα με προηγμένες τεχνικές ομαλοποίησης.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μεθοδολογίας ανά εφαρμογή, καθώς και η αξιολόγηση των εξαγόμενων ακτογραμμών. Για κάθε εφαρμογή

αναπτύχθηκαν δυο διαφορετικοί αλγόριθμοι, ανάλογα με την τεχνική προεπεξεργασίας ή τον τελεστή ανίχνευσης ακμών. Στην αρχή κάθε υποκεφαλαίου παρατίθεται μια σύντομη περιγραφή των δύο αλγορίθμων, με τη μορφή διαγραμμάτων ροής.

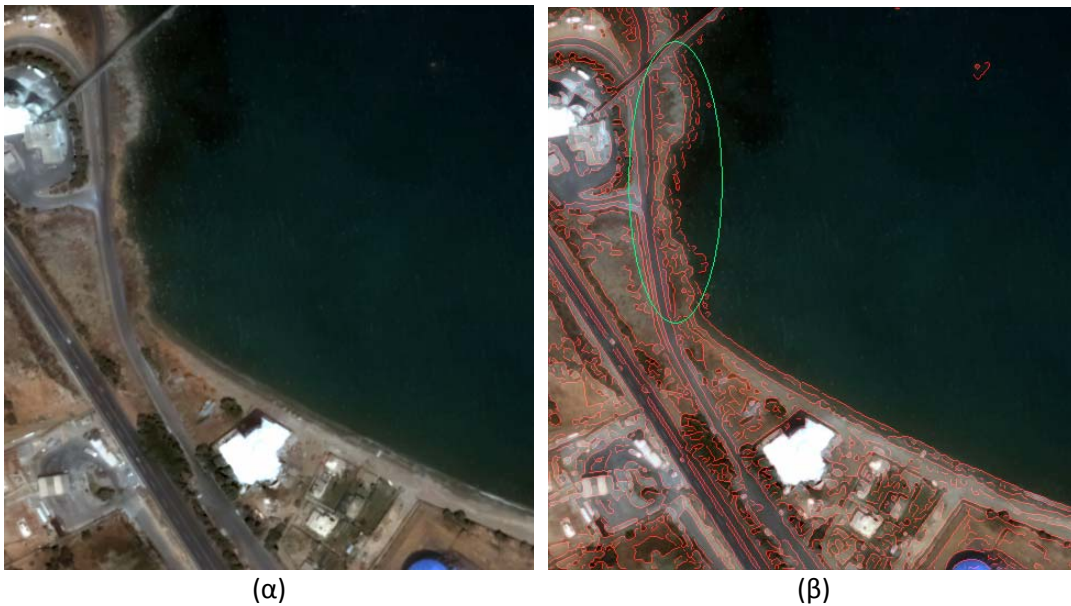
4.1 1^η Εφαρμογή – Περιοχή: ακτή Ηρακλείου Κρήτης (QUICKBIRD)



Σχήμα 4.2: 1^η Εφαρμογή, διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε, με σκοπό τη διερεύνηση ανίχνευσης ακτογραμμής με προηγμένες τεχνικές ομαλοποίησης και τον τελεστή Canny.

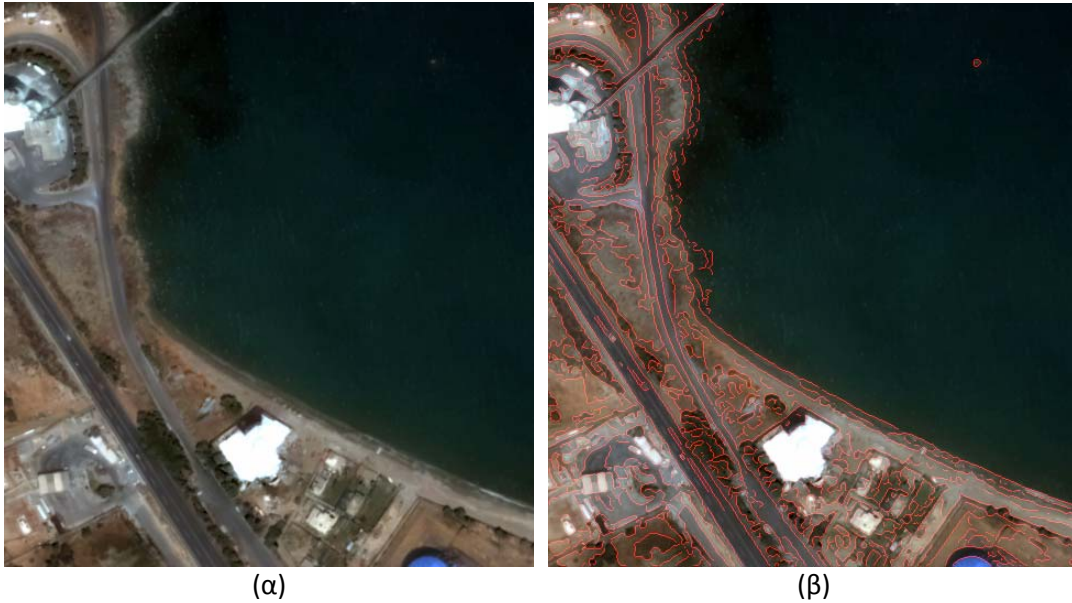
Όπως παρουσιάστηκε στο προηγούμενο εδάφιο, οι πιο αποτελεσματικές τεχνικές (από αυτές που εξετάστηκαν και για τις συγκεκριμένες εφαρμογές) ομαλοποίησης με ταυτόχρονη ενίσχυση των ακμών είναι η ανισοτροπική διάχυση ALM, καθώς και ο συνδυασμός της με ένα μικρό αριθμό επαναλήψεων μορφολογικής εξομάλυνσης. Κατά την εφαρμογή της ALM παρατηρήθηκε ότι τα καλύτερα αποτελέσματα

δίνονται έπειτα από 200 επαναλήψεις. Η ανίχνευση των ακμών έγινε με τον βέλτιστο τελεστή Canny. Ωστόσο, όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.1(β), οι ακμές δεν είναι συνεχείς και αυτό αναδεικνύεται και στις υπόλοιπες τεχνικές, δημιουργώντας περαιτέρω προβλήματα. Ακόμα και η φωτοερμηνεία της συγκεκριμένης απεικόνισης ήταν απαιτητική, λόγω θορύβου και κυρίως λόγω της παρουσίας βραχωδών σημείων στο πέρας της χερσαίας επιφάνειας, όπως φαίνεται στο μαρκαρισμένο τμήμα της εικόνας 4.1(β). Αυτό δημιούργησε σύγχυση στον προσδιορισμό της αληθούς θέσης της ακτογραμμής – συνδυαστικά με το θόρυβο – τόσο στην ψηφιοποίηση όσο και στην ανίχνευση των ακμών, ενώ συνέβαλε αρνητικά και στη συνέχεια της ακτογραμμής.



Εικόνα 4.1: 1^η Εφαρμογή, (α) απεικόνιση QUICKBIRD στο φυσικό έγχρωμο σύνθετο, (β) ανισοτροπική διάχυση ALM 200 επαναλήψεων και ανίχνευση ακμών με τον Canny.

Ο δεύτερος αλγόριθμος που υλοποιήθηκε περιλαμβάνει λίγες επαναλήψεις μορφολογικής εξομάλυνσης επικουρικά στην ενίσχυση των ακμών με την ALM, επιτυγχάνοντας μεγαλύτερη ομαλοποίηση κι επομένως απαλείφοντας κάποιες ανεπιθύμητες ακμές. Στην εικόνα 4.2(β) φαίνεται ότι πράγματι η χερσαία επιφάνεια είναι πιο ομαλοποιημένη. Η περιοχή που ιδιαίτερα ενδιαφέρει είναι κοντά στην ακτογραμμή, προκειμένου να απλοποιηθεί η ανίχνευσή της. Έπειτα από πληθώρα συνδυασμών, τα καλύτερα αποτελέσματα δόθηκαν έπειτα από 100 επαναλήψεις ALM και 5 επαναλήψεις ML. Τα προβλήματα που ανέκυψαν είναι τα ίδια με αυτά που παρουσιάστηκαν για την ALM.



Εικόνα 4.2: 1^η Εφαρμογή, (α) απεικόνιση QUICKBIRD στο φυσικό έγχρωμο σύνθετο, (β) ανιστροπική διάχυση ALM 100 επαναλήψεων, μορφολογική εξομάλυνση ML 5 επαναλήψεων και ανίχνευση ακμών με τον Canny.

Συνοψίζοντας, τα βασικά προβλήματα που αναδείχτηκαν και παρουσιάστηκαν κατά την ανίχνευση ακμών ήταν τα εξής:

(α) ποιότητα απεικόνισης (θόρυβος).

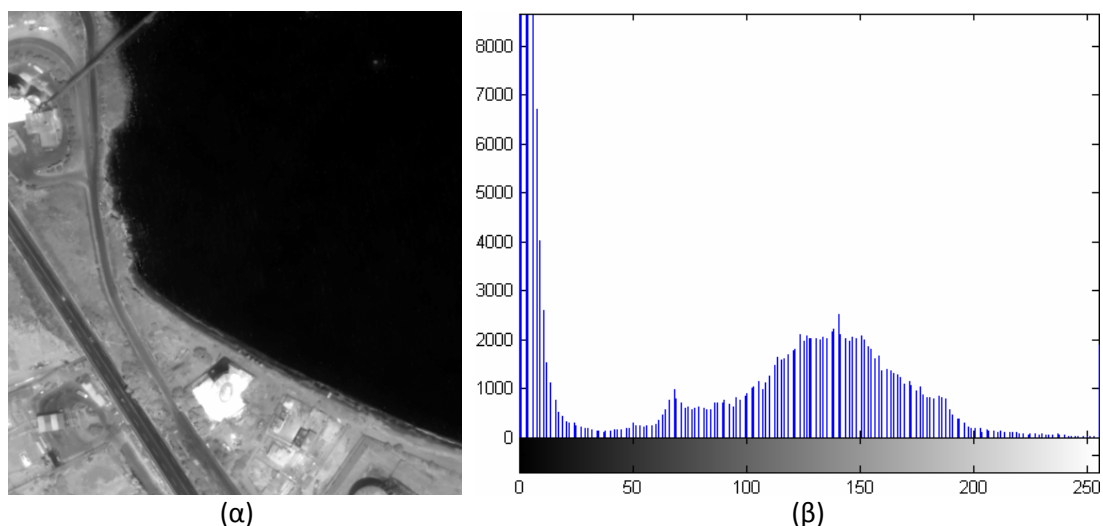
(β) δυσκολία απεικόνισης (βράχια).

(γ) ασυνέχεια ακμών.

Για την αφαίρεση των ανεπιθύμητων ακμών χρησιμοποιήθηκαν: (α) κατωφλίωση στο υπέρυθρο κανάλι βάσει του ιστογράμματος, (β) συσταδοποίηση K-μέσου, και (γ) μέτρηση της εντροπίας. Στη συνέχεια επισυνάπτονται και αναλύονται οι παράμετροι της εκάστοτε τεχνικής, καθώς και τα αποτελέσματα που προέκυψαν.

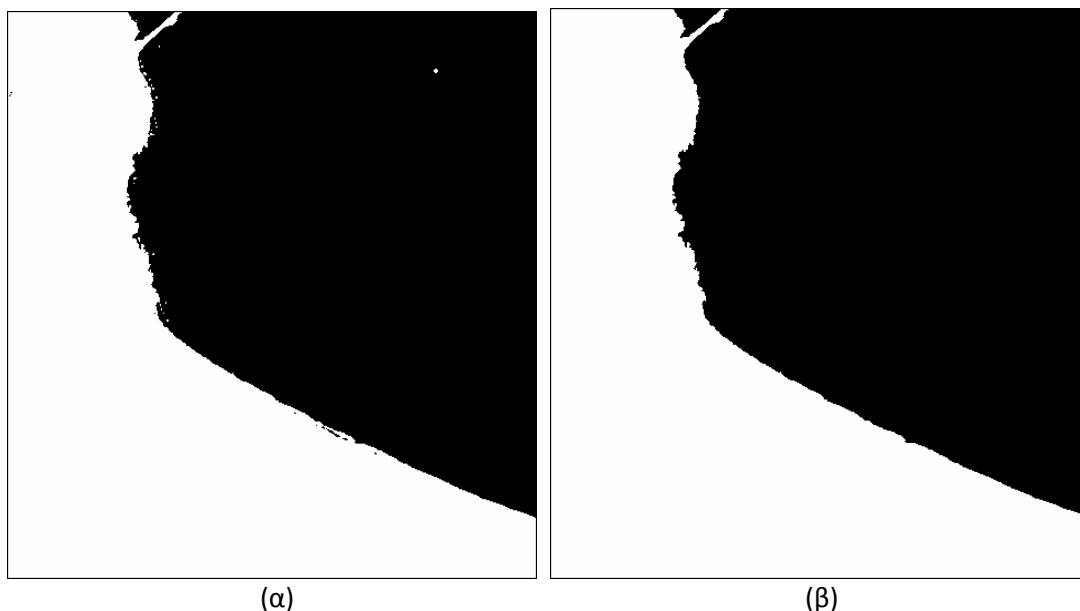
Κατωφλίωση

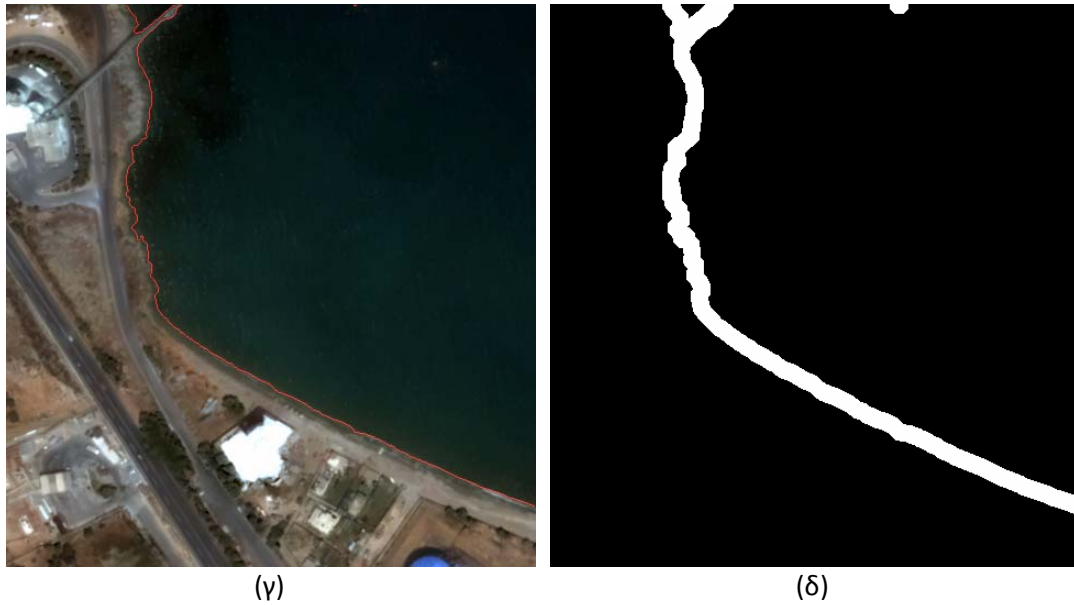
Η επιλογή του κατάλληλου κατωφλίου έγινε βάσει του ιστογράμματος της απεικόνισης. Όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, οι δύο «καμπάνες» του ιστογράμματος παρουσιάζουν την κατανομή των τιμών φωτεινότητας στην υδάτινη και τη χερσαία επιφάνεια, αντίστοιχα. Επομένως, το κατάλληλο κατώφλι ορίζεται στην τιμή 40, που εκτιμάται ως οριακή τιμή φωτεινότητας για τη θαλάσσια περιοχή. Ωστόσο, δοκιμάστηκαν και άλλες τιμές φωτεινότητας για την επιλογή κατάλληλου κατωφλίου.



Εικόνα 4.3: 1^η Εφαρμογή, (α) απεικόνιση QUICKBIRD στο εγγύς υπέρυθρο κανάλι, (β) το ιστόγραμμα συχνοτήτων της απεικόνισης.

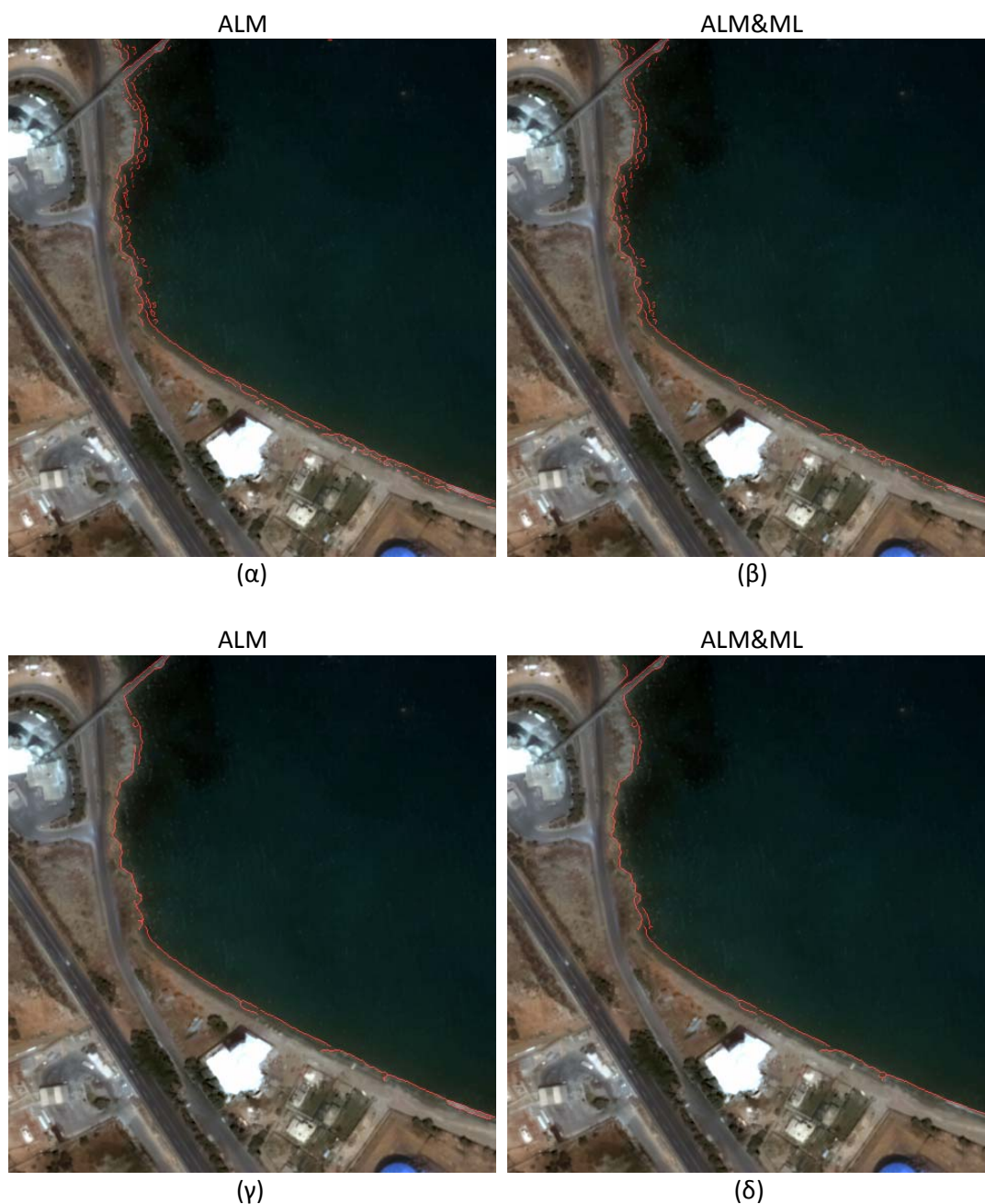
Τελικά, η δυαδική εικόνα που προέκυψε – έπειτα από απαλοιφή κάποιων μικρών αντικειμένων της χερσαίας και της υδάτινης επιφάνειας (εικόνα 4.4(α)) – καθώς και η θέση της ακτογραμμής, παρουσιάζονται στις εικόνες 4.4(β) και 4.4(γ), αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι η ακτογραμμή που προέκυψε από την κατωφλίωση και παρουσιάζεται στην εικόνα 4.4(γ) δεν είναι η τελική θέση της ακτογραμμής, αλλά χρησιμοποιείται για την αφαίρεση των ανεπιθύμητων ακμών. Σε αυτήν τέθηκε ένα εύρος ζώνης 8 εικονοστοιχείων (εικόνα 4.4(δ)), οπότε και αφαιρέθηκαν οι περισσότερες από τις ανεπιθύμητες ακμές.





Εικόνα 4.4: 1^η Εφαρμογή, (α) διαχωρισμός χερσαίας-υδάτινης επιφάνειας έπειτα από κατωφλίωση (δυναδική εικόνα), (β) αφαίρεση μικρών αντικειμένων της χερσαίας και της υδάτινης επιφάνειας, (γ) υπέρθεση ακτογραμμής στην αρχική απεικόνιση έπειτα από κατωφλίωση, (δ) εύρος ζώνης 8 εικονοστοιχείων στην ακτογραμμή που προκύπτει από την κατωφλίωση.

Το εύρος ζώνης τέθηκε στις εικόνες ακμών και που είχαν αρχικά υποστεί προεπεξεργασία με: (α) ALM 200 επαναλήψεων (εικόνα 4.1(β)), και (β) ALM 100 επαναλήψεων συνδυαστικά με ML 5 επαναλήψεων (εικόνα 4.2(β)). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στις εικόνες 4.5(α) και 4.5(β), αντίστοιχα. Στην περίπτωση προ-επεξεργασίας με ALM, η εξαγόμενη ακτογραμμή προκύπτει, τελικά, χρησιμοποιώντας τα μορφολογικά εργαλεία `bwareaopen` και `imclose` (`bwareaopen` → `imclose` → `bwareaopen`), αφαιρώντας τις μικρές εναπομείνουσες ακμές (εικόνα 4.5(γ)). Στην περίπτωση προ-επεξεργασίας με ALM και ML, η εξαγόμενη ακτογραμμή προκύπτει, τελικά, χρησιμοποιώντας μόνο το μορφολογικό εργαλείο `bwareaopen` (εικόνα 4.5(δ)).



Εικόνα 4.5: 1^η Εφαρμογή, υπέρθεση των ακμών εντός του εύρους ζώνης (εικόνα 4.4(δ)) στην αρχική απεικόνιση και τελική θέση ακτογραμμής, αντίστοιχα, έπειτα από προ-επεξεργασία με (α), (γ) ALM και (β), (δ) ALM συνδυαστικά με ML.

Η τελική θέση της ακτογραμμής προέκυψε από την αρχική ανίχνευση ακμών με τον τελεστή Canny και δεν παρατηρούνται έντονες διαφορές, σε επίπεδο φωτοερμηνείας, για τις δύο μεθόδους προ-επεξεργασίας – εκτός από ελάχιστες εναπομένουσες ακμές. Ωστόσο, όπως σημειώθηκε, παρουσιάζει κάποιες ασυνέχειες. Όπως φαίνεται και στις εικόνες 4.5(γ) και 4.5(δ), το πρόβλημα αυτό επηρεάζει και την τελική της θέση, καθώς για να αφαιρεθούν οι εναπομείνουσες ακμές αφαιρέθηκαν και κάποια μικρά τμήματα της ακτογραμμής.

Στη συνέχεια παρατίθεται αξιολόγηση βάσει των κριτηρίων πληρότητας, ορθότητας και ποιότητας, για τρία προϊόντα ακτογραμμής: (α) ανίχνευση μόνο με τον Canny, (β) εξαγωγή μόνο από κατωφλίωση ως το όριο των δύο κλάσεων, και (γ) εξαγωγή βάσει της μεθοδολογίας που περιγράφηκε στο διάγραμμα ροής του σχήματος 4.2, για την κατωφλίωση. Η σύγκριση πραγματοποιήθηκε για ζώνες εύρους 1, 3 και 5 εικονοστοιχείων, σε σχέση με την ψηφιοποιημένη ακτογραμμή αναφοράς.

		Εύρος ζώνης (εικονοστοιχεία)		
ΠΛΗΡΟΤΗΤΑ		1	3	5
	Κατωφλίωση	0.48532	0.75591	0.84606
ALM	Canny	0.47917	0.80197	0.88161
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.4517	0.73854	0.82592
ALM&ML	Canny	0.47633	0.77978	0.86377
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.47348	0.77329	0.86066
		Εύρος ζώνης (εικονοστοιχεία)		
ΟΡΘΟΤΗΤΑ		1	3	5
	Κατωφλίωση	0.47763	0.74484	0.83024
ALM	Canny	0.42845	0.71381	0.80086
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.39933	0.65858	0.75913
ALM&ML	Canny	0.46531	0.74515	0.82731
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.41425	0.67188	0.77001
		Εύρος ζώνης (εικονοστοιχεία)		
ΠΟΙΟΤΗΤΑ		1	3	5
	Κατωφλίωση	0.31704	0.60043	0.72128
ALM	Canny	0.29232	0.60684	0.72309
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.26896	0.53406	0.65442
ALM&ML	Canny	0.30783	0.6156	0.73182
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.28361	0.56131	0.68466

Πίνακας 4.1: 1^η Εφαρμογή, αξιολόγηση ανίχνευσης ακτογραμμής με: κατωφλίωση, Canny και την υλοποιημένη μεθοδολογία, για τις δυο μεθόδους προ-επεξεργασίας.

Με βάση τον παραπάνω πίνακα, παρατηρούνται τα εξής:

- Σε επίπεδο **πληρότητας**, η ανίχνευση των ακμών με προ-επεξεργασία την ALM έχει καλύτερα αποτελέσματα από την ALM συνδυαστικά με την ML. Ωστόσο, συνδυαστικά με την κατωφλίωση – η οποία έχει, γενικά, χειρότερα αποτελέσματα σε σχέση με τον Canny – η **ανίχνευση των ακμών με προ-επεξεργασία την ALM συνδυαστικά με την ML, βάσει της υλοποιημένης μεθοδολογίας, παρουσιάζει αυξημένα επίπεδα πληρότητας, πολύ κοντά στον Canny.**
- Σε επίπεδα **ορθότητας και ποιότητας**, η ανίχνευση των ακμών με προ-επεξεργασία την ALM συνδυαστικά με την ML έχει καλύτερα αποτελέσματα

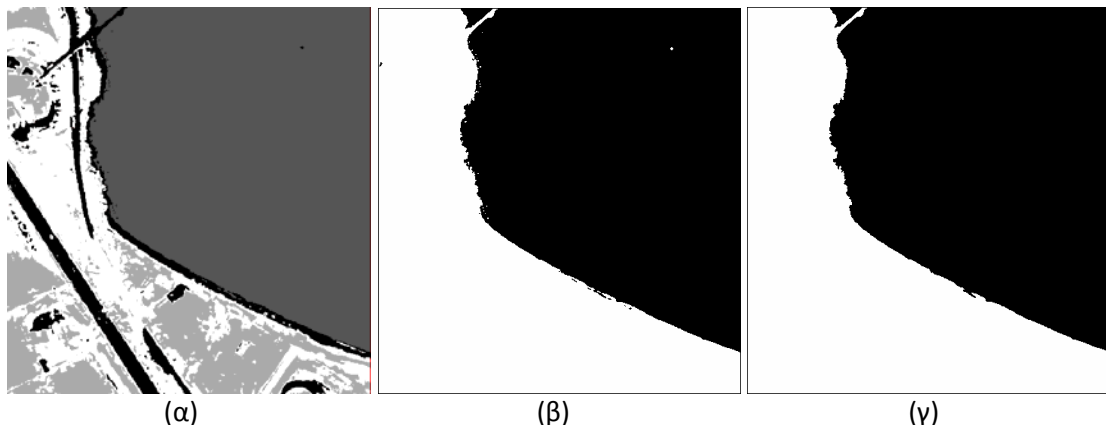
από την ALM, και παρόμοια με την κατωφλίωση. Ωστόσο, κατά την υλοποιημένη μεθοδολογία η ορθότητα και η ολική ποιότητα της ακτογραμμής παρουσιάζονται μειωμένες, λόγω της μετα-επεξεργασίας που απαιτήθηκε.

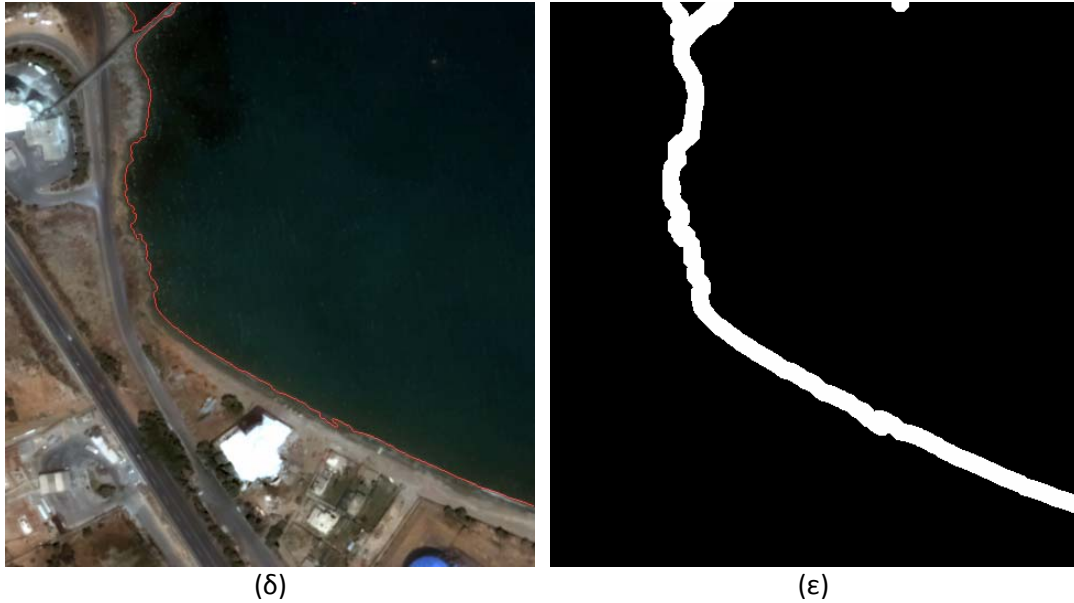
- **Για εύρος ζώνης 1 εικονοστοιχείου** οι δείκτες αξιολόγησης, συνολικά, δεν κυμαίνονται σε ικανοποιητικά επίπεδα (<50%). Η συγκεκριμένη απεικόνιση έχει διακριτική ικανότητα 0,7 m (rap-sharpened), και η δεδομένη ζώνη (3 εικονοστοιχεία → ± 0,7m) αντιστοιχεί σε κλίμακα χαρτογράφησης 1:4.500, περίπου.
- **Για εύρος ζώνης 3 εικονοστοιχείων**, τα επίπεδα πληρότητας και ορθότητας των ακμών, συνολικά, είναι ενθαρρυντικά (μ.ό. πληρότητας 77%, μ.ό ορθότητας 70,7%) και μειωμένα παρατηρούνται μόνο για την ολική ποιότητα των ακμών (μ.ό ποιότητας 58,4%). Για την υλοποιημένη μεθοδολογία με τις δύο μεθόδους προ-επεξεργασίας τα αντίστοιχα ποσοστά είναι τα εξής: μ.ό. πληρότητας 75,6%, μ.ό ορθότητας 66,5% και μ.ό ποιότητας 54,8%. Η δεδομένη ζώνη (5 εικονοστοιχεία → ± 1,4m) αντιστοιχεί σε κλίμακα χαρτογράφησης 1:7.000.
- **Για εύρος ζώνης 5 εικονοστοιχείων**, τα επίπεδα αξιολόγησης των ακμών, συνολικά, είναι πολύ καλά (μ.ό. πληρότητας 85,6%, μ.ό ορθότητας 79,8%, μ.ό ποιότητας 70,3%). Για την υλοποιημένη μεθοδολογία με τις δύο μεθόδους προ-επεξεργασίας τα αντίστοιχα ποσοστά είναι τα εξής: μ.ό. πληρότητας 84,3%, μ.ό ορθότητας 76,5% και μ.ό ποιότητας 67%. Η δεδομένη ζώνη (9 εικονοστοιχεία → ± 2,8m) αντιστοιχεί σε κλίμακα χαρτογράφησης 1:13.000, περίπου.
- **Η υλοποιημένη μεθοδολογία για την κατωφλίωση κρίνεται ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για χαρτογραφήσεις μέγιστης κλίμακας 1:13.000.**

Σημειώνεται ότι η ακτογραμμή που ανιχνεύτηκε μόνο με τον Canny και χρησιμοποιείται στην αξιολόγηση, προέκυψε από τα δεδομένα αναφοράς με χρήση εύρους ζώνης 5 εικονοστοιχείων και μορφολογικών εργαλείων.

Συσταδοποίηση Κ-μέσου

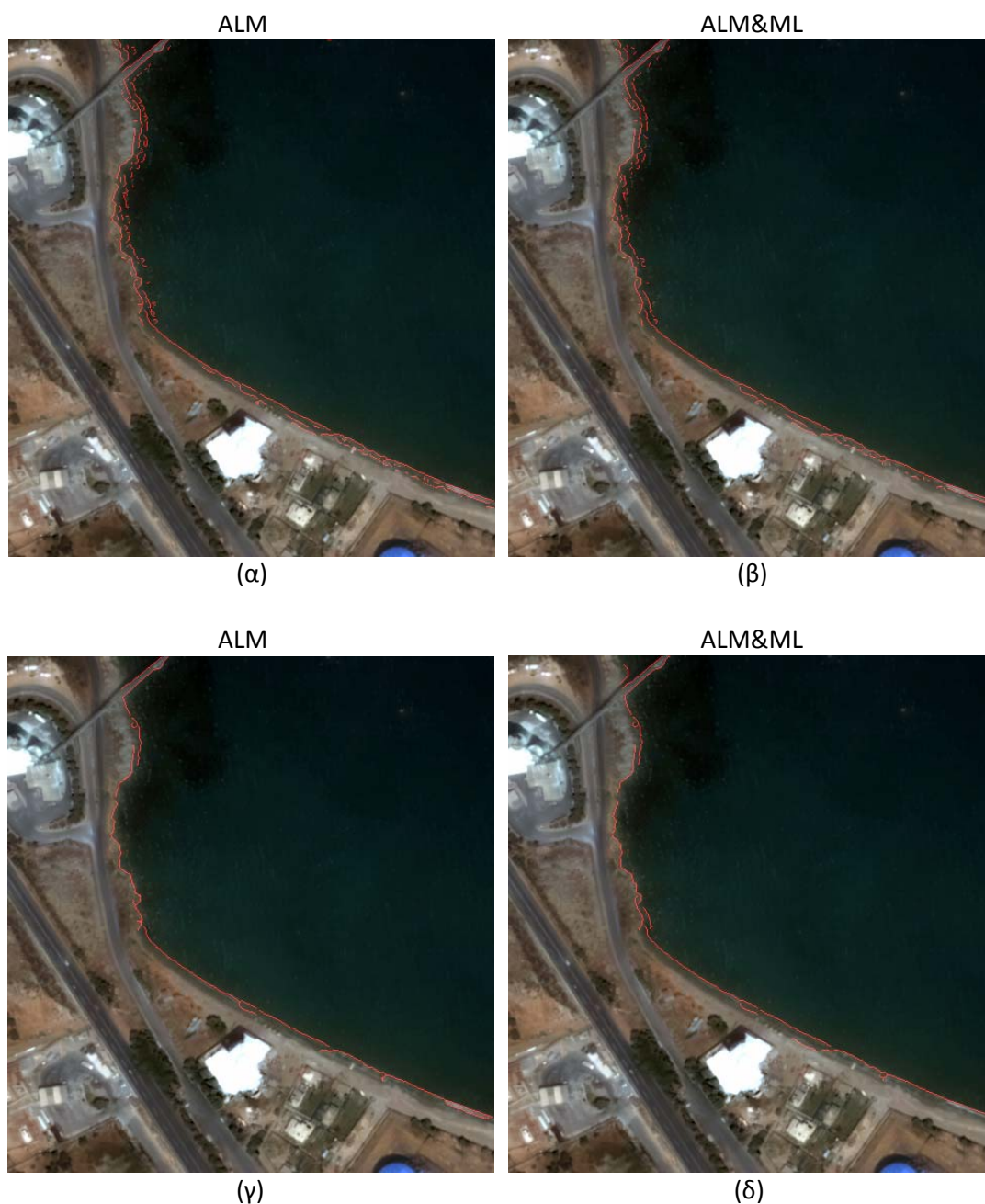
Η συγκεκριμένη απεικόνιση κατηγοριοποιήθηκε σε τέσσερις κλάσεις (εικόνα 4.6(α)). Έπειτα από την απαλοιφή κάποιων μικρών αντικειμένων της χερσαίας και της υδάτινης επιφάνειας, προέκυψε ο τελικός διαχωρισμός της απεικόνισης σε δύο κλάσεις (εικόνα 4.6(γ)). Ομοίως με την κατωφλίωση, ανιχνεύτηκε η θέση της ακτογραμμής ως το όριο των δύο επιφανειών (εικόνα 4.6(δ)).





Εικόνα 4.6: 1^η Εφαρμογή, (α) συσταδοποίηση Κ-μέσου σε τέσσερις κλάσεις, (β) διαχωρισμός χερσαίας-υδάτινης επιφάνειας σε δύο κλάσεις, (γ) αφαίρεση μικρών αντικειμένων της χερσαίας και της υδάτινης επιφάνειας, (γ) υπέρθεση ακτογραμμής στην αρχική απεικόνιση έπειτα από συσταδοποίηση Κ-μέσου, (ε) εύρος ζώνης 8 εικονοστοιχείων στην ακτογραμμή που προκύπτει από τη συσταδοποίηση.

Στην ακτογραμμή που προέκυψε ως το όριο των δύο κλάσεων της χερσαίας και της υδάτινης επιφάνειας τέθηκε ένα εύρος ζώνης 7 εικονοστοιχείων στην περίπτωση προ-επεξεργασίας με την ALM και 8 εικονοστοιχείων στην περίπτωση προ-επεξεργασίας με την ALM συνδυαστικά με την ML (εικόνα 4.6(ε)), με σκοπό την αφαίρεση ανεπιθύμητων ακμών. Το εύρος ζώνης τέθηκε στις εικόνες ακμών και που είχαν αρχικά υποστεί προ-επεξεργασία με: (α) ALM 200 επαναλήψεων (εικόνα 4.1(β)), και (β) ALM 100 επαναλήψεων συνδυαστικά με ML 5 επαναλήψεων (εικόνα 4.2(β)). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στις εικόνες 4.7(α) και 4.7(β), αντίστοιχα. Στην περίπτωση προ-επεξεργασίας με ALM, η εξαγόμενη ακτογραμμή προκύπτει, τελικά, χρησιμοποιώντας τα μορφολογικά εργαλεία `bwareaopen` και `imclose` (`bwareaopen` → `imclose` → `bwareaopen`), αφαιρώντας τις μικρές εναπομείνουσες ακμές (εικόνα 4.7(γ)). Στην περίπτωση προ-επεξεργασίας με ALM και ML, η εξαγόμενη ακτογραμμή προκύπτει, τελικά, χρησιμοποιώντας μόνο το μορφολογικό εργαλείο `bwareaopen` (εικόνα 4.7(δ)).



Εικόνα 4.7: 1^η Εφαρμογή, υπέρθεση των ακμών εντός του εύρους ζώνης (εικόνα 4.6(ε)) στην αρχική απεικόνιση και τελική θέση ακτογραμμής, αντίστοιχα, έπειτα από προ-επεξεργασία με (α), (γ) ALM και (β), (δ) ALM συνδυαστικά με ML.

Η τελική θέση της ακτογραμμής προέκυψε από την αρχική ανίχνευση ακμών με τον τελεστή Canny και δεν παρατηρούνται έντονες διαφορές, σε επίπεδο φωτοερμηνείας, για τις δύο μεθόδους προ-επεξεργασίας – εκτός από ελάχιστες εναπομένουσες ακμές. Ωστόσο, όπως σημειώθηκε, παρουσιάζει κάποιες ασυνέχειες. Όπως φαίνεται και στις εικόνες 4.7(γ) και 4.7(δ), το πρόβλημα αυτό επηρεάζει και την τελική της θέση, καθώς για να αφαιρεθούν οι εναπομείνουσες ακμές, αφαιρέθηκαν και κάποια μικρά τμήματα της ακτογραμμής.

Στη συνέχεια παρατίθεται αξιολόγηση βάσει των κριτηρίων πληρότητας, ορθότητας και ποιότητας, για τρία προϊόντα ακτογραμμής: (α) ανίχνευση μόνο με τον Canny, (β) εξαγωγή μόνο από συσταδοποίηση K-μέσου ως το όριο των δύο κλάσεων, και (γ) εξαγωγή βάσει της μεθοδολογίας που περιγράφηκε στο διάγραμμα ροής του σχήματος 4.2, για τη συσταδοποίηση. Η σύγκριση πραγματοποιήθηκε για ζώνες εύρους 1, 3 και 5 εικονοστοιχείων, σε σχέση με την ψηφιοποιημένη ακτογραμμή αναφοράς.

		Εύρος ζώνης (εικονοστοιχεία)		
ΠΛΗΡΟΤΗΤΑ		1	3	5
	Συσταδοποίηση K-μέσου	0.47348	0.74963	0.84349
ALM	Canny	0.47917	0.80197	0.88161
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.4517	0.73854	0.82592
ALM&ML	Canny	0.47633	0.77978	0.86377
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.47254	0.77078	0.86106
		Εύρος ζώνης (εικονοστοιχεία)		
ΟΡΘΟΤΗΤΑ		1	3	5
	Συσταδοποίηση K-μέσου	0.45683	0.72637	0.81742
ALM	Canny	0.42845	0.71381	0.80086
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.39816	0.65662	0.75725
ALM&ML	Canny	0.46531	0.74515	0.82731
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.40274	0.65019	0.74488
		Εύρος ζώνης (εικονοστοιχεία)		
ΠΟΙΟΤΗΤΑ		1	3	5
	Συσταδοποίηση K-μέσου	0.30294	0.58456	0.70977
ALM	Canny	0.29232	0.60684	0.72309
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.26843	0.53277	0.65302
ALM&ML	Canny	0.30783	0.6156	0.73182
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.27784	0.54484	0.66496

Πίνακας 4.2: 1^η Εφαρμογή, αξιολόγηση ανίχνευσης ακτογραμμής με: συσταδοποίηση K-μέσου, Canny και την υλοποιημένη μεθοδολογία, για τις δυο μεθόδους προ-επεξεργασίας.

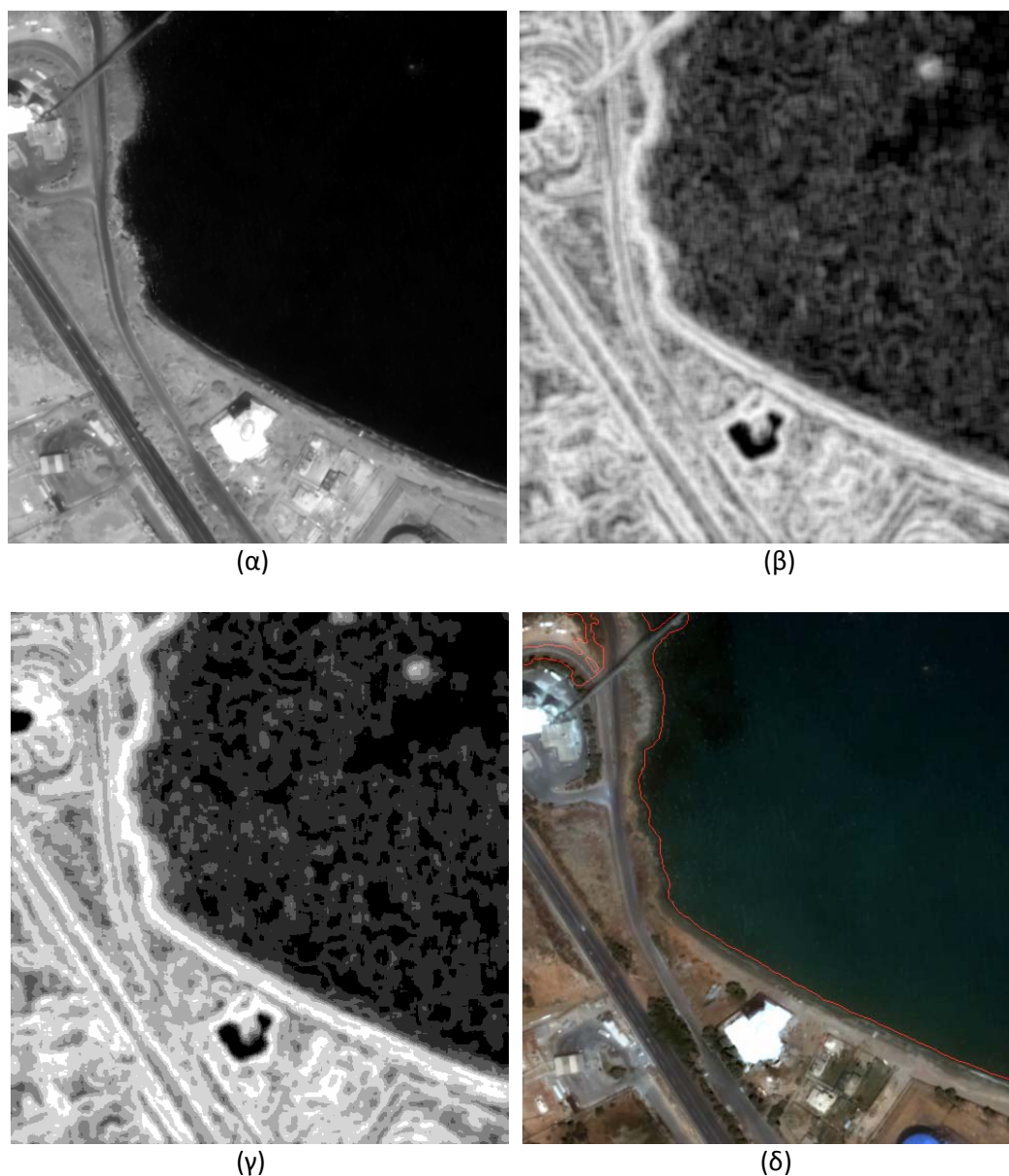
Με βάση τον παραπάνω πίνακα, οι παρατηρήσεις είναι ίδιες με την κατωφλίωση:

- Σε επίπεδο **πληρότητας**, η ανίχνευση των ακμών με προ-επεξεργασία την ALM έχει καλύτερα αποτελέσματα από την ALM συνδυαστικά με την ML. Ωστόσο, συνδυαστικά με τη συσταδοποίηση K-μέσου – η οποία έχει, γενικά, χειρότερα αποτελέσματα σε σχέση με τον Canny – **η ανίχνευση των ακμών με προ-επεξεργασία την ALM συνδυαστικά με την ML, βάσει της υλοποιημένης μεθοδολογίας, παρουσιάζει αυξημένα επίπεδα πληρότητας, πολύ κοντά στον Canny.**

- Σε επίπεδα *ορθότητας και ποιότητας*, η **ανίχνευση των ακμών με προ-επεξεργασία την ALM συνδυαστικά με την ML έχει καλύτερα αποτελέσματα από την ALM, και παρόμοια με τη συσταδοποίηση**. Ωστόσο, κατά την υλοποιημένη μεθοδολογία η ορθότητα και η ολική ποιότητα της ακτογραμμής παρουσιάζονται μειωμένες, λόγω της μετα-επεξεργασίας που απαιτήθηκε.
- **Γενικά, για εύρος ζώνης 1 εικονοστοιχείου** οι δείκτες αξιολόγησης, συνολικά, δεν κυμαίνονται σε ικανοποιητικά επίπεδα (<50%).
- **Για εύρος ζώνης 3 εικονοστοιχείων**, τα επίπεδα πληρότητας και ορθότητας των ακμών, συνολικά, είναι ενθαρρυντικά (μ.ό. πληρότητας 76,8%, μ.ό ορθότητας 69,8%) και μειωμένα παρατηρούνται μόνο για την ολική ποιότητα των ακμών (μ.ό ποιότητας 57,7%). Για την υλοποιημένη μεθοδολογία με τις δύο μεθόδους προ-επεξεργασίας τα αντίστοιχα ποσοστά είναι τα εξής: μ.ό. πληρότητας 75,5%, μ.ό ορθότητας 65,3% και μ.ό ποιότητας 53,9%.
- **Για εύρος ζώνης 5 εικονοστοιχείων**, τα επίπεδα αξιολόγησης των ακμών, συνολικά, είναι πολύ καλά (μ.ό. πληρότητας 85,5%, μ.ό ορθότητας 79%, μ.ό ποιότητας 69,7%). Για την υλοποιημένη μεθοδολογία με τις δύο μεθόδους προ-επεξεργασίας τα αντίστοιχα ποσοστά είναι τα εξής: μ.ό. πληρότητας 84,3%, μ.ό ορθότητας 75,1% και μ.ό ποιότητας 65,9%.
- **Η υλοποιημένη μεθοδολογία για τη συσταδοποίηση K-μέσου κρίνεται ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για χαρτογραφήσεις μέγιστης κλίμακας 1:13.000.**

Εντροπία

Στη συγκεκριμένη απεικόνιση, η **μέτρηση της εντροπίας με χρήση της πολυεπίπεδης κατωφλίωσης δεν έχει καλά αποτελέσματα**. Στις εικόνες που επισυνάπτονται παρουσιάζεται και η εξαγωγή της ακτογραμμής έπειτα από μορφολογική επεξεργασία του προϊόντος της πολυεπίπεδης κατωφλίωσης. Έπειτα από πολλές δοκιμές προέκυψε ότι η ορθότερη κατωφλίωση ήταν επτά επιπέδων. Φαίνεται ότι δεν εντοπίζεται σωστά η ακτογραμμή, δηλαδή ως το όριο της χερσαίας και της υδάτινης επιφάνειας. Σημειώνεται ότι η εξαγωγή της ακτογραμμής με συγχώνευση πληροφορίας (fusion) είναι πολύ πιθανό να δίνει πολύ καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με την πολυεπίπεδη κατωφλίωση.



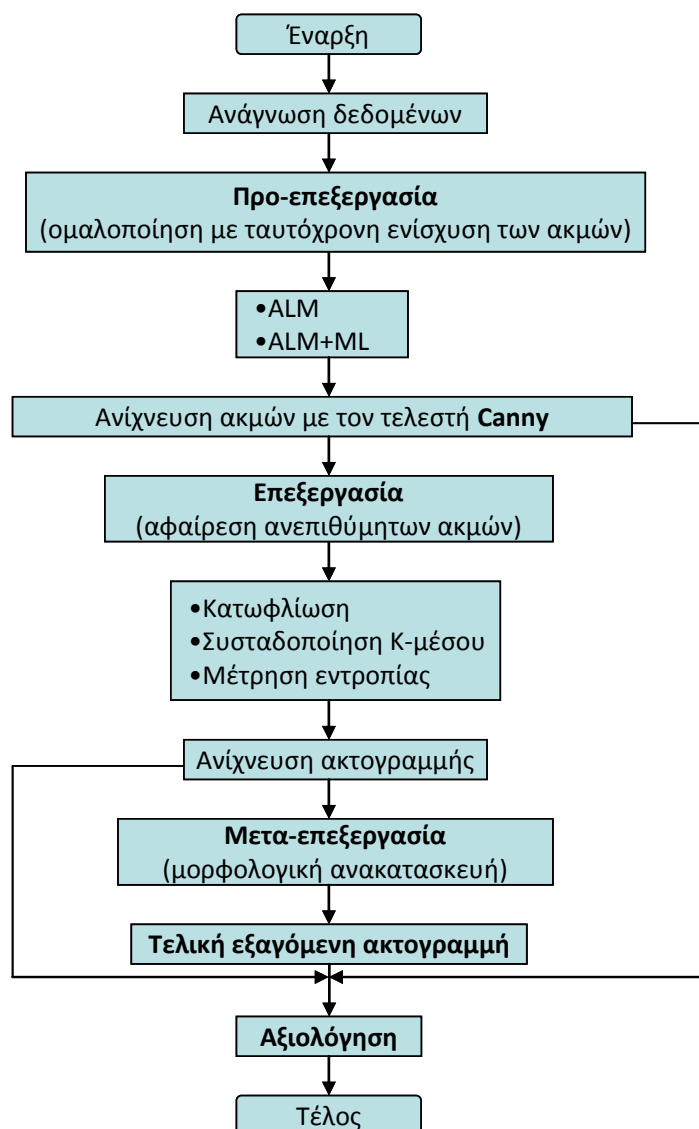
Εικόνα 4.8: 1^η Εφαρμογή, (α) απεικόνιση QUICKBIRD στο εγγύς υπέρυθρο κανάλι, (β) ανάλυση υφής με μέτρηση της εντροπίας, (γ) κατωφλίωση επτά επιπέδων στην εικόνα υφής, (δ) υπέρθεση ακτογραμμής στην αρχική απεικόνιση έπειτα από μέτρηση της εντροπίας.

Συνοψίζοντας:

- Οι ακμές που ανιχνεύονται «υποφέρουν» από κενά και ασυνέχειες, το οποίο επηρεάζει αρνητικά την τελική εξαγωγή της ακτογραμμής. Παράλληλα, εξαρτώνται άμεσα από την ποιότητα και τη δυσκολία της απεικόνισης (π.χ. θόρυβος, βράχια).
- Η κατωφλίωση στο υπέρυθρο κανάλι, αν και αποτελεί ενδεδειγμένη τεχνική, ωστόσο είναι πολύ χρονοβόρα όσον αφορά στην επιλογή του κατάλληλου κατωφλίου.
- Σε επίπεδο πληρότητας, η χρήση της ALM παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με τον συνδυασμό της με την ML. Το αντίθετο ισχύει για την ορθότητα

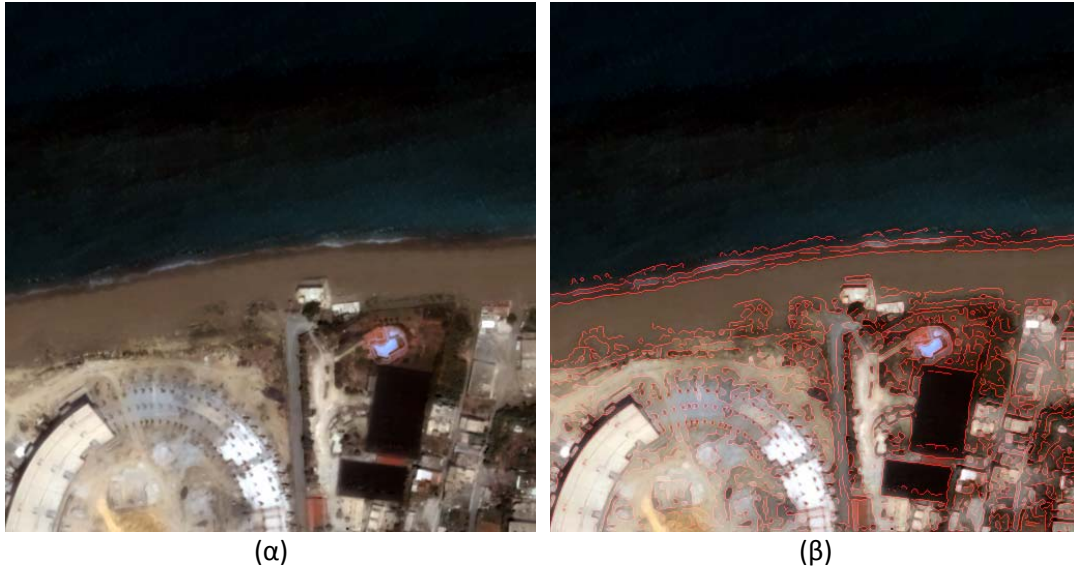
και την ολική ποιότητα των ακμών. Φωτοερμηνευτικά, δεν παρατηρήθηκαν έντονες διαφορές στην εξαγόμενη ακτογραμμή, για τις δύο μεθόδους προ-επεξεργασίας.

- Η κατωφλίωση ελάχιστα υπερέχει – σε επίπεδα πληρότητας, ορθότητας και ολικής ποιότητας – της συσταδοποίησης Κ-μέσου σε τέσσερις κλάσεις (μέγιστη απόκλιση περίπου 2,5%). Επομένως, **ο υλοποιημένος αλγόριθμος συσταδοποίησης έχει ενθαρρυντικά αποτελέσματα. Καταλληλότερη τεχνική προ-επεξεργασίας κρίνεται η ALM 100 επαναλήψεων συνδυαστικά με 5 επαναλήψεις ML.**
- Η μέθοδος που αναπτύχθηκε βάσει της εντροπίας δεν είχε καλά αποτελέσματα.
- Η τελική εξαγωγή της ακτογραμμής εξαρτάται – εκτός από την αρχική ανίχνευση των ακμών – και από την τεχνική επεξεργασίας και τα μορφολογικά εργαλεία που επιλέγονται για την ανακατασκευή της – συμπεριλαμβανομένου και του εύρους ζώνης.
- Η αξιολόγηση της εξαγόμενης ακτογραμμής εξαρτάται άμεσα από την ορθότητα της ψηφιοποίησης των δεδομένων αναφοράς, καθώς και από τη μετατροπή τους σε ψηφιδωτά δεδομένα.
- **Η υλοποιημένη μεθοδολογία – για την κατωφλίωση και τη συσταδοποίηση Κ-μέσου – κρίνεται ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί, με καλά αποτελέσματα, σε απεικονίσεις QUICKBIRD διακριτικής ικανότητας 0,7 m, για χαρτογραφήσεις μέγιστης κλίμακας 1:13.000.**

4.2 2^η Εφαρμογή – Περιοχή: ακτή Ηρακλείου Κρήτης (QUICKBIRD)

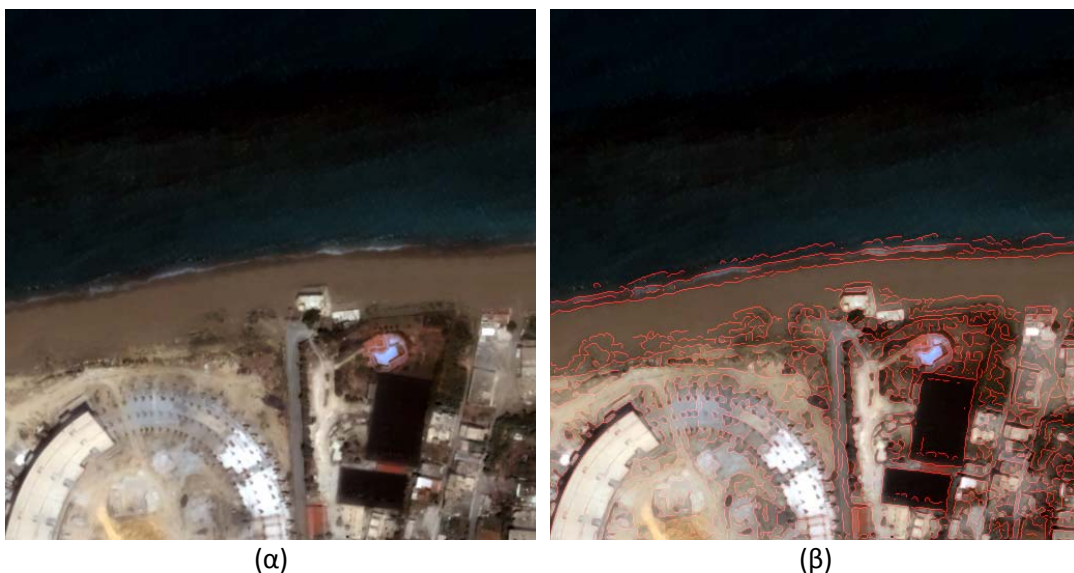
Σχήμα 4.3: 2^η Εφαρμογή, διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε, με σκοπό τη διερεύνηση ανίχνευσης ακτογραμμής με προηγμένες τεχνικές ομαλοποίησης και τον τελεστή Canny.

Όπως παρουσιάστηκε στο προηγούμενο εδάφιο, οι πιο αποτελεσματικές τεχνικές (από αυτές που εξετάστηκαν και για τις συγκεκριμένες εφαρμογές) ομαλοποίησης με ταυτόχρονη ενίσχυση των ακμών είναι η ανισοτροπική διάχυση ALM, καθώς και ο συνδυασμός της με ένα μικρό αριθμό επαναλήψεων μορφολογικής εξομάλυνσης. Κατά την εφαρμογή της ALM παρατηρήθηκε ότι τα καλύτερα αποτελέσματα δίνονται έπειτα από 200 επαναλήψεις. Η ανίχνευση των ακμών έγινε με τον βέλτιστο τελεστή Canny. Αν και παρουσιάζονται και σε αυτή την εφαρμογή κενά στην ανίχνευση των ακμών, ωστόσο, επειδή η απεικόνιση δεν παρουσιάζει δυσκολίες, δεν δημιουργήθηκαν έντονα προβλήματα από αυτό.



Εικόνα 4.9: 2^η Εφαρμογή, (α) απεικόνιση QUICKBIRD στο φυσικό έγχρωμο σύνθετο, (β) ανισοτροπική διάχυση ALM 200 επαναλήψεων και ανίχνευση ακμών με τον Canny.

Ο δεύτερος αλγόριθμος που υλοποιήθηκε περιλαμβάνει λίγες επαναλήψεις μορφολογικής εξομάλυνσης επικουρικά στην ενίσχυση των ακμών με την ALM, επιτυγχάνοντας μεγαλύτερη ομαλοποίηση κι επομένως απαλείφοντας κάποιες ανεπιθύμητες ακμές. Στην εικόνα 4.10(β) φαίνεται ότι πράγματι η χερσαία επιφάνεια είναι πιο ομαλοποιημένη. Η περιοχή που ιδιαίτερα ενδιαφέρει είναι κοντά στην ακτογραμμή, προκειμένου να απλοποιηθεί η ανίχνευσή της. Έπειτα από πληθώρα συνδυασμών, τα καλύτερα αποτελέσματα δόθηκαν έπειτα από 60 επαναλήψεις ALM και 5 επαναλήψεις ML.



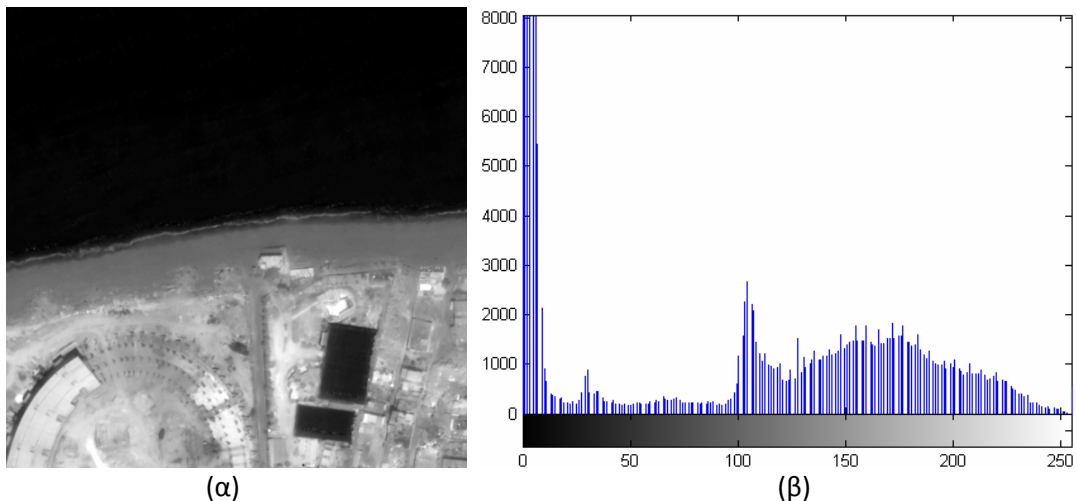
Εικόνα 4.10: 1^η Εφαρμογή, (α) απεικόνιση QUICKBIRD στο φυσικό έγχρωμο σύνθετο, (β) ανισοτροπική διάχυση ALM 60 επαναλήψεων, μορφολογική εξομάλυνση ML 5 επαναλήψεων και ανίχνευση ακμών με τον Canny.

Συνοψίζοντας, δεν παρουσιάστηκαν έντονα προβλήματα κατά την ανίχνευση των ακμών, εκτός από κάποια κενά στη συνέχειά τους.

Για την αφαίρεση των ανεπιθύμητων ακμών χρησιμοποιήθηκαν: (α) κατωφλίωση στο υπέρυθρο κανάλι βάσει του ιστογράμματος, (β) συσταδοποίηση K-μέσου, και (γ) μέτρηση της εντροπίας. Στη συνέχεια επισυνάπτονται και αναλύονται οι παράμετροι της εκάστοτε τεχνικής, καθώς και τα αποτελέσματα που προέκυψαν.

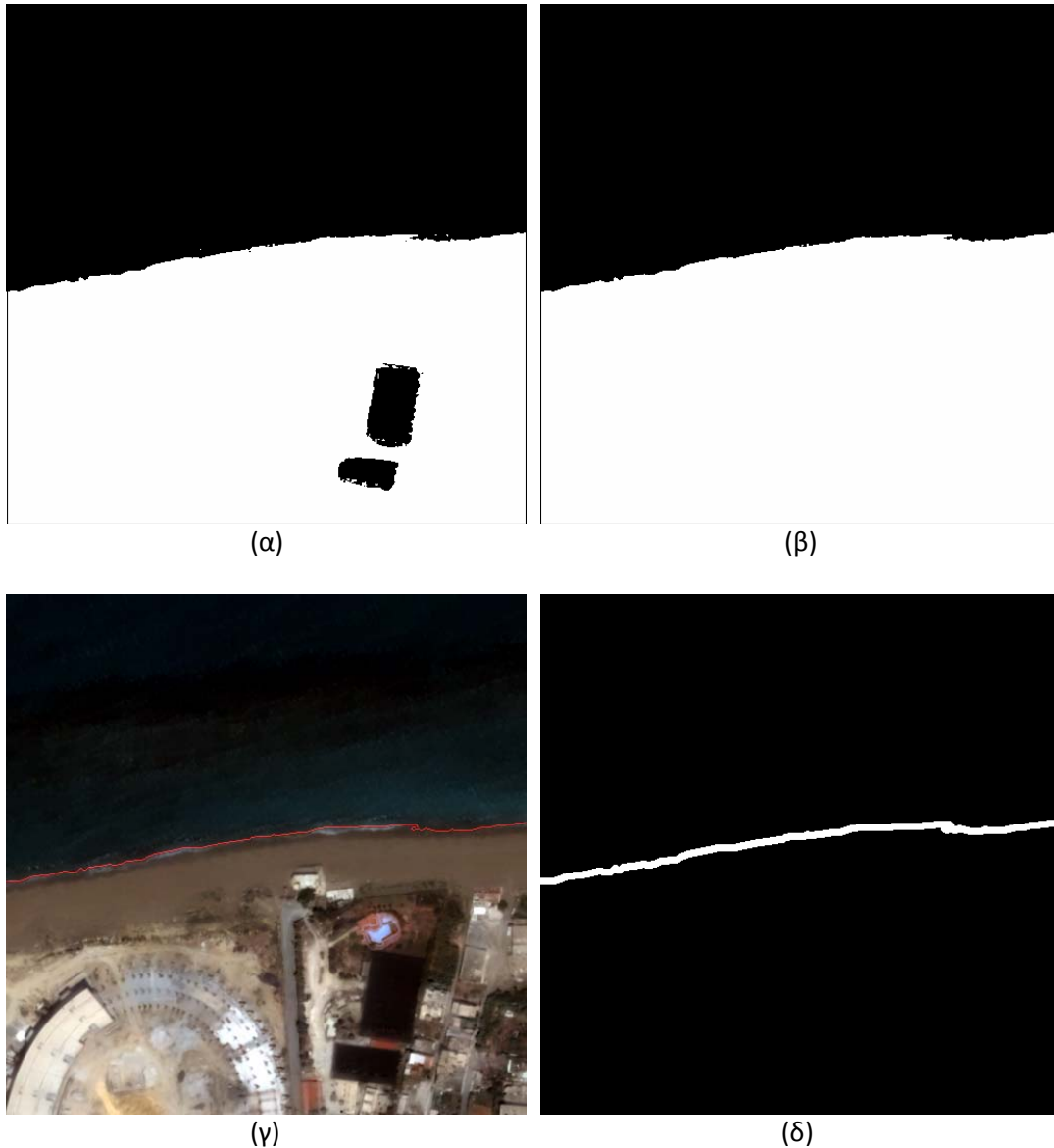
Κατωφλίωση

Η επιλογή του κατάλληλου κατωφλίου έγινε βάσει του ιστογράμματος της απεικόνισης. Όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, οι δύο «καμπάνες» του ιστογράμματος παρουσιάζουν την κατανομή των τιμών φωτεινότητας στην υδάτινη και τη χερσαία επιφάνεια, αντίστοιχα. Επομένως, το κατάλληλο κατώφλι ορίζεται στην τιμή 45, που εκτιμάται ως οριακή τιμή φωτεινότητας για τη θάλασσα περιοχή. Ωστόσο, δοκιμάστηκαν και άλλες τιμές φωτεινότητας για την επιλογή κατάλληλου κατωφλίου.



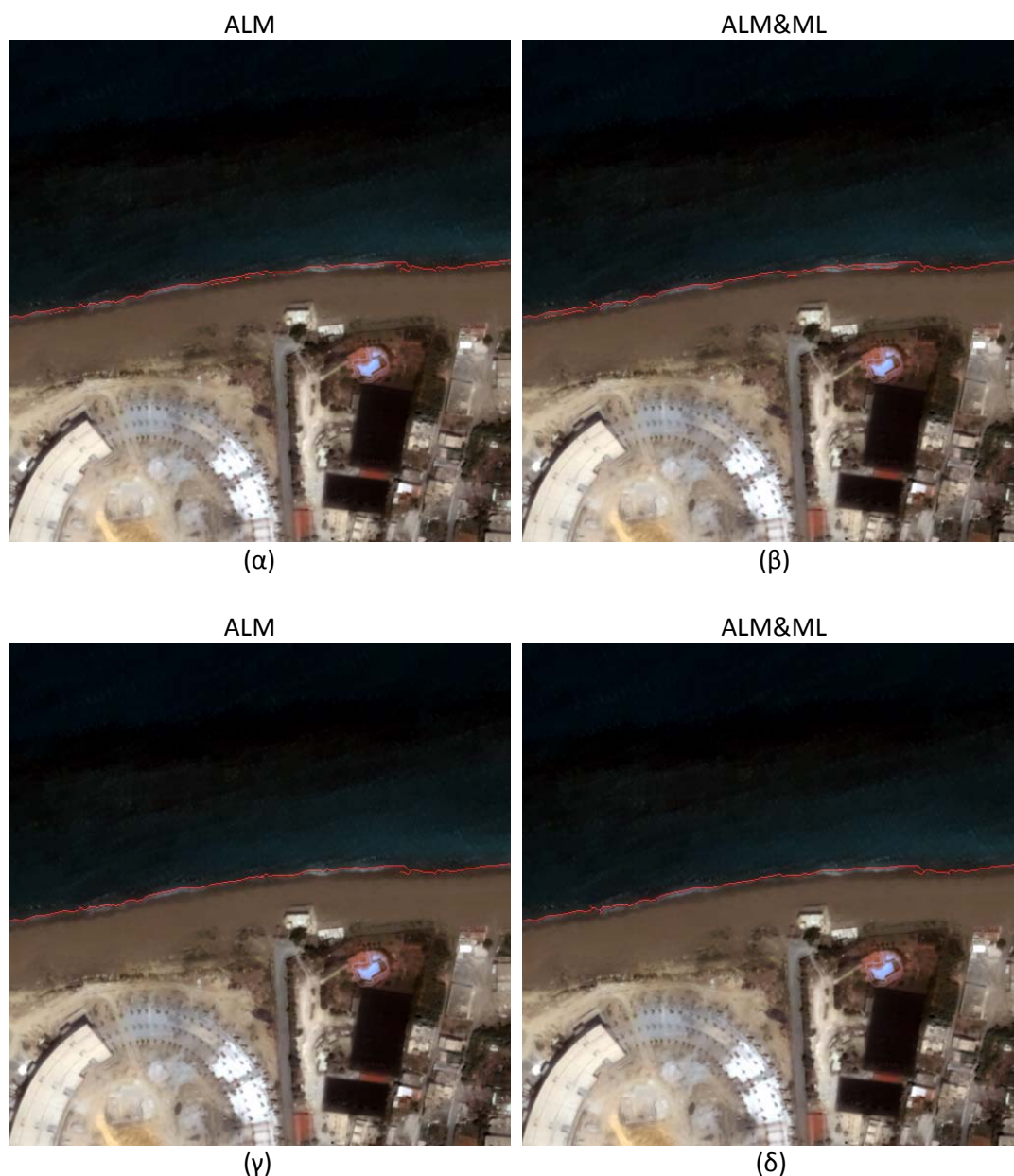
Εικόνα 4.11: 2^η Εφαρμογή, (α) απεικόνιση QUICKBIRD στο εγγύς υπέρυθρο κανάλι, (β) το ιστόγραμμα συχνοτήτων της απεικόνισης.

Τελικά, η δυαδική εικόνα που προέκυψε – έπειτα από απαλοιφή κάποιων μικρών αντικειμένων της χερσαίας και της υδάτινης επιφάνειας (εικόνα 4.12(α)) – καθώς και η θέση της ακτογραμμής, παρουσιάζονται της εικόνες 4.12(β) και 4.12(γ), αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι η ακτογραμμή που προέκυψε από την κατωφλίωση και παρουσιάζεται στην εικόνα 4.12(γ) δεν είναι η τελική θέση της ακτογραμμής, αλλά χρησιμοποιείται για την αφαίρεση των ανεπιθύμητων ακμών. Σε αυτήν τέθηκε ένα εύρος ζώνης 4 εικονοστοιχείων (εικόνα 4.12(δ)), οπότε και αφαιρέθηκαν οι περισσότερες από τις ανεπιθύμητες ακμές. Στην περίπτωση της ALM συνδυαστικά με ML, το εύρος ζώνης ήταν 5 εικονοστοιχεία.



Εικόνα 4.12: 2^η Εφαρμογή, (α) διαχωρισμός χερσαίας-υδάτινης επιφάνειας έπειτα από κατωφλίωση (δυαδική εικόνα), (β) αφαίρεση μικρών αντικειμένων της χερσαίας και της υδάτινης επιφάνειας, (γ) υπέρθεση ακτογραμμής στην αρχική απεικόνιση έπειτα από κατωφλίωση, (δ) εύρος ζώνης 4 εικονοστοιχείων στην ακτογραμμή που προκύπτει από την κατωφλίωση.

Το εύρος ζώνης τέθηκε στις εικόνες ακμών και που είχαν αρχικά υποστεί προ-επεξεργασία με: (α) ALM 200 επαναλήψεων (εικόνα 4.9(β)), και (β) ALM 60 επαναλήψεων συνδυαστικά με ML 5 επαναλήψεων (εικόνα 4.10(β)). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στις εικόνες 4.13(α) και 4.13(β), αντίστοιχα. Στην περίπτωση προ-επεξεργασίας με ALM, η εξαγόμενη ακτογραμμή προκύπτει, τελικά, χρησιμοποιώντας τα μορφολογικά εργαλεία `bwareaopen`, `imclose` και `bwmorph (thin)` (`bwareaopen` → `imclose` → `bwmorph`), αφαιρώντας τις μικρές εναπομείναντες ακμές (εικόνα 4.13(γ)). Στην περίπτωση προ-επεξεργασίας με ALM και ML, η εξαγόμενη ακτογραμμή προκύπτει, τελικά, χρησιμοποιώντας τα ίδια εργαλεία με διαφοροποιημένες όμως παραμέτρους (εικόνα 4.13(δ)).



Εικόνα 4.13: 2^η Εφαρμογή, υπέρθεση των ακμών εντός του εύρους ζώνης (εικόνα 4.12(δ)) στην αρχική απεικόνιση και τελική θέση ακτογραμμής, αντίστοιχα, έπειτα από προ-επεξεργασία με (α), (γ) ALM και (β), (δ) ALM συνδυαστικά με ML.

Η τελική θέση της ακτογραμμής προέκυψε από την αρχική ανίχνευση ακμών με τον τελεστή Canny και δεν παρατηρούνται διαφορές, σε επίπεδο φωτοερμηνείας, για τις δύο μεθόδους προ-επεξεργασίας. Στη συνέχεια παρατίθεται αξιολόγηση βάσει των κριτηρίων πληρότητας, ορθότητας και ποιότητας, για τρία προϊόντα ακτογραμμής: (α) ανίχνευση μόνο με τον Canny, (β) εξαγωγή μόνο από κατωφλίωση ως το όριο των δύο κλάσεων, και (γ) εξαγωγή βάσει της μεθοδολογίας που περιγράφηκε στο διάγραμμα ροής του σχήματος 4.3, για την κατωφλίωση. Η σύγκριση πραγματοποιήθηκε για ζώνες εύρους 1, 3 και 5 εικονοστοιχείων, σε σχέση με την ψηφιοποιημένη ακτογραμμή αναφοράς.

		Εύρος ζώνης (εικονοστοιχεία)		
ΠΛΗΡΟΤΗΤΑ		1	3	5
	Κατωφλίωση	0.55727	0.74796	0.84972
ALM	Canny	0.6332	0.79242	0.87571
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.61647	0.79863	0.88177
ALM&ML	Canny	0.56371	0.7679	0.86242
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.56371	0.76757	0.86359
		Εύρος ζώνης (εικονοστοιχεία)		
ΟΡΘΟΤΗΤΑ		1	3	5
	Κατωφλίωση	0.55159	0.77744	0.86943
ALM	Canny	0.6332	0.8273	0.89908
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.60633	0.79267	0.87459
ALM&ML	Canny	0.56154	0.77627	0.86529
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.55129	0.7611	0.85457
		Εύρος ζώνης (εικονοστοιχεία)		
ΠΟΙΟΤΗΤΑ		1	3	5
	Κατωφλίωση	0.38353	0.61605	0.75355
ALM	Canny	0.46328	0.67994	0.79733
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.44026	0.66063	0.78279
ALM&ML	Canny	0.39142	0.62875	0.76034
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.38641	0.61855	0.75294

Πίνακας 4.3: 2^η Εφαρμογή, αξιολόγηση ανίχνευσης ακτογραμμής με: κατωφλίωση, Canny και την υλοποιημένη μεθοδολογία, για τις δυο μεθόδους προ-επεξεργασίας.

Με βάση τον παραπάνω πίνακα, παρατηρούνται τα εξής:

- Σε επίπεδο **πληρότητας**, η ανίχνευση των ακμών με προ-επεξεργασία την ALM έχει καλύτερα αποτελέσματα από την ALM συνδυαστικά με την ML. Ωστόσο, συνδυαστικά με την κατωφλίωση – η οποία έχει, γενικά, χειρότερα αποτελέσματα σε σχέση με τον Canny – **η ανίχνευση των ακμών με προ-επεξεργασία την ALM, βάσει της υλοποιημένης μεθοδολογίας, παρουσιάζει αυξημένα επίπεδα πληρότητας, καλύτερα από τον Canny.**
- Σε επίπεδα **ορθότητας και ποιότητας**, η ανίχνευση των ακμών με προ-επεξεργασία την ALM έχει καλύτερα αποτελέσματα από την ALM συνδυαστικά με την ML, όπως και από την κατωφλίωση. Κατά την προ-επεξεργασία με την ALM συνδυαστικά με ML, τα επίπεδα ορθότητας του Canny, της κατωφλίωσης και της υλοποιημένης μεθοδολογίας δεν παρουσιάζουν διαφορές, αλλά είναι χαμηλότερα σε σχέση με την ALM. Επομένως, **η ανίχνευση των ακμών με προ-επεξεργασία την ALM, βάσει της υλοποιημένης μεθοδολογίας, παρουσιάζει τα υψηλότερα επίπεδα ορθότητας και ολικής ποιότητας.**
- Για **εύρος ζώνης 1 εικονοστοιχείου** οι δείκτες αξιολόγησης, συνολικά, δεν κυμαίνονται σε ικανοποιητικά επίπεδα (μ.ό πληρότητας 58,7%, μ.ό. ορθότητας

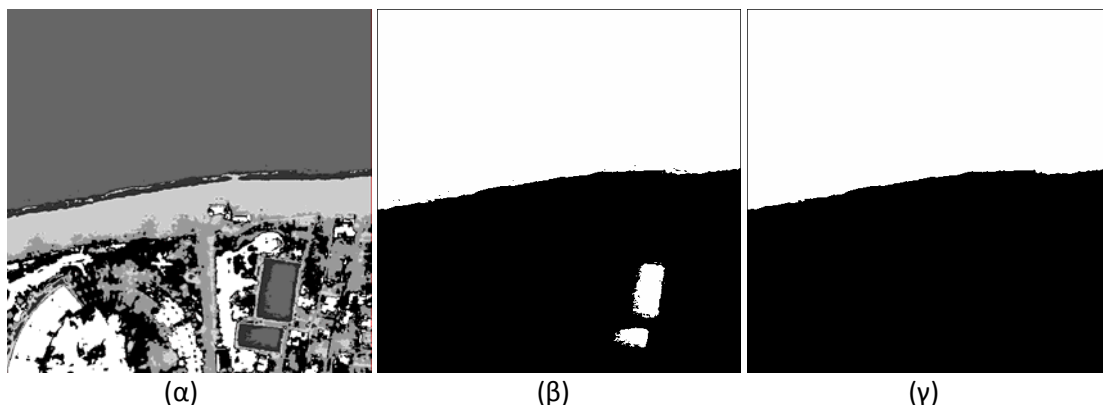
58%, μ.ό. ποιότητας 41,3%). Η συγκεκριμένη απεικόνιση έχει διακριτική ικανότητα 0,7 m (rap-sharpened), και η δεδομένη ζώνη (3 εικονοστοιχεία → ± 0,7m) αντιστοιχεί σε κλίμακα χαρτογράφησης 1:4.500, περίπου.

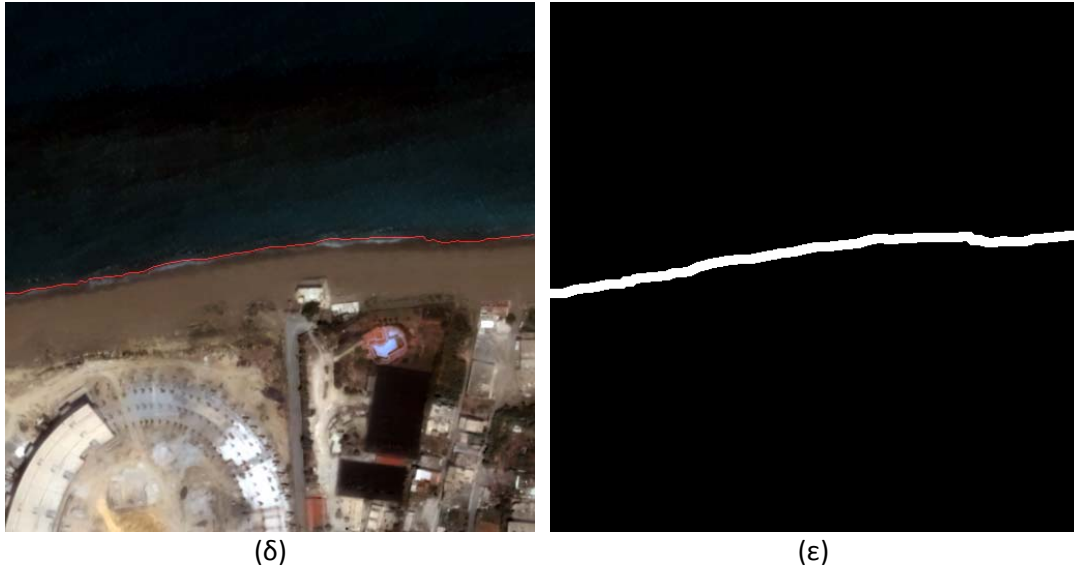
- **Για εύρος ζώνης 3 εικονοστοιχείων**, τα επίπεδα αξιολόγησης των ακμών, συνολικά, είναι ενθαρρυντικά (μ.ό. πληρότητας 77,5%, μ.ό ορθότητας 78,7%, μ.ό ποιότητας 64,1%). Για την υλοποιημένη μεθοδολογία με τις δύο μεθόδους προεπεξεργασίας τα αντίστοιχα ποσοστά είναι τα εξής: μ.ό. πληρότητας 78,3%, μ.ό ορθότητας 77,7% και μ.ό ποιότητας 64%. Η δεδομένη ζώνη (5 εικονοστοιχεία → ± 1,4m) αντιστοιχεί σε κλίμακα χαρτογράφησης 1:7.000.
- **Για εύρος ζώνης 5 εικονοστοιχείων**, τα επίπεδα αξιολόγησης των ακμών, συνολικά, είναι πολύ καλά (μ.ό. πληρότητας 86,7%, μ.ό ορθότητας 87,3%, μ.ό ποιότητας 76,9%). Για την υλοποιημένη μεθοδολογία με τις δύο μεθόδους προεπεξεργασίας τα αντίστοιχα ποσοστά είναι τα εξής: μ.ό. πληρότητας 87,3%, μ.ό ορθότητας 86,5% και μ.ό ποιότητας 76,8%. Η δεδομένη ζώνη (9 εικονοστοιχεία → ± 2,8m) αντιστοιχεί σε κλίμακα χαρτογράφησης 1:13.000, περίπου.
- **Η υλοποιημένη μεθοδολογία για την κατωφλίωση κρίνεται ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για χαρτογραφήσεις μέγιστης κλίμακας 1:7.000.**

Σημειώνεται ότι η ακτογραμμή που ανιχνεύτηκε μόνο με τον Canny και χρησιμοποιείται στην αξιολόγηση, προέκυψε από τα δεδομένα αναφοράς με χρήση εύρους ζώνης 4 και 5 εικονοστοιχείων για τις ALM και ALM συνδυαστικά με ML, αντίστοιχα, καθώς και μορφολογικών εργαλείων.

Συσταδοποίηση K-μέσου

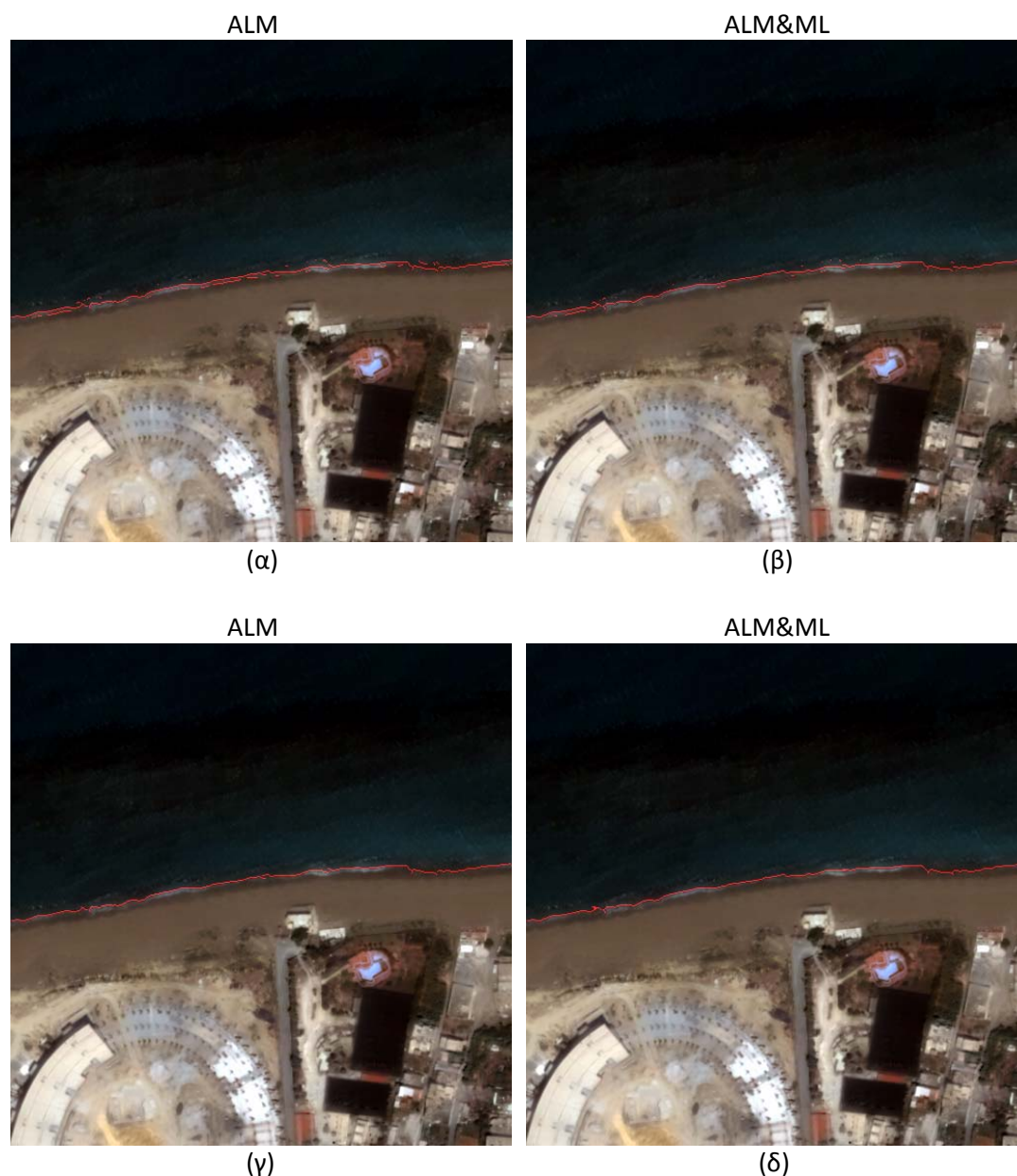
Η συγκεκριμένη απεικόνιση κατηγοριοποιήθηκε σε έξι κλάσεις (εικόνα 4.14(α)). Έπειτα από την απαλοιφή κάποιων μικρών αντικειμένων της χερσαίας και της υδάτινης επιφάνειας, προέκυψε ο τελικός διαχωρισμός της απεικόνισης σε δύο κλάσεις (εικόνα 4.14(γ)). Ομοίως με την κατωφλίωση, ανιχνεύτηκε η θέση της ακτογραμμής ως το όριο των δύο επιφανειών (εικόνα 4.14(δ)).





Εικόνα 4.14: 2^η Εφαρμογή, (α) συσταδοποίηση Κ-μέσου σε έξι κλάσεις, (β) διαχωρισμός χερσαίας-υδάτινης επιφάνειας σε δύο κλάσεις, (γ) αφαίρεση μικρών αντικειμένων της χερσαίας και της υδάτινης επιφάνειας, (γ) υπέρθεση ακτογραμμής στην αρχική απεικόνιση έπειτα από συσταδοποίηση Κ-μέσου, (ε) εύρος ζώνης 8 εικονοστοιχείων στην ακτογραμμή που προκύπτει από τη συσταδοποίηση.

Στην ακτογραμμή που προέκυψε ως το όριο των δύο κλάσεων της χερσαίας και της υδάτινης επιφάνειας τέθηκε ένα εύρος ζώνης 5 εικονοστοιχείων και για τις δύο μεθόδους προ-επεξεργασίας (εικόνα 4.14(ε)), με σκοπό την αφαίρεση ανεπιθύμητων ακμών. Το εύρος ζώνης τέθηκε στις εικόνες ακμών και που είχαν αρχικά υποστεί προ-επεξεργασία με: (α) ALM 200 επαναλήψεων (εικόνα 4.9(β)), και (β) ALM 60 επαναλήψεων συνδυαστικά με ML 5 επαναλήψεων (εικόνα 4.10(β)). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στις εικόνες 4.15(α) και 4.15(β), αντίστοιχα. Στην περίπτωση προ-επεξεργασίας με ALM, η εξαγόμενη ακτογραμμή προκύπτει, τελικά, χρησιμοποιώντας το μορφολογικό εργαλείο `bwareaopen`, αφαιρώντας τις μικρές εναπομείνουσες ακμές (εικόνα 4.15(γ)). Στην περίπτωση προ-επεξεργασίας με ALM και ML, η εξαγόμενη ακτογραμμή προκύπτει, τελικά, χρησιμοποιώντας τα μορφολογικά εργαλεία `bwareaopen`, `imclose` και `bwmorph (thin)` (`bwareaopen` → `imclose` → `bwmorph`) (εικόνα 4.15(δ)).



Εικόνα 4.15: 2^η Εφαρμογή, υπέρθεση των ακμών εντός του εύρους ζώνης (εικόνα 4.14(ε)) στην αρχική απεικόνιση και τελική θέση ακτογραμμής, αντίστοιχα, έπειτα από προ-επεξεργασία με (α), (γ) ALM και (β), (δ) ALM συνδυαστικά με ML.

Η τελική θέση της ακτογραμμής προέκυψε από την αρχική ανίχνευση ακμών με τον τελεστή Canny και δεν παρατηρούνται έντονες διαφορές, σε επίπεδο φωτοερμηνείας, για τις δύο μεθόδους προ-επεξεργασίας. Στη συνέχεια παρατίθεται αξιολόγηση βάσει των κριτηρίων πληρότητας, ορθότητας και ποιότητας, για τρία προϊόντα ακτογραμμής: (α) ανίχνευση μόνο με τον Canny, (β) εξαγωγή μόνο από συσταδοποίηση K-μέσου ως το όριο των δύο κλάσεων, και (γ) εξαγωγή βάσει της μεθοδολογίας που περιγράφηκε στο διάγραμμα ροής του σχήματος 4.3, για τη συσταδοποίηση. Η σύγκριση πραγματοποιήθηκε για ζώνες εύρους 1, 3 και 5 εικονοστοιχείων, σε σχέση με την ψηφιοποιημένη ακτογραμμή αναφοράς.

		Εύρος ζώνης (εικονοστοιχεία)		
ΠΛΗΡΟΤΗΤΑ		1	3	5
	Συσταδοποίηση Κ-μέσου	0.37001	0.63714	0.78308
ALM	Canny	0.6332	0.79242	0.87571
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.62741	0.80418	0.88392
ALM&ML	Canny	0.56371	0.7679	0.86242
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.56306	0.76724	0.86183
		Εύρος ζώνης (εικονοστοιχεία)		
ΟΡΘΟΤΗΤΑ		1	3	5
	Συσταδοποίηση Κ-μέσου	0.37459	0.68004	0.81493
ALM	Canny	0.6332	0.8273	0.89908
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.61826	0.80735	0.88305
ALM&ML	Canny	0.56154	0.77627	0.86529
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.55875	0.77638	0.86538
		Εύρος ζώνης (εικονοστοιχεία)		
ΠΟΙΟΤΗΤΑ		1	3	5
	Συσταδοποίηση Κ-μέσου	0.22872	0.49019	0.66484
ALM	Canny	0.46328	0.67994	0.79733
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.45223	0.67471	0.79129
ALM&ML	Canny	0.39142	0.62875	0.76034
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.38976	0.62838	0.75995

Πίνακας 4.4: 2^η Εφαρμογή, αξιολόγηση ανίχνευσης ακτογραμμής με: συσταδοποίηση Κ-μέσου, Canny και την υλοποιημένη μεθοδολογία, για τις δυο μεθόδους προ-επεξεργασίας.

Με βάση τον παραπάνω πίνακα, παρατηρούνται τα εξής:

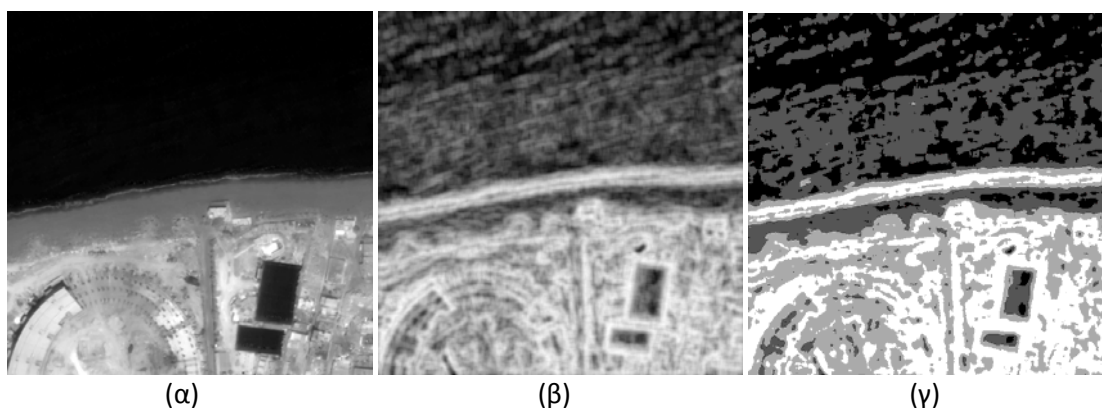
- Σε επίπεδα πληρότητας, ορθότητας, και ολικής ποιότητας, η ανίχνευση των ακμών με προ-επεξεργασία την ALM έχει καλύτερα αποτελέσματα από την ALM συνδυαστικά με την ML. Ωστόσο, συνδυαστικά με τη συσταδοποίηση Κ-μέσου – η οποία έχει, γενικά, χειρότερα αποτελέσματα σε σχέση με τον Canny – η ανίχνευση των ακμών με προ-επεξεργασία την ALM, βάσει της υλοποιημένης μεθοδολογίας, παρουσιάζει αυξημένα επίπεδα πληρότητας, ορθότητας και ολικής ποιότητας, καλύτερα από τον Canny όσον αφορά στην πληρότητα και χωρίς διαφορές όσον αφορά στην ορθότητα και την ολική ποιότητα των ακμών.
- Για εύρος ζώνης 1 εικονοστοιχείου οι δείκτες αξιολόγησης, συνολικά, δεν κυμαίνονται σε ικανοποιητικά επίπεδα (μ.ό. πληρότητας 55,2%, μ.ό. ορθότητας 55%, μ.ό. ποιότητας 38,5%).
- Για εύρος ζώνης 3 εικονοστοιχείων, τα επίπεδα αξιολόγησης των ακμών, συνολικά, είναι ενθαρρυντικά (μ.ό. πληρότητας 75,4%, μ.ό. ορθότητας 77,3%, μ.ό. ποιότητας 62%). Για την υλοποιημένη μεθοδολογία με τις δύο μεθόδους προ-

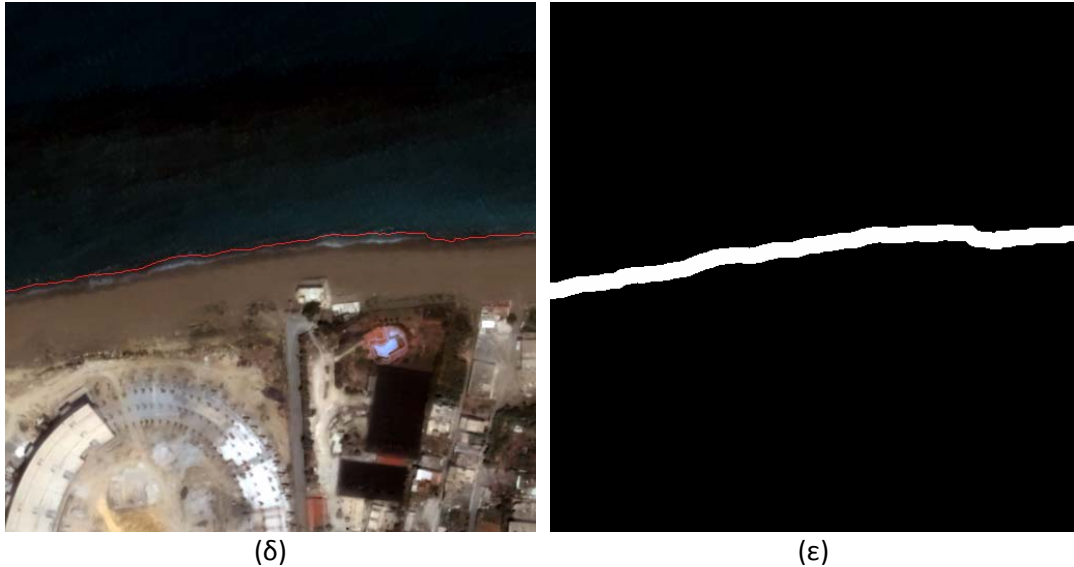
επεξεργασίας τα αντίστοιχα ποσοστά είναι τα εξής: μ.ό. πληρότητας 78,6%, μ.ό ορθότητας 79,2% και μ.ό ποιότητας 65,2%.

- **Για εύρος ζώνης 5 εικονοστοιχείων**, τα επίπεδα αξιολόγησης των ακμών, συνολικά, είναι πολύ καλά (μ.ό. πληρότητας 85,3%, μ.ό ορθότητας 86,6%, μ.ό ποιότητας 75,5%). Για την υλοποιημένη μεθοδολογία με τις δύο μεθόδους προεπεξεργασίας τα αντίστοιχα ποσοστά είναι τα εξής: μ.ό. πληρότητας 87,3%, μ.ό ορθότητας 87,4% και μ.ό ποιότητας 77,6%.
- **Η υλοποιημένη μεθοδολογία για τη συσταδοποίηση Κ-μέσου κρίνεται ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για χαρτογραφήσεις μέγιστης κλίμακας 1:7.000.**

Εντροπία

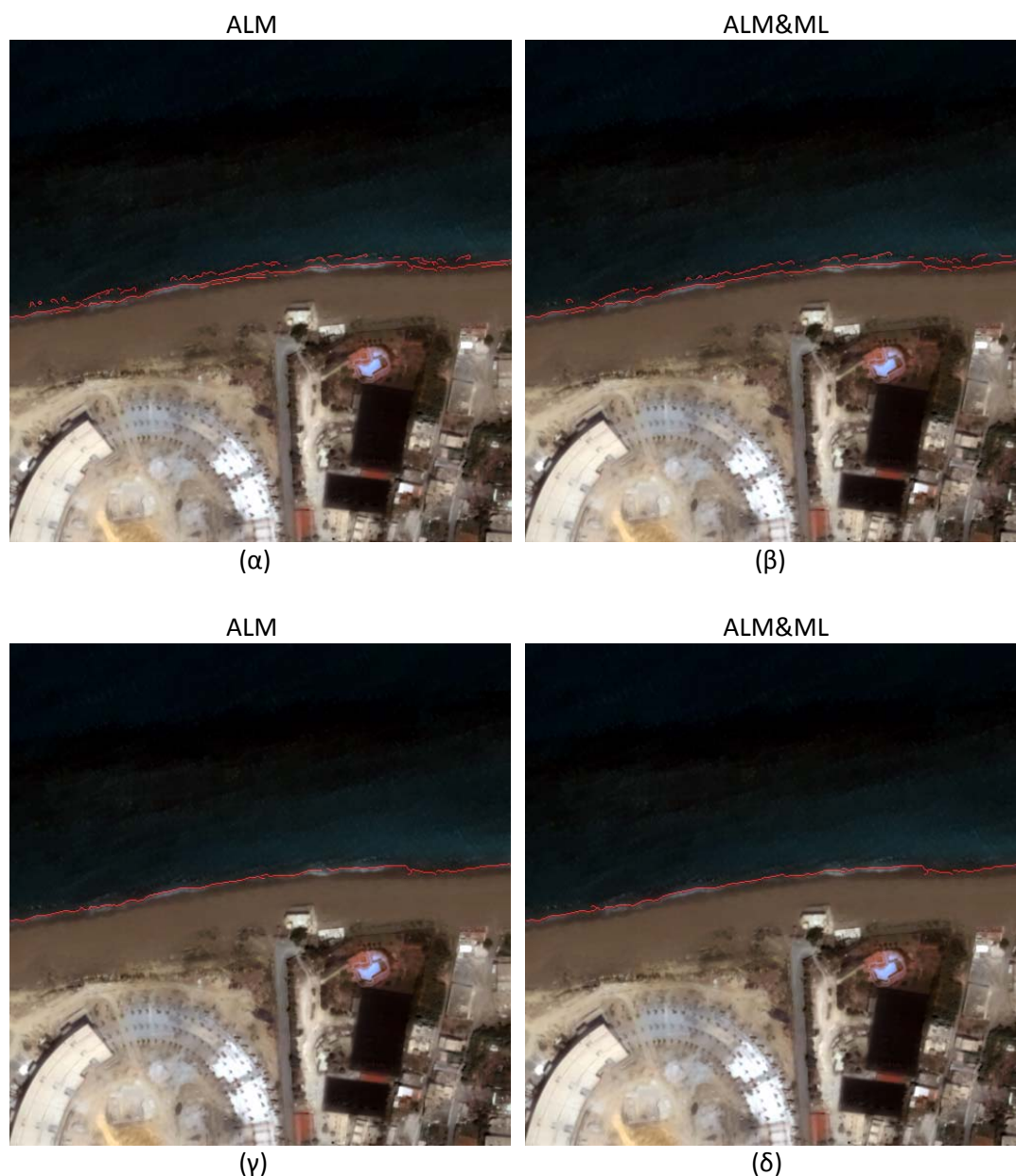
Στη συγκεκριμένη απεικόνιση η μέτρηση της εντροπίας με χρήση της πολυεπίπεδης κατωφλίωσης δεν έχει καλά αποτελέσματα, σε αντίθεση ωστόσο με την υλοποιημένη μεθοδολογία. Έπειτα από τη μέτρηση της εντροπίας και αρκετές δοκιμές, η απεικόνιση κατωφλιώθηκε σε τέσσερα επίπεδα. Στις εικόνες που επισυνάπτονται παρουσιάζεται και η εξαγωγή της ακτογραμμής έπειτα από μορφολογική επεξεργασία του προϊόντος της πολυεπίπεδης κατωφλίωσης. Φαίνεται ότι δεν εντοπίζεται σωστά η ακτογραμμή, δηλαδή ως το όριο της χερσαίας και της υδάτινης επιφάνειας, η οποία είναι αρκετά μετατοπισμένη από την αληθή της θέση.





Εικόνα 4.16: 2^η Εφαρμογή, (α) απεικόνιση QUICKBIRD στο εγγύς υπέρυθρο κανάλι, (β) ανάλυση υφής με μέτρηση της εντροπίας, (γ) κατωφλίωση τεσσάρων επιπέδων στην εικόνα υφής, (δ) υπέρθεση ακτογραμμής στην αρχική απεικόνιση έπειτα από μέτρηση της εντροπίας, (ε) εύρος ζώνης 8 εικονοστοιχείων στην ακτογραμμή που προκύπτει από την εντροπία.

Ωστόσο, επειδή πρόκειται για εύκολη περίπτωση ανίχνευσης ακτογραμμής και η τελική της θέση προκύπτει από τον Canny, τέθηκε ένα εύρος ζώνης 8 εικονοστοιχείων και για τις δύο μεθόδους προ-επεξεργασίας (εικόνα 4.16(ε)), με σκοπό την αφαίρεση ανεπιθύμητων ακμών. Το εύρος ζώνης τέθηκε στις εικόνες ακμών και που είχαν αρχικά υποστεί προ-επεξεργασία με: (α) ALM 200 επαναλήψεων (εικόνα 4.9(β)), και (β) ALM 60 επαναλήψεων συνδυαστικά με ML 5 επαναλήψεων (εικόνα 4.10(β)). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στις εικόνες 4.17(α) και 4.17(β), αντίστοιχα. Και στις δύο περιπτώσεις προ-επεξεργασίας η εξαγόμενη ακτογραμμή προκύπτει, τελικά, χρησιμοποιώντας το μορφολογικό εργαλείο bwareaopen, αφαιρώντας τις εναπομείνουσες ακμές (εικόνες 4.17(γ) και 4.17(δ)).



Εικόνα 4.17: 2^η Εφαρμογή, υπέρθεση των ακμών εντός του εύρους ζώνης (εικόνα 4.16(ε)) στην αρχική απεικόνιση και τελική θέση ακτογραμμής, αντίστοιχα, έπειτα από προ-επεξεργασία με (α), (γ) ALM και (β), (δ) ALM συνδυαστικά με ML.

Η τελική θέση της ακτογραμμής προέκυψε από την αρχική ανίχνευση ακμών με τον τελεστή Canny και δεν παρατηρούνται έντονες διαφορές, σε επίπεδο φωτοερμηνείας, για τις δύο μεθόδους προ-επεξεργασίας. Στη συνέχεια παρατίθεται αξιολόγηση βάσει των κριτηρίων πληρότητας, ορθότητας και ποιότητας, για τρία προϊόντα ακτογραμμής: (α) ανίχνευση μόνο με τον Canny, (β) εξαγωγή μόνο από την εντροπία, και (γ) εξαγωγή βάσει της μεθοδολογίας που περιγράφηκε στο διάγραμμα ροής του σχήματος 4.3, για την εντροπία. Η σύγκριση πραγματοποιήθηκε για ζώνες εύρους 1, 3 και 5 εικονοστοιχείων, σε σχέση με την ψηφιοποιημένη ακτογραμμή αναφοράς.

		Εύρος ζώνης (εικονοστοιχεία)		
ΠΛΗΡΟΤΗΤΑ		1	3	5
	Μέτρηση Εντροπίας	0.019305	0.15103	0.45984
ALM	Canny	0.6332	0.79242	0.87571
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.61647	0.7934	0.87766
ALM&ML	Canny	0.56371	0.7679	0.86242
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.56821	0.76888	0.86222
		Εύρος ζώνης (εικονοστοιχεία)		
ΟΡΘΟΤΗΤΑ		1	3	5
	Μέτρηση Εντροπίας	0.019506	0.15926	0.47497
ALM	Canny	0.6332	0.8273	0.89908
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.61568	0.80311	0.88076
ALM&ML	Canny	0.56154	0.77627	0.86529
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.56821	0.77216	0.86172
		Εύρος ζώνης (εικονοστοιχεία)		
ΠΟΙΟΤΗΤΑ		1	3	5
	Μέτρηση Εντροπίας	0.0097975	0.084031	0.30487
ALM	Canny	0.46328	0.67994	0.79733
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.44517	0.6642	0.78445
ALM&ML	Canny	0.39142	0.62875	0.76034
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.39279	0.6267	0.75742

Πίνακας 4.5: 2^η Εφαρμογή, αξιολόγηση ανίχνευσης ακτογραμμής με: μέτρηση εντροπίας, Canny και την υλοποιημένη μεθοδολογία, για τις δυο μεθόδους προ-επεξεργασίας.

Με βάση τον παραπάνω πίνακα, παρατηρούνται τα εξής:

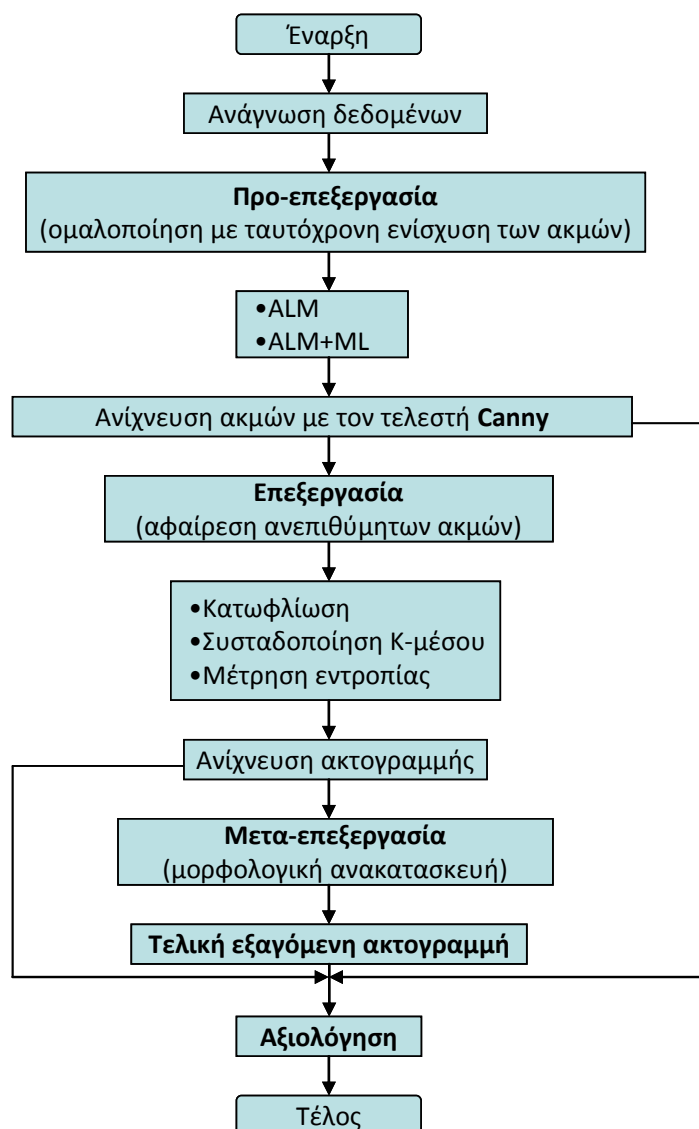
- Σε επίπεδα πληρότητας, ορθότητας, και ολικής ποιότητας, η ανίχνευση των ακμών με προ-επεξεργασία την ALM έχει καλύτερα αποτελέσματα από την ALM συνδυαστικά με την ML. Ωστόσο, συνδυαστικά με την εντροπία – η οποία έχει, γενικά, πολύ χειρότερα αποτελέσματα σε σχέση με τον Canny – η ανίχνευση των ακμών με προ-επεξεργασία την ALM, βάσει της υλοποιημένης μεθοδολογίας, παρουσιάζει αυξημένα επίπεδα πληρότητας, ορθότητας και ολικής ποιότητας, χωρίς έντονες διαφορές από τον Canny. Θα πρέπει, ωστόσο, να σημειωθεί ότι η συγκεκριμένη περίπτωση ακτογραμμής ήταν απλή. Ως εκ τούτου, η χρήση της εντροπίας σε πιο απαιτητικές απεικονίσεις είναι πολύ πιθανό να μην παρουσιάζει αποδεκτά αποτελέσματα, λόγω των εξαιρετικά χαμηλών επιπέδων πληρότητας, ορθότητας και ολικής ποιότητας της τεχνικής.
- Για εύρος ζώνης 1 εικονοστοιχείου οι δείκτες αξιολόγησης, συνολικά, δεν κυμαίνονται σε ικανοποιητικά επίπεδα (μ.ό. πληρότητας 48%, μ.ό. ορθότητας 48%, μ.ό. ποιότητας 34%).
- Για εύρος ζώνης 3 εικονοστοιχείων, τα επίπεδα αξιολόγησης των ακμών, συνολικά, παρουσιάζονται χαμηλά λόγω της ακαταλληλότητας της εντροπίας

(μ.ό. πληρότητας 65,5%, μ.ό ορθότητας 66,8%, μ.ό ποιότητας 53,7%). Ωστόσο, για την υλοποιημένη μεθοδολογία με τις δύο μεθόδους προ-επεξεργασίας τα αντίστοιχα ποσοστά είναι ενθαρρυντικά: μ.ό. πληρότητας 78,1%, μ.ό ορθότητας 78,8% και μ.ό ποιότητας 64,5%.

- **Για εύρος ζώνης 5 εικονοστοιχείων**, τα επίπεδα αξιολόγησης των ακμών, συνολικά, παρουσιάζονται ικανοποιητικά (μ.ό. πληρότητας 78,8%, μ.ό ορθότητας 79,6%, μ.ό ποιότητας 68,1%). Για την υλοποιημένη μεθοδολογία με τις δύο μεθόδους προ-επεξεργασίας τα αντίστοιχα ποσοστά είναι πολύ καλά: μ.ό. πληρότητας 87%, μ.ό ορθότητας 87,1% και μ.ό ποιότητας 77,1%.
- **Η υλοποιημένη μεθοδολογία για την εντροπία κρίνεται ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για χαρτογραφήσεις μέγιστης κλίμακας 1:7.000.**

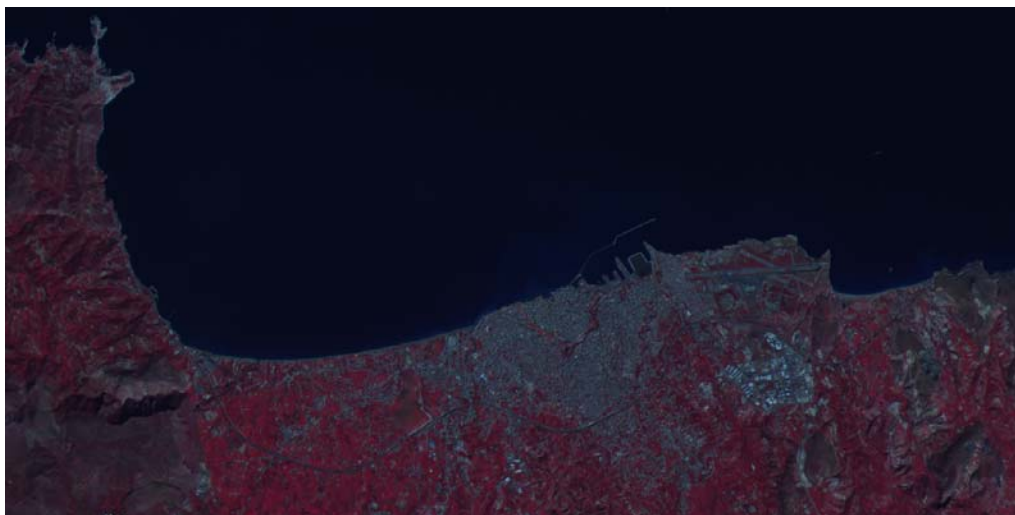
Συνοψίζοντας:

- Οι ακμές που ανιχνεύονται δεν «υποφέρουν» από έντονες ασυνέχειες, το οποίο επηρεάζει θετικά την τελική εξαγωγή της ακτογραμμής.
- Η κατωφλίωση στο υπέρυθρο κανάλι, αν και αποτελεί ενδεδειγμένη τεχνική, ωστόσο είναι πολύ χρονοβόρα όσον αφορά στην επιλογή του κατάλληλου κατωφλίου.
- Βάσει των κριτηρίων αξιολόγησης, η χρήση της ALM παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με τον συνδυασμό της με την ML. Σε επίπεδο φωτοερμηνείας, δεν παρατηρήθηκαν έντονες διαφορές στην εξαγόμενη ακτογραμμή, για τις δύο μεθόδους προ-επεξεργασίας.
- Η κατωφλίωση υπερέχει – σε επίπεδα πληρότητας, ορθότητας και ολικής ποιότητας – της συσταδοποίησης Κ-μέσου σε έξι κλάσεις. Δεν ισχύει το ίδιο, όμως, για την υλοποιημένη μεθοδολογία, όπου η συσταδοποίηση συνδυαστικά με τον Canpy παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα. Επομένως, **ο υλοποιημένος αλγόριθμος συσταδοποίησης έχει ενθαρρυντικά αποτελέσματα. Καταλληλότερη τεχνική προ-επεξεργασίας κρίνεται η ALM 200 επαναλήψεων.**
- Αν και η μέτρηση της εντροπίας δεν προτείνεται, βάσει των δεικτών αξιολόγησης, στην υλοποιημένη μεθοδολογία τα αποτελέσματα είναι παρόμοια με αυτά των δύο άλλων μεθόδων, και μάλιστα σε κάποιες περιπτώσεις καλύτερα. Ωστόσο, εκτιμάται ότι η χρήση της σε πιο απαιτητικές απεικονίσεις είναι πολύ πιθανό να μην παρουσιάζει αποδεκτά αποτελέσματα, λόγω των εξαιρετικά χαμηλών επιπέδων πληρότητας, ορθότητας και ολικής ποιότητας της τεχνικής.
- Η τελική εξαγωγή της ακτογραμμής εξαρτάται – εκτός από την αρχική ανίχνευση των ακμών – και από την τεχνική επεξεργασίας και τα μορφολογικά εργαλεία που επιλέγονται για την ανακατασκευή της – συμπεριλαμβανομένου και του εύρους ζώνης.
- Η αξιολόγηση της εξαγόμενης ακτογραμμής εξαρτάται άμεσα από την ορθότητα της ψηφιοποίησης των δεδομένων αναφοράς, καθώς και από τη μετατροπή τους σε ψηφιδωτά δεδομένα.
- **Η υλοποιημένη μεθοδολογία κρίνεται ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί, με καλά αποτελέσματα, σε απεικονίσεις QUICKBIRD διακριτικής ικανότητας 0,7 m, για χαρτογραφήσεις μέγιστης κλίμακας 1:7.000.**

4.3 3^η Εφαρμογή – Περιοχή: Ηράκλειο Κρήτης (ASTER)

Σχήμα 4.4: 3^η Εφαρμογή, διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε, με σκοπό τη διερεύνηση ανίχνευσης ακτογραμμής με προηγμένες τεχνικές ομαλοποίησης και τον τελεστή Canny.

Όπως παρουσιάστηκε στο προηγούμενο εδάφιο, οι πιο αποτελεσματικές τεχνικές (από αυτές που εξετάστηκαν και για τις συγκεκριμένες εφαρμογές) ομαλοποίησης με ταυτόχρονη ενίσχυση των ακμών είναι η ανισοτροπική διάχυση ALM, καθώς και ο συνδυασμός της με ένα μικρό αριθμό επαναλήψεων μορφολογικής εξομάλυνσης. Κατά την εφαρμογή της ALM παρατηρήθηκε ότι τα καλύτερα αποτελέσματα δίνονται έπειτα από 50 επαναλήψεις. Η ανίχνευση των ακμών έγινε με τον βέλτιστο τελεστή Canny, ενώ δεν παρατηρούνται έντονες ασυνέχειες στην ανίχνευση της ακτογραμμής.



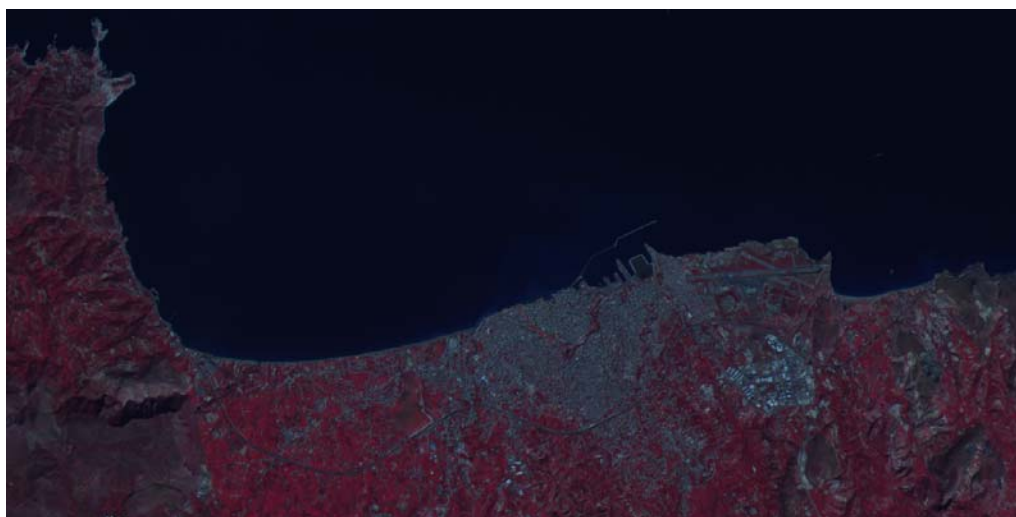
(α)



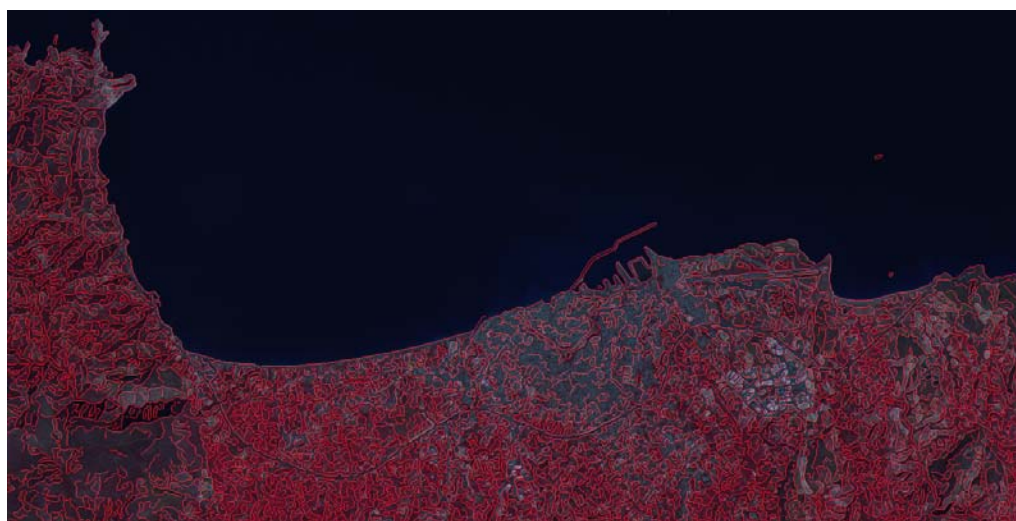
(β)

Εικόνα 4.18: 3^η Εφαρμογή, (α) απεικόνιση ASTER σε ψευδέγχρωμο σύνθετο RGB-321, (β) ανιστροπική διάχυση ALM 50 επαναλήψεων και ανίχνευση ακμών με τον Canny.

Ο δεύτερος αλγόριθμος που υλοποιήθηκε περιλαμβάνει λίγες επαναλήψεις μορφολογικής εξομάλυνσης επικουρικά στην ενίσχυση των ακμών με την ALM, επιτυγχάνοντας μεγαλύτερη ομαλοποίηση κι επομένως απαλείφοντας κάποιες ανεπιθύμητες ακμές. Στην εικόνα 4.19(β) φαίνεται ότι πράγματι η χερσαία επιφάνεια είναι πιο ομαλοποιημένη. Η περιοχή που ιδιαίτερα ενδιαφέρει είναι κοντά στην ακτογραμμή, προκειμένου να απλοποιηθεί η ανίχνευσή της. Έπειτα από πληθώρα συνδυασμών, τα καλύτερα αποτελέσματα δόθηκαν έπειτα από 50 επαναλήψεις ALM και 5 επαναλήψεις ML.



(α)



(β)

Εικόνα 4.19: 3^η Εφαρμογή, (α) απεικόνιση ASTER σε ψευδέγχρωμο σύνθετο RGB-321, (β) ανισοτροπική διάχυση ALM 50 επαναλήψεων, μορφολογική εξομάλυνση ML 5 επαναλήψεων και ανίχνευση ακμών με τον Canny.

Συνοψίζοντας, δεν παρουσιάστηκαν έντονα προβλήματα κατά την ανίχνευση των ακμών, εκτός από κάποια κενά στη συνέχειά τους.

Για την αφαίρεση των ανεπιθύμητων ακμών χρησιμοποιήθηκαν: (α) κατωφλίωση στο υπέρυθρο κανάλι βάσει του ιστογράμματος, (β) συσταδοποίηση K-μέσου, και (γ) μέτρηση της εντροπίας. Στη συνέχεια επισυνάπτονται και αναλύονται οι παράμετροι της εκάστοτε τεχνικής, καθώς και τα αποτελέσματα που προέκυψαν.

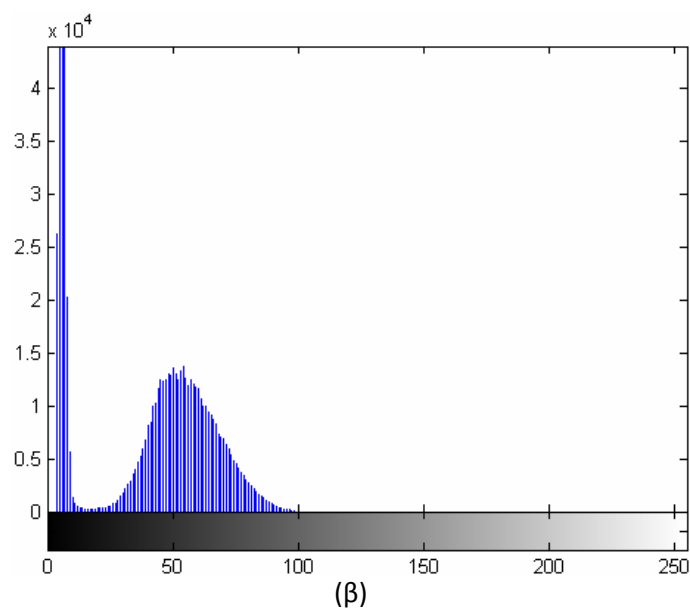
Κατωφλίωση

Η επιλογή του κατάλληλου κατωφλίου έγινε βάσει του ιστογράμματος της απεικόνισης. Όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, οι δύο «καμπάνες» του ιστογράμματος παρουσιάζουν την κατανομή των τιμών φωτεινότητας στην υδάτινη

και τη χερσαία επιφάνεια, αντίστοιχα. Επομένως, το κατάλληλο κατώφλι ορίζεται στην τιμή 13, που εκτιμάται ως οριακή τιμή φωτεινότητας για τη θαλάσσια περιοχή. Ωστόσο, δοκιμάστηκαν και άλλες τιμές φωτεινότητας για την επιλογή κατάλληλου κατωφλίου.



(α)



(β)

Εικόνα 4.20: 3^η Εφαρμογή, (α) απεικόνιση ASTER στο εγγύς υπέρυθρο κανάλι, (β) το ιστόγραμμα συχνοτήτων της απεικόνισης.

Τελικά, η δυαδική εικόνα που προέκυψε – έπειτα από απαλοιφή κάποιων μικρών αντικειμένων της χερσαίας και της υδάτινης επιφάνειας (εικόνα 4.21(α)) – καθώς και η θέση της ακτογραμμής, παρουσιάζονται στις εικόνες 4.21(β) και 4.21(γ), αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι η ακτογραμμή που προέκυψε από την κατωφλίωση και παρουσιάζεται στην εικόνα 4.21(γ) δεν είναι η τελική θέση της ακτογραμμής, αλλά χρησιμοποιείται για την αφαίρεση των ανεπιθύμητων ακμών. Σε αυτήν τέθηκε ένα

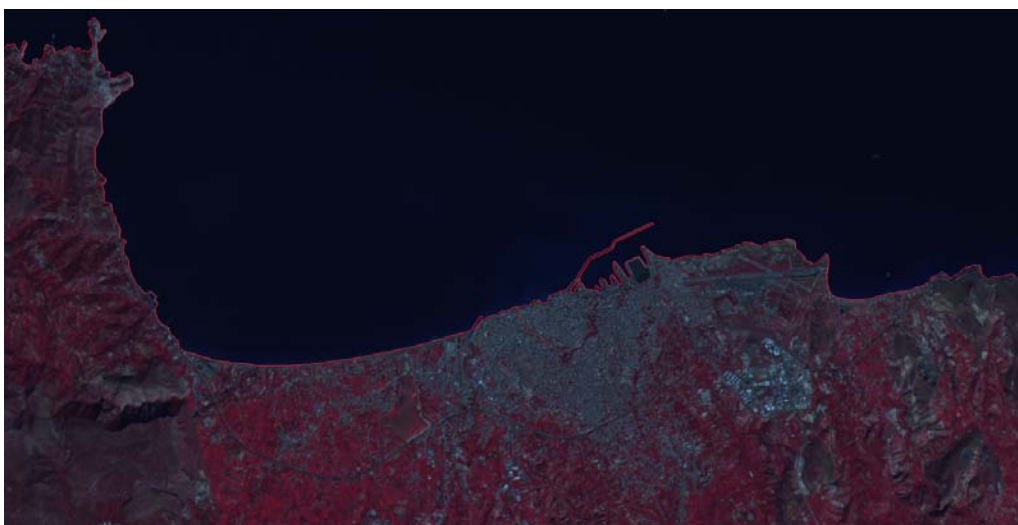
εύρος ζώνης 5 εικονοστοιχείων (εικόνα 4.21(δ)), οπότε και αφαιρέθηκαν οι περισσότερες από τις ανεπιθύμητες ακμές.



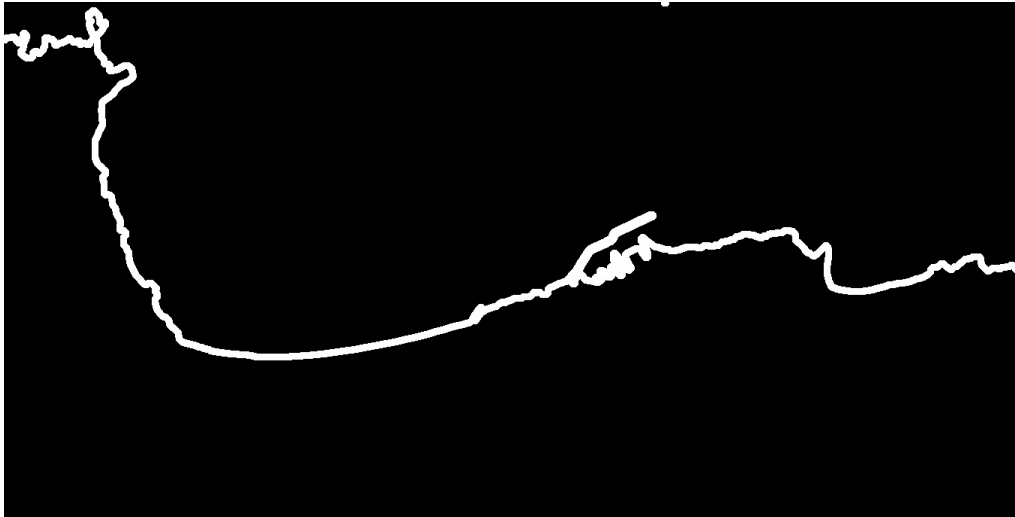
(α)



(β)



(γ)

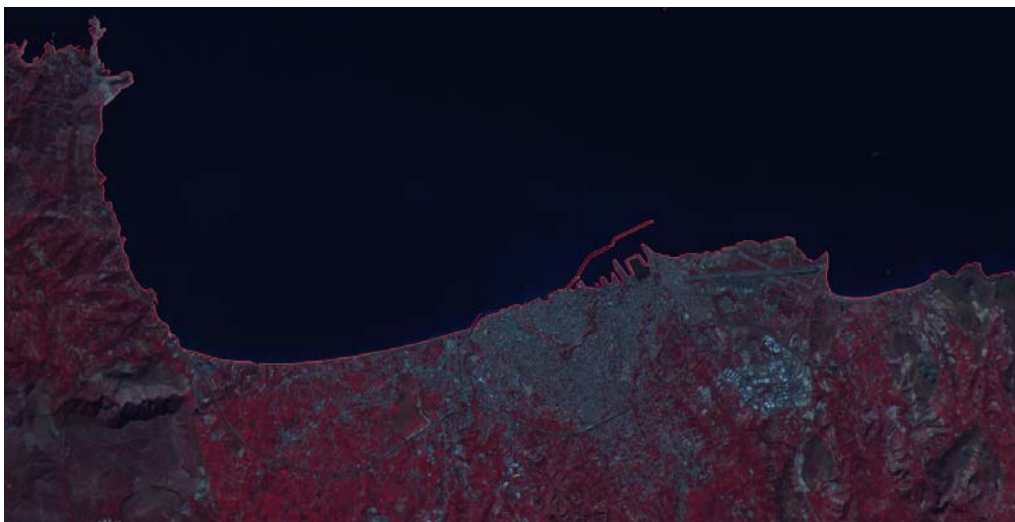


(δ)

Εικόνα 4.21: 3^η Εφαρμογή, (α) διαχωρισμός χερσαίας-υδάτινης επιφάνειας έπειτα από κατωφλίωση (δυναδική εικόνα), (β) αφαίρεση μικρών αντικειμένων της χερσαίας και της υδάτινης επιφάνειας, (γ) υπέρθεση ακτογραμμής στην αρχική απεικόνιση έπειτα από κατωφλίωση, (δ) εύρος ζώνης 5 εικονοστοιχείων στην ακτογραμμή που προκύπτει από την κατωφλίωση.

Το εύρος ζώνης τέθηκε στις εικόνες ακμών και που είχαν αρχικά υποστεί προ-επεξεργασία με: (α) ALM 50 επαναλήψεων (εικόνα 4.18(β)), και (β) ALM 50 επαναλήψεων συνδυαστικά με ML 5 επαναλήψεων (εικόνα 4.19(β)). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στις εικόνες 4.22(α) και 4.22(β), αντίστοιχα. Και στις δύο περιπτώσεις προ-επεξεργασίας η εξαγόμενη ακτογραμμή προκύπτει, τελικά, χρησιμοποιώντας το μορφολογικό εργαλείο `bwareaopen`, αφαιρώντας τις εναπομείνουσες ακμές (εικόνες 4.22(γ) και 4.22(δ)).

ALM



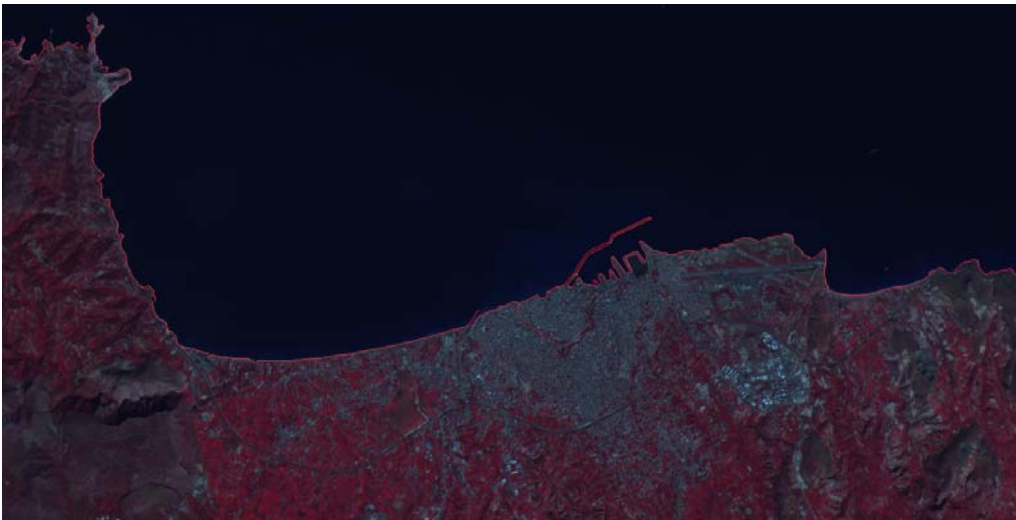
(α)

ALM&ML



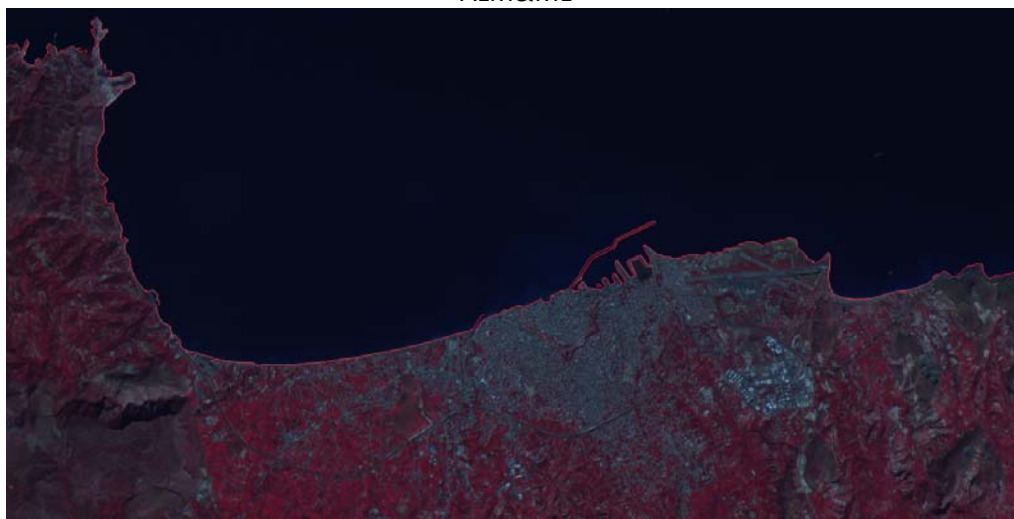
(β)

ALM



(γ)

ALM&ML



(δ)

Εικόνα 4.22: 3^η Εφαρμογή, υπέρθεση των ακμών εντός του εύρους ζώνης (εικόνα 4.21(δ)) στην αρχική απεικόνιση και τελική θέση ακτογραμμής, αντίστοιχα, έπειτα από προ-επεξεργασία με (α), (γ) ALM και (β), (δ) ALM συνδυαστικά με ML.

Η τελική θέση της ακτογραμμής προέκυψε από την αρχική ανίχνευση ακμών με τον τελεστή Canny και δεν παρατηρούνται έντονες διαφορές, σε επίπεδο φωτοερμηνείας, για τις δύο μεθόδους προ-επεξεργασίας – εκτός από ελάχιστα κενά στις ακμές. Στη συνέχεια παρατίθεται αξιολόγηση βάσει των κριτηρίων πληρότητας, ορθότητας και ποιότητας, για τρία προϊόντα ακτογραμμής: (α) ανίχνευση μόνο με τον Canny, (β) εξαγωγή μόνο από κατωφλίωση ως το όριο των δύο κλάσεων, και (γ) εξαγωγή βάσει της μεθοδολογίας που περιγράφηκε στο διάγραμμα ροής του σχήματος 4.4, για την κατωφλίωση. Η σύγκριση πραγματοποιήθηκε για ζώνες εύρους 1, 3 και 5 εικονοστοιχείων, σε σχέση με την ψηφιοποιημένη ακτογραμμή αναφοράς.

		Εύρος ζώνης (εικονοστοιχεία)		
ΠΛΗΡΟΤΗΤΑ		1	3	5
	Κατωφλίωση	0.59687	0.79925	0.86283
ALM	Canny	0.67787	0.85955	0.90886
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.6641	0.84219	0.89278
ALM&ML	Canny	0.66707	0.85306	0.90248
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.65857	0.84611	0.89446

		Εύρος ζώνης (εικονοστοιχεία)		
ΟΡΘΟΤΗΤΑ		1	3	5
	Κατωφλίωση	0.6136	0.83059	0.89857
ALM	Canny	0.65531	0.84159	0.90314
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.65447	0.83987	0.90235
ALM&ML	Canny	0.66707	0.84734	0.90832
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.6485	0.83702	0.90091
		Εύρος ζώνης (εικονοστοιχεία)		
ΠΟΙΟΤΗΤΑ		1	3	5
	Κατωφλίωση	0.43381	0.68723	0.78625
ALM	Canny	0.4997	0.73985	0.90314
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.4917	0.72567	0.81412
ALM&ML	Canny	0.49708	0.73941	0.82713
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.48532	0.72643	0.81434

Πίνακας 4.6: 3^η Εφαρμογή, αξιολόγηση ανίχνευσης ακτογραμμής με: κατωφλίωση, Canny και την υλοποιημένη μεθοδολογία, για τις δυο μεθόδους προ-επεξεργασίας.

Με βάση τον παραπάνω πίνακα, παρατηρούνται τα εξής:

- Σε επίπεδα **πληρότητας και ορθότητας**, η ανίχνευση των ακμών με προ-επεξεργασία την ALM έχει παρόμοια αποτελέσματα με την ALM συνδυαστικά με την ML. Συνδυαστικά με την κατωφλίωση – η οποία έχει, γενικά, χειρότερα αποτελέσματα σε σχέση με τον Canny – **η ανίχνευση των ακμών και με τις δύο μεθόδους προ-επεξεργασίας, βάσει της υλοποιημένης μεθοδολογίας, παρουσιάζει αυξημένα επίπεδα πληρότητας και ορθότητας, πολύ κοντά στον Canny.**
- Σε επίπεδο **ποιότητας**, η ανίχνευση των ακμών με προ-επεξεργασία την ALM έχει λίγο καλύτερα αποτελέσματα από την ALM συνδυαστικά με την ML. Συνδυαστικά με την κατωφλίωση – η οποία έχει, γενικά, χειρότερα αποτελέσματα σε σχέση με τον Canny – **η ανίχνευση των ακμών και με τις δύο μεθόδους προ-επεξεργασίας, βάσει της υλοποιημένης μεθοδολογίας, παρουσιάζει αυξημένα επίπεδα ολικής ποιότητας, πολύ κοντά στον Canny.**
- **Για εύρος ζώνης 1 εικονοστοιχείου** οι δείκτες πληρότητας και ορθότητας, συνολικά, κυμαίνονται σε ικανοποιητικά επίπεδα (μ.ό. πληρότητας 65,3%, μ.ό. ορθότητας 64,8%), σε αντίθεση με την ολική ποιότητα των ακμών (μ.ό. ποιότητας 48,2%). Η συγκεκριμένη απεικόνιση έχει διακριτική ικανότητα 15 m και η δεδομένη ζώνη (3 εικονοστοιχεία → ±15m) αντιστοιχεί σε κλίμακα χαρτογράφησης 1:90.000.
- **Για εύρος ζώνης 3 εικονοστοιχείων**, τα επίπεδα αξιολόγησης των ακμών, συνολικά, είναι πολύ καλά (μ.ό. πληρότητας 84%, μ.ό. ορθότητας 84%, μ.ό. ποιότητας 72,4%). Για την υλοποιημένη μεθοδολογία με τις δύο μεθόδους προ-επεξεργασίας τα αντίστοιχα ποσοστά είναι τα εξής: μ.ό. πληρότητας 84,4%, μ.ό.

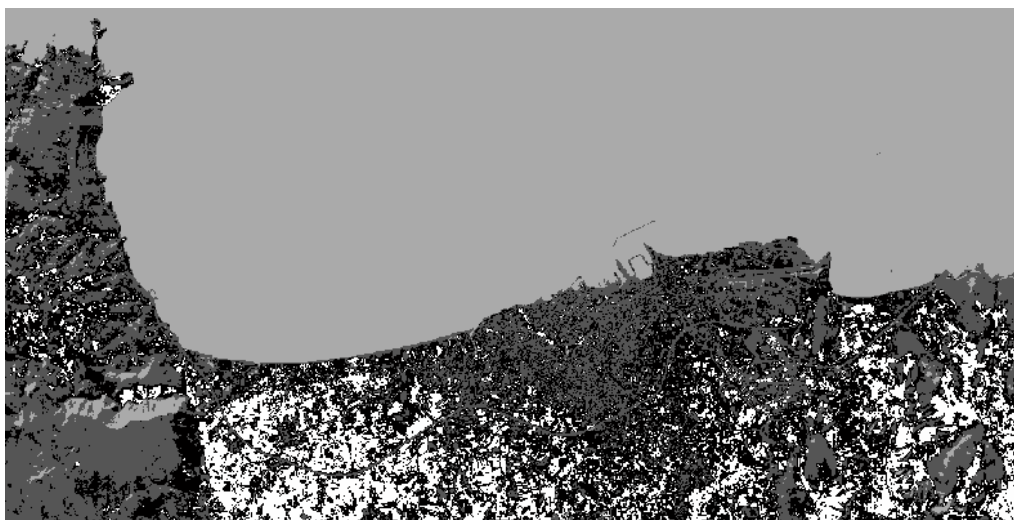
ορθότητας 83,8% και μ.ό ποιότητας 72,6%. Η δεδομένη ζώνη (5 εικονοστοιχεία → ± 30m) αντιστοιχεί σε κλίμακα χαρτογράφησης 1:150.000.

- **Για εύρος ζώνης 5 εικονοστοιχείων**, τα επίπεδα αξιολόγησης των ακμών, συνολικά, είναι πολύ καλά (μ.ό. πληρότητας 89,2%, μ.ό ορθότητας 90,3%, μ.ό ποιότητας 82,9%). Για την υλοποιημένη μεθοδολογία με τις δύο μεθόδους προεπεξεργασίας τα αντίστοιχα ποσοστά είναι τα εξής: μ.ό. πληρότητας 89,4%, μ.ό ορθότητας 90,2% και μ.ό ποιότητας 81,4%. Η δεδομένη ζώνη (9 εικονοστοιχεία → ± 60m) αντιστοιχεί σε κλίμακα χαρτογράφησης 1:270.000.
- **Η υλοποιημένη μεθοδολογία για την κατωφλίωση κρίνεται ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για χαρτογραφήσεις μέγιστης κλίμακας 1:150.000 – ενδεχομένως και μεγαλύτερης.**

Σημειώνεται ότι η ακτογραμμή που ανιχνεύτηκε μόνο με τον Canny και χρησιμοποιείται στην αξιολόγηση, προέκυψε από τα δεδομένα αναφοράς με χρήση εύρους ζώνης 3 εικονοστοιχείων και μορφολογικών εργαλείων.

Συσταδοποίηση Κ-μέσου

Η συγκεκριμένη απεικόνιση κατηγοριοποιήθηκε σε τέσσερις κλάσεις (εικόνα 4.23(α)). Έπειτα από την απαλοιφή κάποιων μικρών αντικειμένων της χερσαίας και της υδάτινης επιφάνειας, προέκυψε ο τελικός διαχωρισμός της απεικόνισης σε δύο κλάσεις. Ομοίως με την κατωφλίωση, ανιχνεύτηκε η θέση της ακτογραμμής ως το όριο των δύο επιφανειών (εικόνα 4.23(β)).



(α)

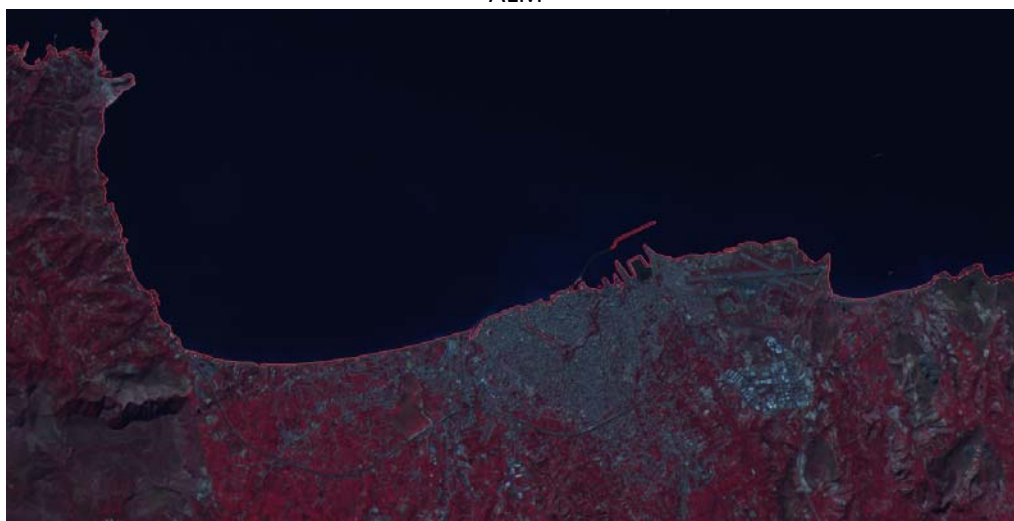


(β)

Εικόνα 4.23: 3^η Εφαρμογή, (α) συσταδοποίηση Κ-μέσου σε τέσσερις κλάσεις, (β) υπέρθεση ακτογραμμής στην αρχική απεικόνιση έπειτα από συσταδοποίηση Κ-μέσου.

Στην ακτογραμμή που προέκυψε ως το όριο των δύο κλάσεων της χερσαίας και της υδάτινης επιφάνειας τέθηκε ένα εύρος ζώνης 5 εικονοστοιχείων και για τις δύο μεθόδους προ-επεξεργασίας, με σκοπό την αφαίρεση ανεπιθύμητων ακμών. Το εύρος ζώνης τέθηκε στις εικόνες ακμών και που είχαν αρχικά υποστεί προ-επεξεργασία με: (α) ALM 50 επαναλήψεων (εικόνα 4.18(β)), και (β) ALM 50 επαναλήψεων συνδυαστικά με ML 5 επαναλήψεων (εικόνα 4.19(β)). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στις εικόνες 4.24(α) και 4.24(β), αντίστοιχα. Στην περίπτωση προ-επεξεργασίας με ALM, η εξαγόμενη ακτογραμμή προκύπτει, τελικά, χρησιμοποιώντας μόνο το μορφολογικό εργαλείο `bwareaopen` (εικόνα 4.24(γ)). Στην περίπτωση προ-επεξεργασίας με ALM και ML, η εξαγόμενη ακτογραμμή προκύπτει, τελικά, χρησιμοποιώντας τα μορφολογικά εργαλεία `bwareaopen` και `bwmorph` (`bridge`) (`bwareaopen` → `bwmorph` → `bwareaopen`), αφαιρώντας τις μικρές εναπομείνουσες ακμές (εικόνα 4.24(δ)).

ALM



(α)

ALM&ML



(β)

ALM



(γ)

ALM&ML



(δ)

Εικόνα 4.24: 3^η Εφαρμογή, υπέρθεση των ακμών εντός του εύρους ζώνης στην αρχική απεικόνιση και τελική θέση ακτογραμμής, αντίστοιχα, έπειτα από προ-επεξεργασία με (α), (γ) ALM και (β), (δ) ALM συνδυαστικά με ML.

Η τελική θέση της ακτογραμμής προέκυψε από την αρχική ανίχνευση ακμών με τον τελεστή Canny και δεν παρατηρούνται έντονες διαφορές, σε επίπεδο φωτοερμηνείας, για τις δύο μεθόδους προ-επεξεργασίας – εκτός από κάποιες εναπομένουσες ακμές και μεγάλες ασυνέχειες. Τα συγκεκριμένα προβλήματα εξαρτώνται άμεσα από την επεξεργασία και τη μετα-επεξεργασία της απεικόνισης. Για παράδειγμα, το τμήμα της προβλήτας που δεν ανιχνεύεται, οφείλεται στη συσταδοποίηση – όχι στον Canny ή τη μετα-επεξεργασία – καθώς δεν ήταν επιτυχής ο διαχωρισμός σε περισσότερες κλάσεις. Επιπλέον, μπορεί να επιλεγεί μικρότερο εύρος ζώνης, ακόμα κι αν σε κάποια μεμονωμένα σημεία δημιουργούνται κενά, προκειμένου να απλοποιηθεί η μετα-επεξεργασία – η οποία είναι γενικά απαιτητική διαδικασία – και να εξαλειφθούν κατά το δυνατόν περισσότερες ανεπιθύμητες ακμές.

Στη συνέχεια παρατίθεται αξιολόγηση βάσει των κριτηρίων πληρότητας, ορθότητας και ποιότητας, για τρία προϊόντα ακτογραμμής: (α) ανίχνευση μόνο με τον Canny, (β) εξαγωγή μόνο από συσταδοποίηση K-μέσου ως το όριο των δύο κλάσεων, και (γ) εξαγωγή βάσει της μεθοδολογίας που περιγράφηκε στο διάγραμμα ροής του σχήματος 4.4, για τη συσταδοποίηση. Η σύγκριση πραγματοποιήθηκε για ζώνες εύρους 1, 3 και 5 εικονοστοιχείων, σε σχέση με την ψηφιοποιημένη ακτογραμμή αναφοράς.

		Εύρος ζώνης (εικονοστοιχεία)		
ΠΛΗΡΟΤΗΤΑ		1	3	5
	Συσταδοποίηση Κ-μέσου	0.65519	0.81063	0.86413
ALM	Canny	0.67787	0.85955	0.90886
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.65519	0.82606	0.87743
ALM&ML	Canny	0.66707	0.85306	0.90248
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.64993	0.82342	0.87363
		Εύρος ζώνης (εικονοστοιχεία)		
ΟΡΘΟΤΗΤΑ		1	3	5
	Συσταδοποίηση Κ-μέσου	0.67272	0.84968	0.91049
ALM	Canny	0.65531	0.84159	0.90314
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.61696	0.79533	0.86686
ALM&ML	Canny	0.66707	0.84734	0.90832
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.65381	0.83447	0.89675
		Εύρος ζώνης (εικονοστοιχεία)		
ΠΟΙΟΤΗΤΑ		1	3	5
	Συσταδοποίηση Κ-μέσου	0.49683	0.70896	0.79647
ALM	Canny	0.4997	0.73985	0.90314
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.46574	0.68124	0.77323
ALM&ML	Canny	0.49708	0.73941	0.82713
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.48353	0.70781	0.79378

Πίνακας 4.7: 3^η Εφαρμογή, αξιολόγηση ανίχνευσης ακτογραμμής με: συσταδοποίηση Κ-μέσου, Canny και την υλοποιημένη μεθοδολογία, για τις δυο μεθόδους προ-επεξεργασίας.

Με βάση τον παραπάνω πίνακα, οι παρατηρήσεις είναι ίδιες με την κατωφλίωση:

- Σε επίπεδο **πληρότητας**, η ανίχνευση των ακμών με προ-επεξεργασία την ALM έχει παρόμοια αποτελέσματα με την ALM συνδυαστικά με την ML. Συνδυαστικά με τη συσταδοποίηση – η οποία έχει, γενικά, χειρότερα αποτελέσματα σε σχέση με τον Canny – η **ανίχνευση των ακμών και με τις δύο μεθόδους προ-επεξεργασίας, βάσει της υλοποιημένης μεθοδολογίας, παρουσιάζει αυξημένα επίπεδα πληρότητας και ορθότητας, λίγο χαμηλότερα από τον Canny.**
- Σε επίπεδο **ορθότητας**, η ανίχνευση των ακμών με προ-επεξεργασία την ALM έχει παρόμοια αποτελέσματα με την ALM συνδυαστικά με την ML. Συνδυαστικά με τη συσταδοποίηση – η οποία έχει, γενικά, λίγο καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με τον Canny – η **ανίχνευση των ακμών με την ALM συνδυαστικά με την ML, βάσει της υλοποιημένης μεθοδολογίας, παρουσιάζει υψηλά επίπεδα ορθότητας, λίγο χαμηλότερα από τον Canny και τη συσταδοποίηση.**
- Σε επίπεδο **ποιότητας**, η ανίχνευση των ακμών με προ-επεξεργασία την ALM έχει λίγο καλύτερα αποτελέσματα από την ALM συνδυαστικά με την ML. Ωστόσο, συνδυαστικά με τη συσταδοποίηση – η οποία έχει, γενικά, χειρότερα αποτελέσματα σε σχέση με τον Canny – η **ανίχνευση των ακμών και με την ALM**

συνδυαστικά με την ML, βάσει της υλοποιημένης μεθοδολογίας, παρουσιάζει υψηλά επίπεδα ολικής ποιότητας, λίγο χαμηλότερα από τον Canny και παρόμοια με τη συσταδοποίηση.

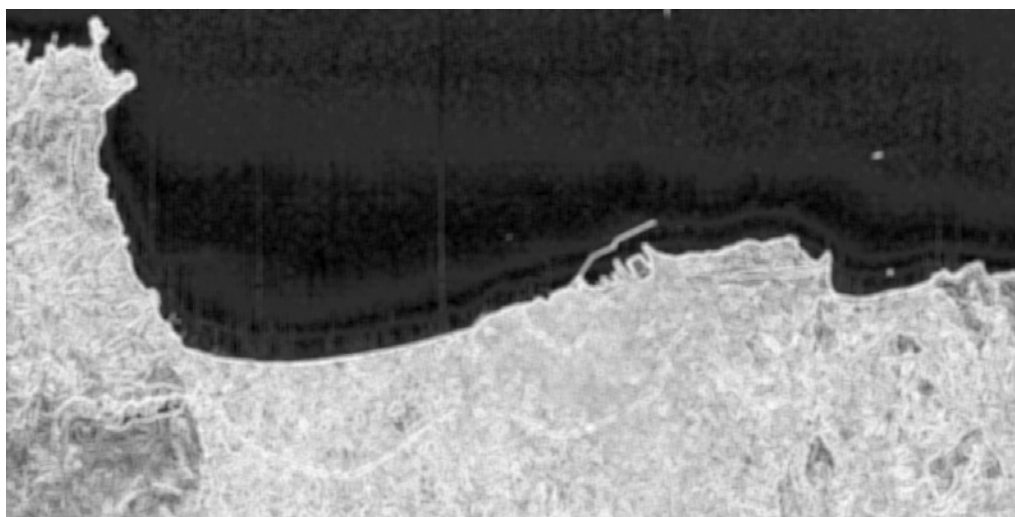
- Για εύρος ζώνης 1 εικονοστοιχείου οι δείκτες πληρότητας και ορθότητας, συνολικά, κυμαίνονται σε ικανοποιητικά επίπεδα (μ.ό. πληρότητας 66,1%, μ.ό. ορθότητας 65,3%), σε αντίθεση με την ολική ποιότητα των ακμών (μ.ό. ποιότητας 48,9%).
- Για εύρος ζώνης 3 εικονοστοιχείων, τα επίπεδα αξιολόγησης των ακμών, συνολικά, είναι πολύ καλά (μ.ό. πληρότητας 83,5%, μ.ό. ορθότητας 83,4%, μ.ό. ποιότητας 71,5%). Για την υλοποιημένη μεθοδολογία με τις δύο μεθόδους προεπεξεργασίας τα αντίστοιχα ποσοστά είναι τα εξής: μ.ό. πληρότητας 82,5%, μ.ό. ορθότητας 81,5% και μ.ό. ποιότητας 69,5%.
- Για εύρος ζώνης 5 εικονοστοιχείων, τα επίπεδα αξιολόγησης των ακμών, συνολικά, είναι πολύ καλά (μ.ό. πληρότητας 88,5%, μ.ό. ορθότητας 89,7%, μ.ό. ποιότητας 81,9%). Για την υλοποιημένη μεθοδολογία με τις δύο μεθόδους προεπεξεργασίας τα αντίστοιχα ποσοστά είναι τα εξής: μ.ό. πληρότητας 87,6%, μ.ό. ορθότητας 88,2% και μ.ό. ποιότητας 78,4%.
- Η υλοποιημένη μεθοδολογία για τη συσταδοποίηση κρίνεται ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για χαρτογραφήσεις μέγιστης κλίμακας 1:150.000.

Εντροπία

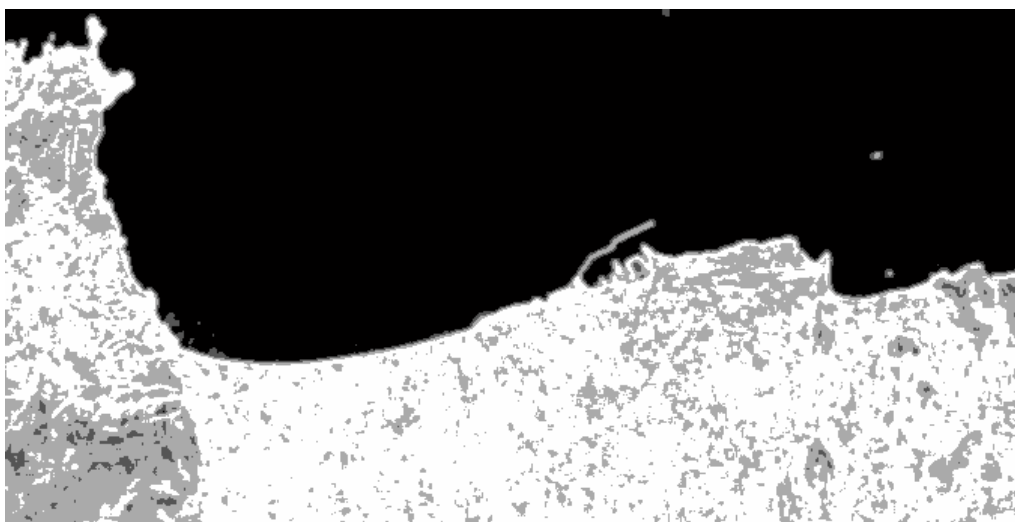
Στη συγκεκριμένη απεικόνιση, η μέτρηση της εντροπίας με χρήση της πολυεπίπεδης κατωφλίωσης δεν έχει καλά αποτελέσματα. Στις εικόνες που επισυνάπτονται παρουσιάζεται και η εξαγωγή της ακτογραμμής έπειτα από μορφολογική επεξεργασία του προϊόντος της πολυεπίπεδης κατωφλίωσης. Έπειτα από πολλές δοκιμές προέκυψε ότι η ορθότερη κατωφλίωση ήταν τεσσάρων επιπέδων. Φαίνεται ότι δεν εντοπίζεται σωστά η ακτογραμμή, δηλαδή ως το όριο της χερσαίας και της υδάτινης επιφάνειας. Σημειώνεται ότι η εξαγωγή της ακτογραμμής με συγχώνευση πληροφορίας (fusion) είναι πολύ πιθανό να δίνει πολύ καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με την πολυεπίπεδη κατωφλίωση.



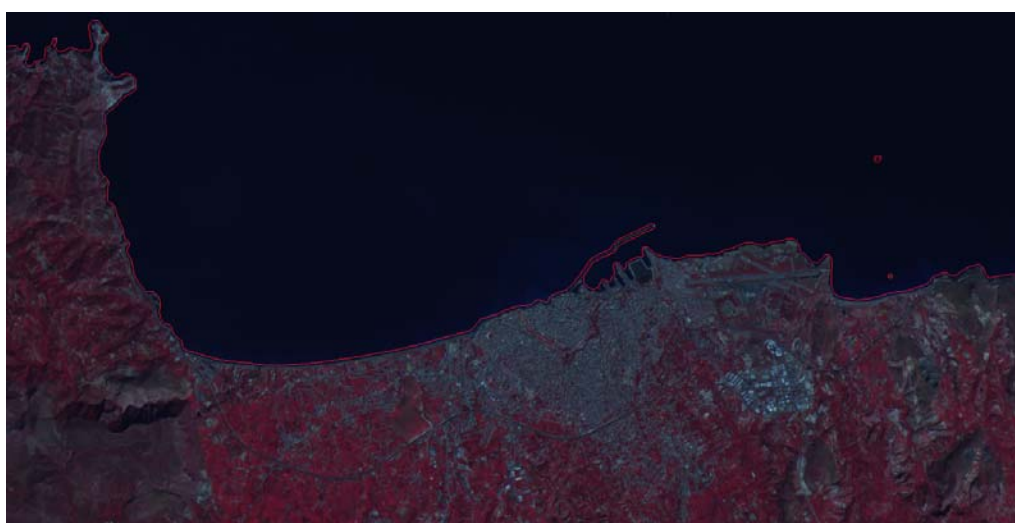
(α)



(β)



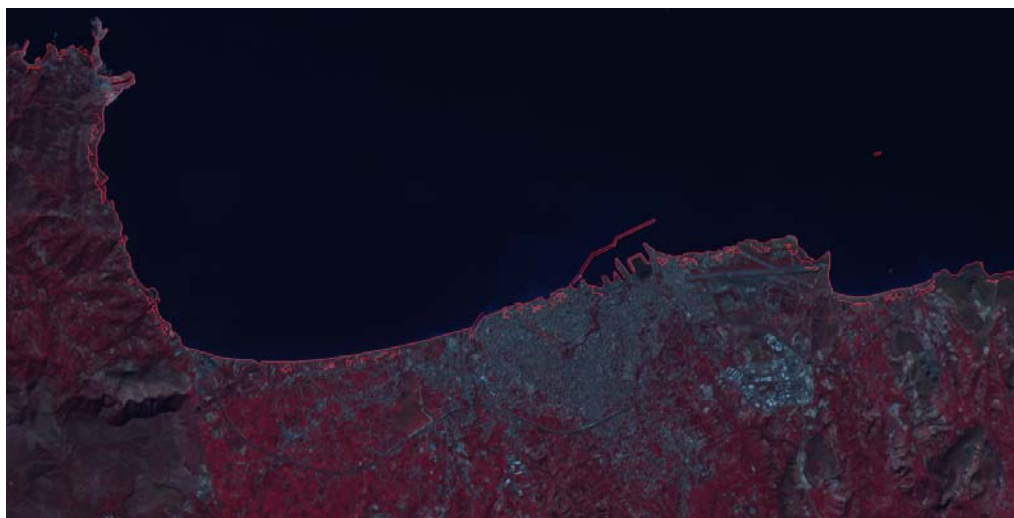
(γ)



(δ)

Εικόνα 4.25: 3^η Εφαρμογή, (α) απεικόνιση ASTER στο εγγύς υπέρυθρο κανάλι, (β) ανάλυση υψής με μέτρηση της εντροπίας, (γ) κατωφλίωση τεσσάρων επιπέδων στην εικόνα υψής, (δ) υπέρθεση ακτογραμμής στην αρχική απεικόνιση έπειτα από μέτρηση της εντροπίας.

Στην εικόνα 4.26 παρατίθεται ένα παράδειγμα εφαρμογής της τεχνικής, με μέτρια αποτελέσματα. Η εξαγόμενη ακτογραμμή προέκυψε με τις εξής παραμέτρους: ALM 50 επαναλήψεων, εύρος ζώνης 17 εικονοστοιχεία και μετα-επεξεργασία `bwareaopen` → `imclose` → `bwareaopen`. Παρατηρούνται κάποια κενά, καθώς και αρκετές εναπομείνουσες ακμές, οι οποίες εάν απαλείφονταν θα απαλείφονταν περισσότερα (ασυνεχή) τμήματα ακτογραμμής.



Εικόνα 4.26: 3^η Εφαρμογή, τελική θέση ακτογραμμής έπειτα από προ-επεξεργασία με ALM και μέτρηση της εντροπίας.

Τα παραπάνω συμπεράσματα προέκυψαν, εκτός της φωτοερμηνείας, βάσει των κριτηρίων πληρότητας, ορθότητας και ποιότητας, που παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα για τρία προϊόντα ακτογραμμής: (α) ανίχνευση μόνο με τον Canny, (β) εξαγωγή μόνο από την εντροπία, και (γ) εξαγωγή βάσει της μεθοδολογίας που περιγράφηκε στο διάγραμμα ροής του σχήματος 4.4, για την εντροπία. Η σύγκριση πραγματοποιήθηκε για ζώνες εύρους 1, 3 και 5 εικονοστοιχείων, σε σχέση με την ψηφιοποιημένη ακτογραμμή αναφοράς.

		Εύρος ζώνης (εικονοστοιχεία)		
ΠΛΗΡΟΤΗΤΑ		1	3	5
	Μέτρηση Εντροπίας	0.10949	0.44032	0.63304
ALM	Canny	0.67787	0.85955	0.90886
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.64736	0.83384	0.89086
		Εύρος ζώνης (εικονοστοιχεία)		
ΟΡΘΟΤΗΤΑ		1	3	5
	Μέτρηση Εντροπίας	0.12253	0.48699	0.68846
ALM	Canny	0.65531	0.84159	0.90314
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.41479	0.54903	0.63232

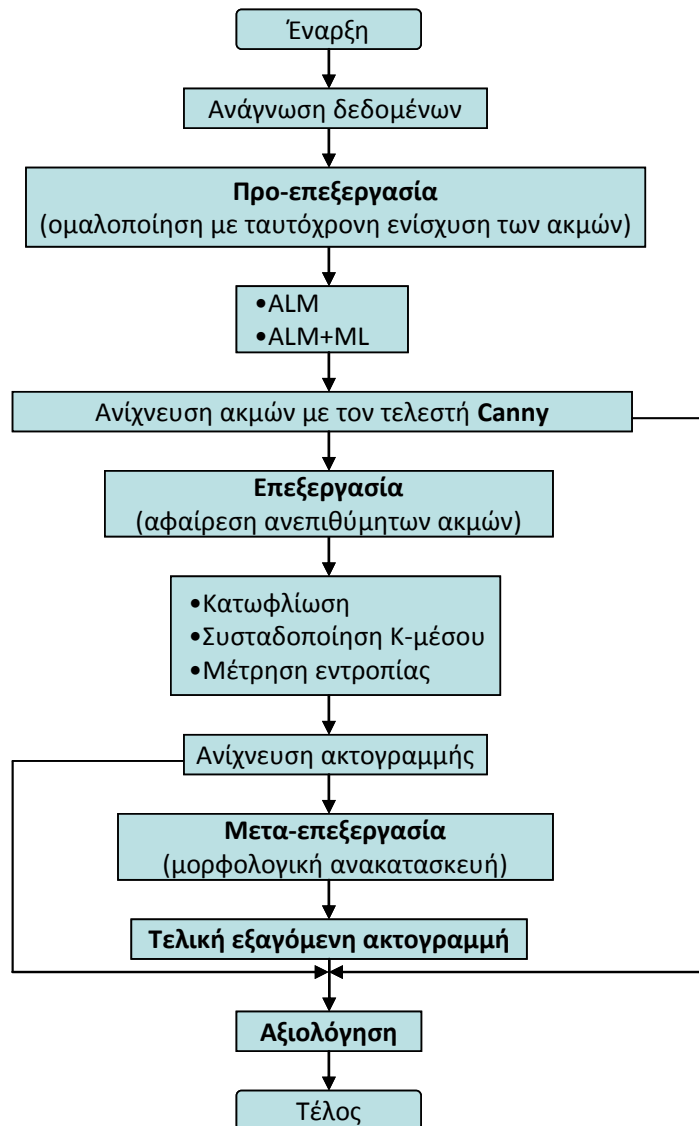
		Εύρος ζώνης (εικονοστοιχεία)		
ΠΟΙΟΤΗΤΑ		1	3	5
	Μέτρηση Εντροπίας	0.06137	0.30079	0.49208
ALM	Canny	0.4997	0.73985	0.90314
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.33834	0.49489	0.58686

Πίνακας 4.8: 3^η Εφαρμογή, αξιολόγηση ανίχνευσης ακτογραμμής με: μέτρηση εντροπίας, Canny και την υλοποιημένη μεθοδολογία, έπειτα από προ-επεξεργασία με ALM.

Συνοψίζοντας:

- Οι ακμές που ανιχνεύονται δεν «υποφέρουν» από έντονες ασυνέχειες. Ωστόσο, τα κενά αναδεικνύονται από τις μεθόδους επεξεργασίας και μετα-επεξεργασίας.
- Η κατωφλίωση στο υπέρυθρο κανάλι, αν και αποτελεί ενδεδειγμένη τεχνική, ωστόσο είναι πολύ χρονοβόρα όσον αφορά στην επιλογή του κατάλληλου κατωφλίου.
- Σε επίπεδα πληρότητας και ολικής ποιότητας, η χρήση της ALM παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με τον συνδυασμό της με την ML. Το αντίθετο ισχύει για την ορθότητα των ακμών. Φωτοερμηνευτικά, δεν παρατηρήθηκαν έντονες διαφορές στην εξαγόμενη ακτογραμμή, για τις δύο μεθόδους προ-επεξεργασίας.
- Η συσταδοποίηση K-μέσου υπερέχει – σε επίπεδα πληρότητας, ορθότητας και ολικής ποιότητας – της κατωφλίωσης. **Ο υλοποιημένος αλγόριθμος συσταδοποίησης έχει ενθαρρυντικά αποτελέσματα με καταλληλότερη τεχνική προ-επεξεργασίας την ALM 50 επαναλήψεων συνδυαστικά με 5 επαναλήψεις ML**, καθώς είναι παρόμοια με αυτά του υλοποιημένου αλγορίθμου κατωφλίωσης ο οποίος παρουσιάζει λίγο καλύτερα αποτελέσματα.
- Η μέθοδος που αναπτύχθηκε βάσει της εντροπίας δεν είχε πολύ καλά αποτελέσματα. Ενδεχομένως με συγχώνευση πληροφορίας να βελτιώνονται.
- Η τελική εξαγωγή της ακτογραμμής εξαρτάται – εκτός από την αρχική ανίχνευση των ακμών – και από την τεχνική επεξεργασίας και τα μορφολογικά εργαλεία που επιλέγονται για την ανακατασκευή της – συμπεριλαμβανομένου και του εύρους ζώνης.
- Η αξιολόγηση της εξαγόμενης ακτογραμμής εξαρτάται άμεσα από την ορθότητα της ψηφιοποίησης των δεδομένων αναφοράς, καθώς και από τη μετατροπή τους σε ψηφιδωτά δεδομένα.
- **Τελικά, η υλοποίηση της μεθοδολογίας σε υπερφασματικά δεδομένα είχε ενθαρρυντικά αποτελέσματα και κρίνεται ότι πρέπει να ερευνηθεί περαιτέρω, τόσο αλγοριθμικά όσο και σε ευρύτερο πεδίο εφαρμογών.** Τονίζεται ότι η ποιότητα των δεδομένων επηρεάζει άμεσα την επεξεργασία τους.
- **Η υλοποιημένη μεθοδολογία – για την κατωφλίωση και τη συσταδοποίηση K-μέσου – κρίνεται ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί, με καλά αποτελέσματα, σε απεικονίσεις ASTER διακριτικής ικανότητας 15 m, για χαρτογραφήσεις μέγιστης κλίμακας 1:150.000.**

4.4 4^η Εφαρμογή – Περιοχή: λιμένας Ηρακλείου Κρήτης (QUICKBIRD)



Σχήμα 4.5: 4^η Εφαρμογή, διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε, με σκοπό τη διερεύνηση ανίχνευσης ακτογραμμής με προηγμένες τεχνικές ομαλοποίησης και τον τελεστή Canny.

Όπως παρουσιάστηκε στο προηγούμενο εδάφιο, οι πιο αποτελεσματικές τεχνικές (από αυτές που εξετάστηκαν και για τις συγκεκριμένες εφαρμογές) ομαλοποίησης με ταυτόχρονη ενίσχυση των ακμών είναι η ανισοτροπική διάχυση ALM, καθώς και ο συνδυασμός της με ένα μικρό αριθμό επαναλήψεων μορφολογικής εξομάλυνσης. Κατά την εφαρμογή της ALM παρατηρήθηκε ότι τα καλύτερα αποτελέσματα δίνονται έπειτα από 200 επαναλήψεις. Η ανίχνευση των ακμών έγινε με τον βέλτιστο τελεστή Canny. Ωστόσο, όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.27(β), οι ακμές δεν είναι συνεχείς και αυτό αναδεικνύεται και στις υπόλοιπες τεχνικές, δημιουργώντας περαιτέρω προβλήματα. Ακόμα και η φωτοερμηνεία της συγκεκριμένης απεικόνισης ήταν απαιτητική, λόγω της παρουσίας βραχιδών σημείων στο πέρας της χερσαίας επιφάνειας, πιθανόν, σε αβαθή νερά (εικόνα

4.27(α)). Η ανίχνευση ακμών στα σημεία αυτά δημιούργησε σύγχυση τόσο στην ψηφιοποίηση όσο στον προσδιορισμό της αληθούς θέσης της ακτογραμμής, συμβάλλοντας αρνητικά και στη συνέχειά της.



(α)



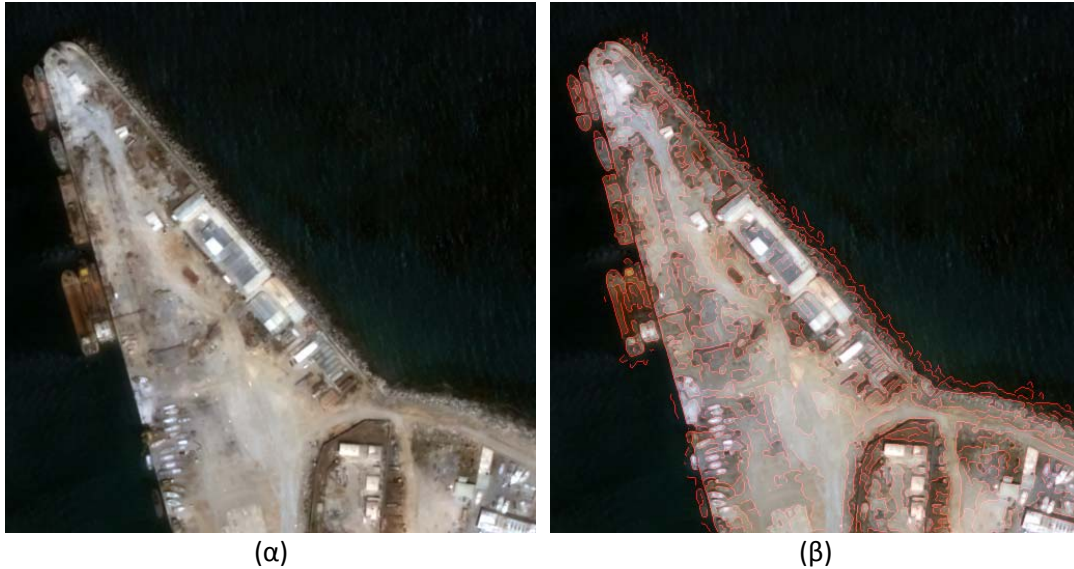
(β)

Εικόνα 4.27: 4^η Εφαρμογή, (α) απεικόνιση QUICKBIRD στο φυσικό έγχρωμο σύνθετο, (β) ανισοτροπική διάχυση ALM 200 επαναλήψεων και ανίχνευση ακμών με τον Canny.

Σημειώνεται ότι η ορθή θέση της ακτογραμμής δεν περιλαμβάνει το περίγραμμα των πλοίων που βρίσκονται στο λιμάνι, αλλά μόνο την χερσαία επιφάνεια. Ωστόσο, παρατηρούνται ασυνέχειες στην ανίχνευσή της με τον Canny.

Ο δεύτερος αλγόριθμος που υλοποιήθηκε περιλαμβάνει λίγες επαναλήψεις μορφολογικής εξομάλυνσης επικουρικά στην ενίσχυση των ακμών με την ALM,

επιτυγχάνοντας μεγαλύτερη ομαλοποίηση κι επομένως απαλείφοντας κάποιες ανεπιθύμητες ακμές. Στην εικόνα 4.28(β) φαίνεται ότι πράγματι η χερσαία επιφάνεια είναι πιο ομαλοποιημένη. Η περιοχή που ιδιαίτερα ενδιαφέρει είναι κοντά στην ακτογραμμή, προκειμένου να απλοποιηθεί η ανίχνευσή της. Έπειτα από πληθώρα συνδυασμών, τα καλύτερα αποτελέσματα δόθηκαν έπειτα από 200 επαναλήψεις ALM και 5 επαναλήψεις ML. Τα προβλήματα που ανέκυψαν είναι τα ίδια με αυτά που παρουσιάστηκαν για την ALM.



Εικόνα 4.28: 4^η Εφαρμογή, (α) απεικόνιση QUICKBIRD στο φυσικό έγχρωμο σύνθετο, (β) ανιστροπική διάχυση ALM 200 επαναλήψεων, μορφολογική εξομάλυνση ML 5 επαναλήψεων και ανίχνευση ακμών με τον Canny.

Συνοψίζοντας, τα βασικά προβλήματα που αναδείχτηκαν και παρουσιάστηκαν κατά την ανίχνευση ακμών ήταν τα εξής:

- (α) δυσκολία απεικόνισης (βράχια, αβαθή νερά, λιμένες).
- (β) ασυνέχεια ακμών.

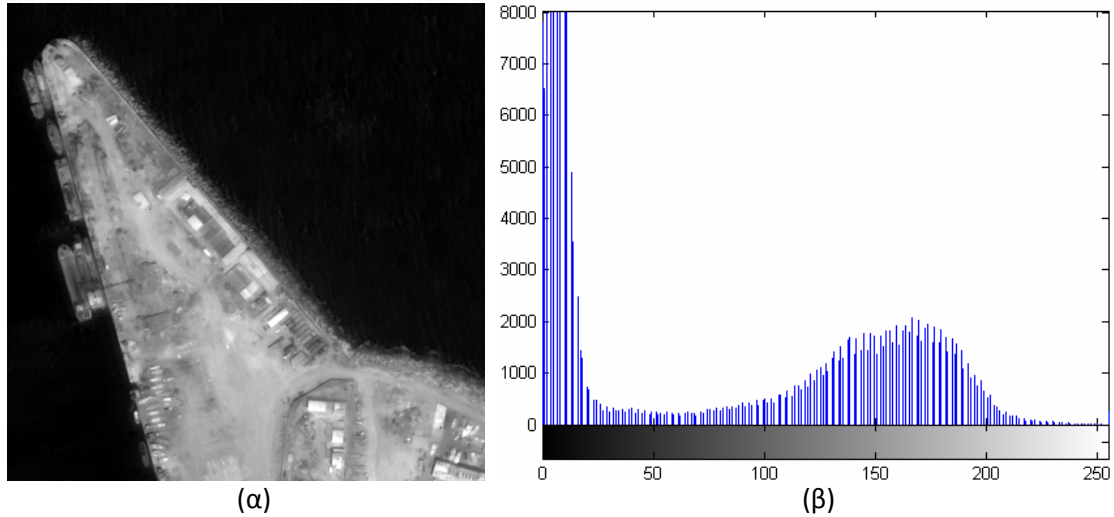
Σημειώνεται ότι αν και οι εφαρμογές 4 και 5 αποτελούν τμήματα της ίδιας απεικόνισης, ωστόσο χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές τεχνικές και παράμετροι αυτών, λόγω προγραμματιστικής δυσκολίας.

Για την αφαίρεση των ανεπιθύμητων ακμών χρησιμοποιήθηκαν: (α) κατωφλίωση στο υπέρυθρο κανάλι βάσει του ιστογράμματος, (β) συσταδοποίηση K-μέσου, και (γ) μέτρηση της εντροπίας. Στη συνέχεια επισυνάπτονται και αναλύονται οι παράμετροι της εκάστοτε τεχνικής, καθώς και τα αποτελέσματα που προέκυψαν.

Κατωφλίωση

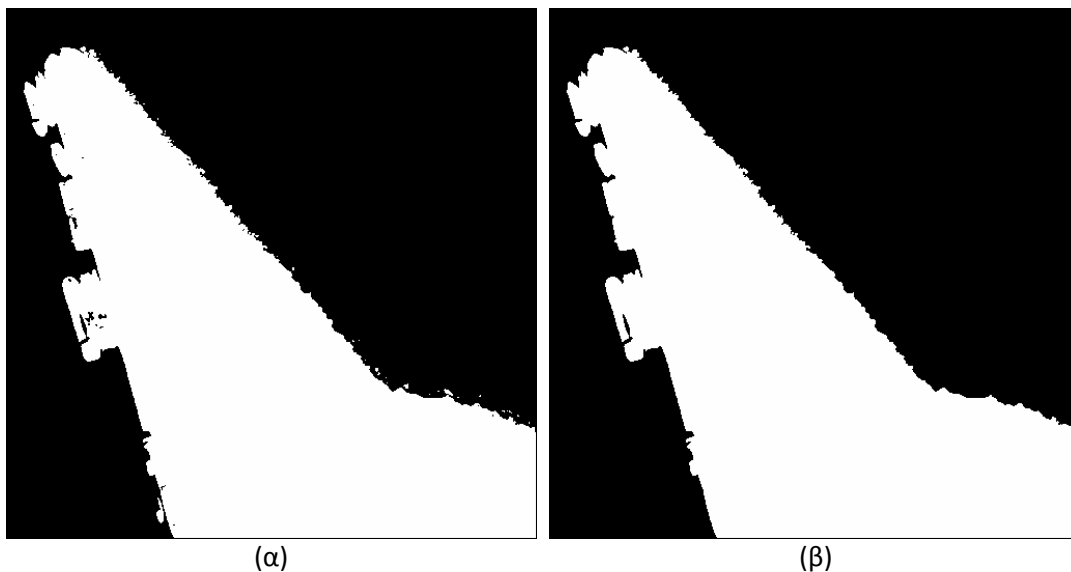
Η επιλογή του κατάλληλου κατωφλίου έγινε βάσει του ιστογράμματος της απεικόνισης. Όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, οι δύο «καμπάνες» του ιστογράμματος παρουσιάζουν την κατανομή των τιμών φωτεινότητας στην υδάτινη

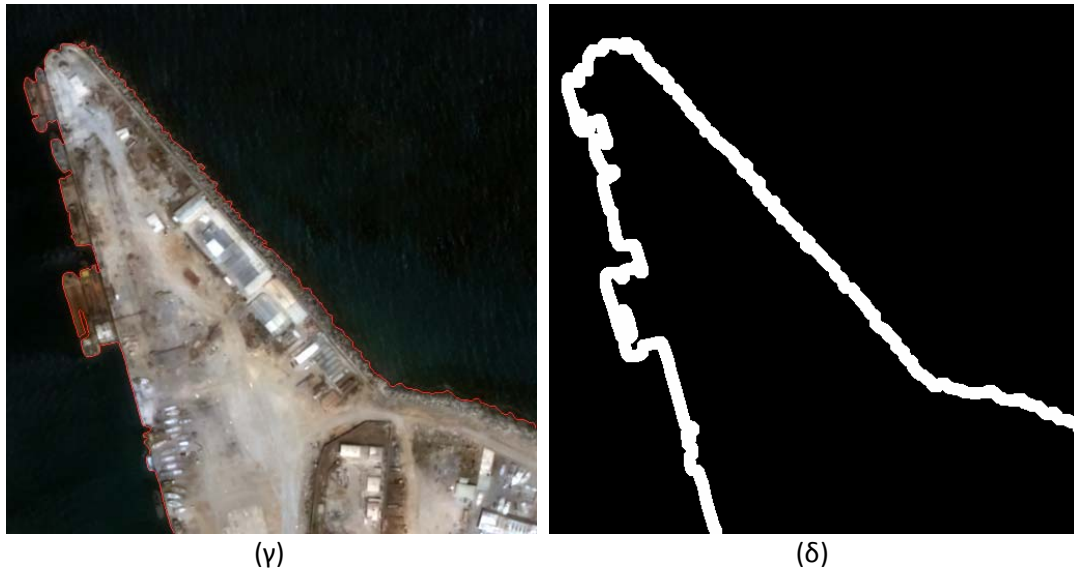
και τη χερσαία επιφάνεια, αντίστοιχα. Επομένως, το κατάλληλο κατώφλι ορίζεται στην τιμή 55, που εκτιμάται ως οριακή τιμή φωτεινότητας για τη θαλάσσια περιοχή. Ωστόσο, δοκιμάστηκαν και άλλες τιμές φωτεινότητας για την επιλογή κατάλληλου κατωφλίου.



Εικόνα 4.29: 4^η Εφαρμογή, (α) απεικόνιση QUICKBIRD στο εγγύς υπέρυθρο κανάλι, (β) το ιστόγραμμα συχνότητων της απεικόνισης.

Τελικά, η δυαδική εικόνα που προέκυψε – έπειτα από απαλοιφή κάποιων μικρών αντικειμένων της χερσαίας και της υδάτινης επιφάνειας (εικόνα 4.30(α)) – καθώς και η θέση της ακτογραμμής, παρουσιάζονται στις εικόνες 4.30(β) και 4.30(γ), αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι η ακτογραμμή που προέκυψε από την κατωφλίωση και παρουσιάζεται στην εικόνα 4.30(γ) δεν είναι η τελική θέση της ακτογραμμής, αλλά χρησιμοποιείται για την αφαίρεση των ανεπιθύμητων ακμών. Σε αυτήν τέθηκε ένα εύρος ζώνης 6 εικονοστοιχείων (εικόνα 4.30(δ)), οπότε και αφαιρέθηκαν οι περισσότερες από τις ανεπιθύμητες ακμές.

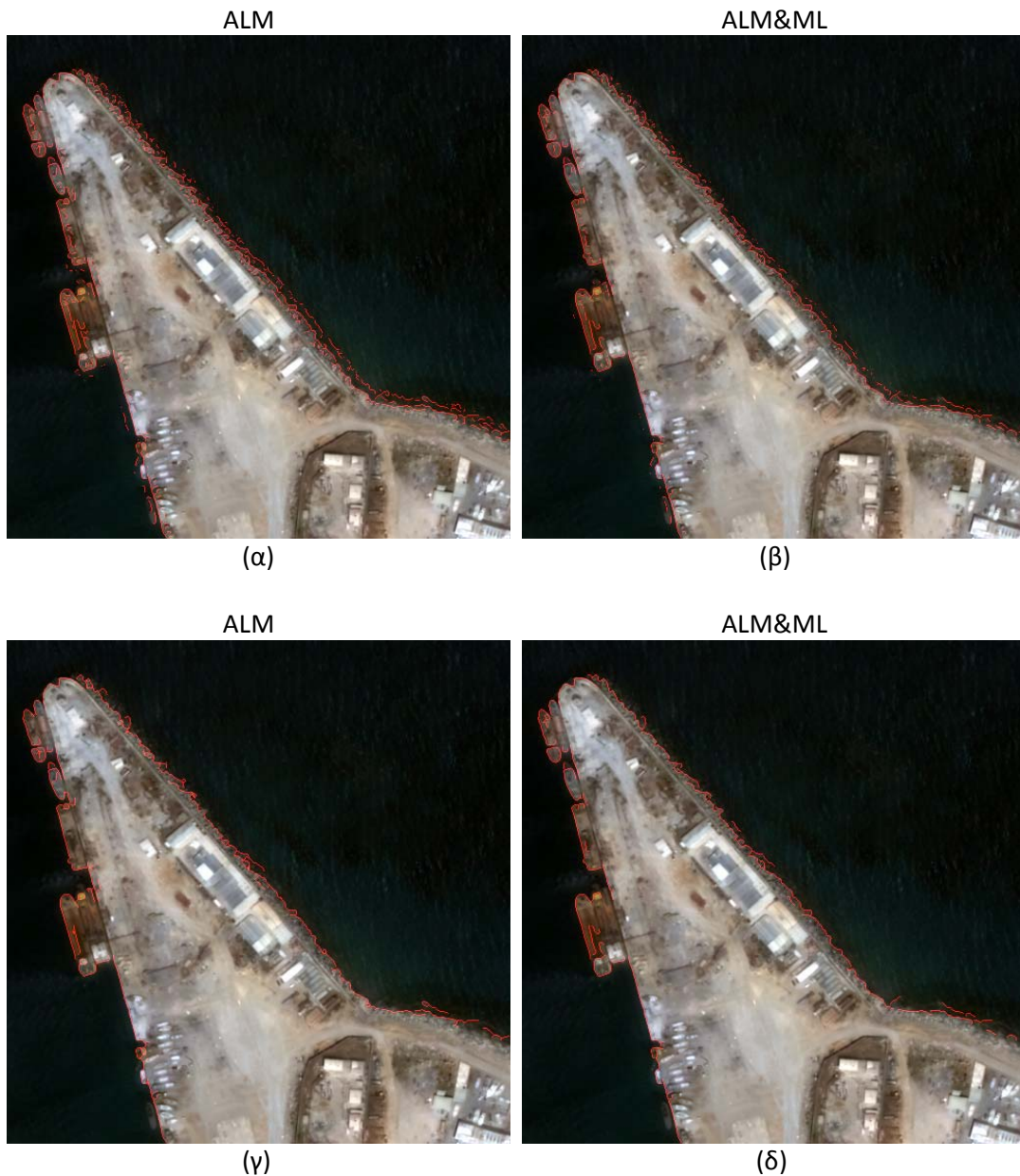




Εικόνα 4.30: 4^η Εφαρμογή, (α) διαχωρισμός χερσαίας-υδάτινης επιφάνειας έπειτα από κατωφλίωση (δυαδική εικόνα), (β) αφαίρεση μικρών αντικειμένων της χερσαίας και της υδάτινης επιφάνειας, (γ) υπέρθεση ακτογραμμής στην αρχική απεικόνιση έπειτα από κατωφλίωση, (δ) εύρος ζώνης 6 εικονοστοιχείων στην ακτογραμμή που προκύπτει από την κατωφλίωση.

Όπως φαίνεται στην εικόνα 4.30(γ), η κατωφλίωση – εξετάζοντας μόνο τις τιμές φωτεινότητας των εικονοστοιχείων – δεν οδηγεί σε ορθά αποτελέσματα, καθώς η αληθής θέση της ακτογραμμής είναι το περίγραμμα μόνον του λιμένος και όχι των πλοίων. Γενικότερα, σε επίπεδο φωτοερμηνείας, η θέση της ακτογραμμής δεν κρίνεται σωστή, γεγονός το οποίο επιβεβαιώνεται και από της δείκτες αξιολόγησης (πίνακας 4.9), και δεν αναμένονται ορθά αποτελέσματα στο τελικό εξαγόμενο προϊόν.

Το εύρος ζώνης τέθηκε στις εικόνες ακμών και που είχαν αρχικά υποστεί προ-επεξεργασία με: (α) ALM 200 επαναλήψεων (εικόνα 4.27(β)), και (β) ALM 200 επαναλήψεων συνδυαστικά με ML 5 επαναλήψεων (εικόνα 4.28(β)). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στις εικόνες 4.31(α) και 4.31(β), αντίστοιχα. Στην περίπτωση προ-επεξεργασίας με ALM, η εξαγόμενη ακτογραμμή προκύπτει, τελικά, χρησιμοποιώντας τα μορφολογικά εργαλεία `bwareaopen` και `bwmorph` (`bridge`) (`bwareaopen` → `bwmorph` → `bwareaopen`), αφαιρώντας τις μικρές εναπομείνουσες ακμές (εικόνα 4.31(γ)). Στην περίπτωση προ-επεξεργασίας με ALM και ML, η εξαγόμενη ακτογραμμή προκύπτει, τελικά, χρησιμοποιώντας μόνο το μορφολογικό εργαλείο `bwareaopen` (εικόνα 4.31(δ)).



Εικόνα 4.31: 4^η Εφαρμογή, υπέρθεση των ακμών εντός του εύρους ζώνης (εικόνα 4.30(δ)) στην αρχική απεικόνιση και τελική θέση ακτογραμμής, αντίστοιχα, έπειτα από προ-επεξεργασία με (α), (γ) ALM και (β), (δ) ALM συνδυαστικά με ML.

Η τελική θέση της ακτογραμμής προέκυψε από την αρχική ανίχνευση ακμών με τον τελεστή Canny και δεν παρατηρούνται έντονες διαφορές, σε επίπεδο φωτοερμηνείας, για τις δύο μεθόδους προ-επεξεργασίας – εκτός από κάποιες εναπομένουσες ακμές. Επιπλέον, επειδή όπως σημειώθηκε παρουσιάζονται αρκετές ασυνέχειες, φαίνεται ότι το πρόβλημα αυτό επηρεάζει και την τελική θέση της ακτογραμμής (εικόνες 4.31(γ) και 4.31(δ)). Τα κενά αυτά οφείλονται στην αρχική ανίχνευση των ακμών από τον Canny, καθώς κάποια τμήματα της ακτογραμμής δεν είχαν ανιχνευτεί, και στη μετα-επεξεργασία της απεικόνισης – για να αφαιρεθούν οι εναπομείνουσες ακμές αφαιρέθηκαν και κάποια μικρά τμήματα της ακτογραμμής. Σημειώνεται ότι εάν είχε τεθεί μεγαλύτερο εύρος ζώνης ούτως ώστε να διατηρηθεί η αληθής θέση της ακτογραμμής – δηλαδή το περίγραμμα του λιμένας

– Θα υπήρχαν πολύ περισσότερες εναπομείνουσες ακμές και στη χερσαία και στην υδάτινη επιφάνεια.

Στη συνέχεια παρατίθεται αξιολόγηση βάσει των κριτηρίων πληρότητας, ορθότητας και ποιότητας, για τρία προϊόντα ακτογραμμής: (α) ανίχνευση μόνο με τον Canny, (β) εξαγωγή μόνο από κατωφλίωση ως το όριο των δύο κλάσεων, και (γ) εξαγωγή βάσει της μεθοδολογίας που περιγράφηκε στο διάγραμμα ροής του σχήματος 4.5, για την κατωφλίωση. Η σύγκριση πραγματοποιήθηκε για ζώνες εύρους 1, 3 και 5 εικονοστοιχείων, σε σχέση με την ψηφιοποιημένη ακτογραμμή αναφοράς.

		Εύρος ζώνης (εικονοστοιχεία)		
ΠΛΗΡΟΤΗΤΑ		1	3	5
	Κατωφλίωση	0.4467	0.61673	0.68612
ALM	Canny	0.67597	0.86663	0.92042
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.56804	0.73618	0.79602
ALM&ML	Canny	0.67992	0.86258	0.91389
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.57568	0.73327	0.79215
ΟΡΘΟΤΗΤΑ		1	3	5
	Κατωφλίωση	0.41901	0.5583	0.6229
ALM	Canny	0.64767	0.80805	0.86873
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.38426	0.50303	0.57653
ALM&ML	Canny	0.68045	0.83409	0.8893
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.42376	0.52634	0.58984
ΠΟΙΟΤΗΤΑ		1	3	5
	Κατωφλίωση	0.27585	0.41449	0.48476
ALM	Canny	0.49423	0.71868	0.80804
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.29737	0.4262	0.50231
ALM&ML	Canny	0.51536	0.73626	0.82054
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.3229	0.44176	0.51079

Πίνακας 4.9: 4^η Εφαρμογή, αξιολόγηση ανίχνευσης ακτογραμμής με: κατωφλίωση, Canny και την υλοποιημένη μεθοδολογία, για τις δυο μεθόδους προ-επεξεργασίας.

Με βάση τον παραπάνω πίνακα, παρατηρούνται τα εξής:

- Σε επίπεδο *πληρότητας*, η ανίχνευση των ακμών με προ-επεξεργασία την ALM έχει παρόμοια αποτελέσματα με την ALM συνδυαστικά με την ML. Ομοίως και για την υλοποιημένη μεθοδολογία, αν και **τα αποτελέσματα είναι πολύ μειωμένα, σε σχέση με τον Canny. Αυτό οφείλεται κυρίως στην κατωφλίωση.**
- Σε επίπεδα *ορθότητας* και *ποιότητας*, η ανίχνευση των ακμών με προ-επεξεργασία την ALM συνδυαστικά με την ML έχει καλύτερα αποτελέσματα από

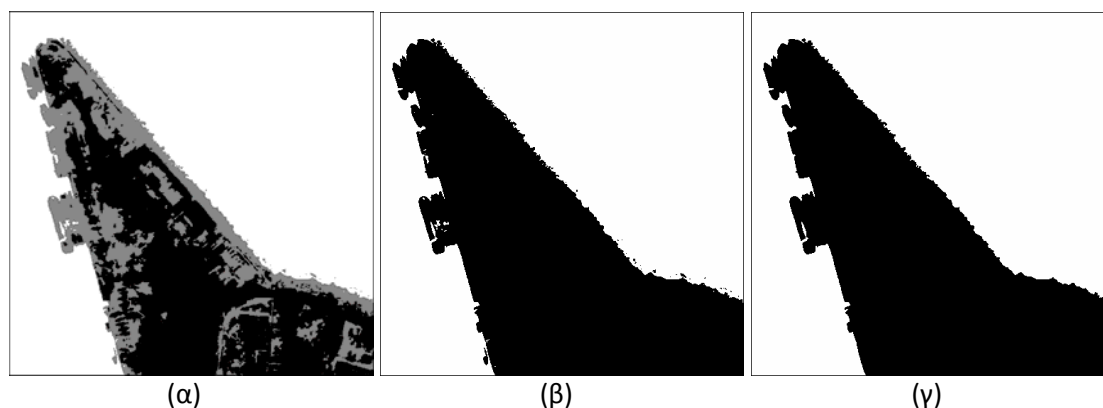
την ALM. Ομοίως και για την υλοποιημένη μεθοδολογία, αν και τα αποτελέσματα είναι πολύ μειωμένα, σε σχέση με τον Canny. Αυτό οφείλεται κυρίως στην κατωφλίωση.

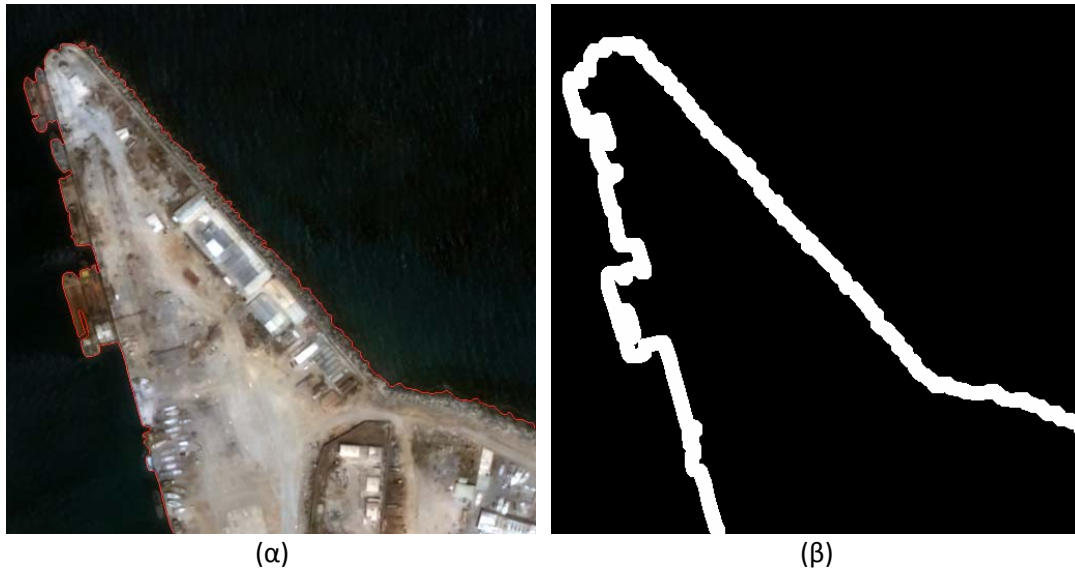
- Για εύρος ζώνης 1 εικονοστοιχείου οι δείκτες αξιολόγησης, συνολικά, δεν κυμαίνονται σε ικανοποιητικά επίπεδα (μ.ό. πληρότητας 58,9%, μ.ό ορθότητας 51,1%, μ.ό ποιότητας 38,1%). Η συγκεκριμένη απεικόνιση έχει διακριτική ικανότητα 0,6 m (rap-sharpened), και η δεδομένη ζώνη (3 εικονοστοιχεία $\rightarrow \pm 0,7m$) αντιστοιχεί σε κλίμακα χαρτογράφησης 1:4.500, περίπου.
- Ομοίως και για εύρος ζώνης 3 εικονοστοιχείων, κυρίως λόγω της κατωφλίωσης, εκτός της πληρότητας (μ.ό. πληρότητας 76,3%, μ.ό ορθότητας 64,6%, μ.ό ποιότητας 54,7%). Η δεδομένη ζώνη (5 εικονοστοιχεία $\rightarrow \pm 1,4m$) αντιστοιχεί σε κλίμακα χαρτογράφησης 1:7.000.
- Ομοίως και για εύρος ζώνης 5 εικονοστοιχείων, κυρίως λόγω της κατωφλίωσης, εκτός της πληρότητας (μ.ό. πληρότητας 82,2%, μ.ό ορθότητας 70,9% και για την υλοποιημένη μεθοδολογία 58,3%, μ.ό ποιότητας 62,5%). Η δεδομένη ζώνη (9 εικονοστοιχεία $\rightarrow \pm 2,8m$) αντιστοιχεί σε κλίμακα χαρτογράφησης 1:13.000, περίπου.

Σημειώνεται ότι η ακτογραμμή που ανιχνεύτηκε μόνο με τον Canny και χρησιμοποιείται στην αξιολόγηση, προέκυψε από τα δεδομένα αναφοράς με χρήση εύρους ζώνης 4 εικονοστοιχείων και μορφολογικών εργαλείων.

Συσταδοποίηση Κ-μέσου

Η συγκεκριμένη απεικόνιση κατηγοριοποιήθηκε σε τρεις κλάσεις (εικόνα 4.32(α)). Έπειτα από την απαλοιφή κάποιων μικρών αντικειμένων της χερσαίας και της υδάτινης επιφάνειας, προέκυψε ο τελικός διαχωρισμός της απεικόνισης σε δύο κλάσεις (εικόνα 4.32(γ)). Ομοίως με την κατωφλίωση, ανιχνεύτηκε η θέση της ακτογραμμής ως το όριο των δύο επιφανειών (εικόνα 4.32(δ)).

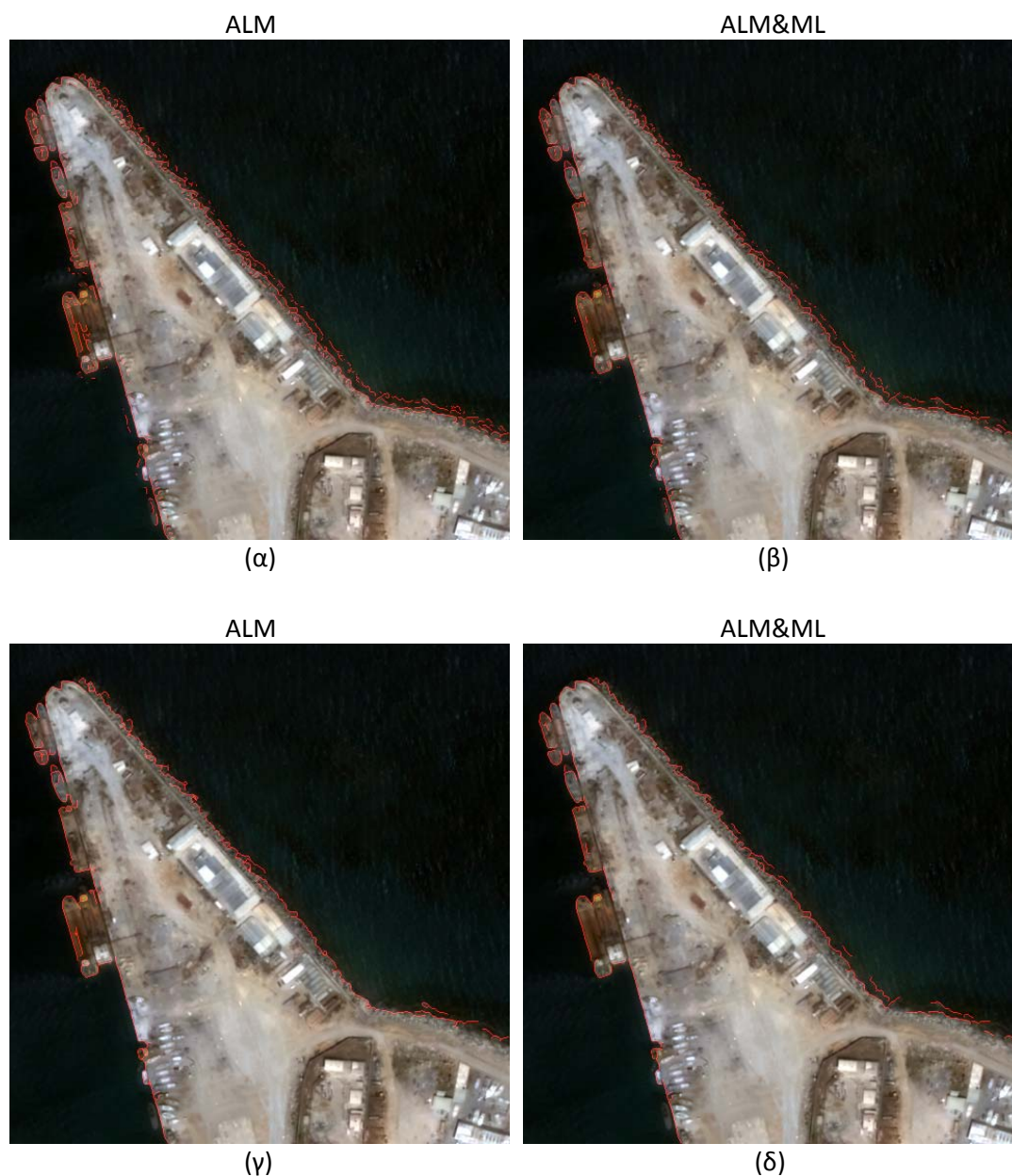




Εικόνα 4.32: 4^η Εφαρμογή, (α) συσταδοποίηση Κ-μέσου σε τρεις κλάσεις, (β) διαχωρισμός χερσαίας-υδάτινης επιφάνειας σε δύο κλάσεις, (γ) αφαίρεση μικρών αντικειμένων της χερσαίας και της υδάτινης επιφάνειας, (γ) υπέρθεση ακτογραμμής στην αρχική απεικόνιση έπειτα από συσταδοποίηση Κ-μέσου, (ε) εύρος ζώνης 7 εικονοστοιχείων στην ακτογραμμή που προκύπτει από τη συσταδοποίηση.

Όπως φαίνεται στην εικόνα 4.32(γ), η συσταδοποίηση – όπως και η κατωφλίωση – δεν οδηγεί σε ορθά αποτελέσματα, καθώς η αληθής θέση της ακτογραμμής είναι το περίγραμμα μόνον του λιμένος και όχι των πλοίων. Επιπλέον, η δημιουργία περισσότερων κλάσεων δεν ήταν επιτυχής, προκειμένου να διαχωριστεί η χερσαία επιφάνεια από τα πλοία, κι όχι η “θάλασσα” από τη “μη θάλασσα”. Γενικότερα, σε επίπεδο φωτοερμηνείας, η θέση της ακτογραμμής δεν κρίνεται σωστή, γεγονός το οποίο επιβεβαιώνεται και από τους δείκτες αξιολόγησης (πίνακας 4.10), και δεν αναμένονται ορθά αποτελέσματα στο τελικό εξαγόμενο προϊόν.

Στην ακτογραμμή που προέκυψε ως το όριο των δύο κλάσεων τέθηκε ένα εύρος ζώνης 7 εικονοστοιχείων στην περίπτωση προ-επεξεργασίας με την ALM (εικόνα 4.32(ε)) και 6 εικονοστοιχείων στην περίπτωση προ-επεξεργασίας με την ALM συνδυαστικά με την ML, με σκοπό την αφαίρεση ανεπιθύμητων ακμών. Το εύρος ζώνης τέθηκε στις εικόνες ακμών και που είχαν αρχικά υποστεί προ-επεξεργασία με: (α) ALM 200 επαναλήψεων (εικόνα 4.27(β)), και (β) ALM 200 επαναλήψεων συνδυαστικά με ML 5 επαναλήψεων (εικόνα 4.28(β)). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στις εικόνες 4.33(α) και 4.33(β), αντίστοιχα. Στην περίπτωση προ-επεξεργασίας με ALM, η εξαγόμενη ακτογραμμή προκύπτει, τελικά, χρησιμοποιώντας τα μορφολογικά εργαλεία `bwareaopen` και `bwmorph` (`bridge`) (`bwareaopen` → `bwmorph` → `bwareaopen`), αφαιρώντας τις μικρές εναπομείνουσες ακμές (εικόνα 4.33(γ)). Στην περίπτωση προ-επεξεργασίας με ALM και ML, η εξαγόμενη ακτογραμμή προκύπτει, τελικά, χρησιμοποιώντας μόνο το μορφολογικό εργαλείο `bwareaopen` (εικόνα 4.33(δ)).



Εικόνα 4.33: 4^η Εφαρμογή, υπέρθεση των ακμών εντός του εύρους ζώνης (εικόνα 4.32(ε)) στην αρχική απεικόνιση και τελική θέση ακτογραμμής, αντίστοιχα, έπειτα από προ-επεξεργασία με (α), (γ) ALM και (β), (δ) ALM συνδυαστικά με ML.

Η τελική θέση της ακτογραμμής προέκυψε από την αρχική ανίχνευση ακμών με τον τελεστή Canny. Σε επίπεδο φωτοερμηνείας για τις δύο μεθόδους προ-επεξεργασίας, παρατηρούνται αρκετές εναπομένουσες ακμές, ενώ, λόγω της συσταδοποίησης, ένα μεγάλο τμήμα της τελικής θέσης της ακτογραμμής είναι εσφαλμένο. Επιπλέον, όπως σημειώθηκε, παρουσιάζονται αρκετές ασυνέχειες (εικόνες 4.33(γ) και 4.33(δ)), ιδίως για την ALM συνδυαστικά με ML. Τα κενά αυτά οφείλονται στην αρχική ανίχνευση των ακμών από τον Canny, καθώς κάποια τμήματα της ακτογραμμής δεν είχαν ανιχνευτεί, και στη μετα-επεξεργασία της απεικόνισης – για να αφαιρεθούν οι εναπομείνουσες ακμές αφαιρέθηκαν και κάποια μικρά τμήματα της ακτογραμμής. Σημειώνεται ότι εάν είχε τεθεί μεγαλύτερο εύρος ζώνης ούτως ώστε να

διατηρηθεί η αληθής θέση της ακτογραμμής – δηλαδή το περίγραμμα του λιμένος – θα υπήρχαν πολύ περισσότερες εναπομείνασες ακμές και στη χερσαία και στην υδάτινη επιφάνεια.

Στη συνέχεια παρατίθεται αξιολόγηση βάσει των κριτηρίων πληρότητας, ορθότητας και ποιότητας, για τρία προϊόντα ακτογραμμής: (α) ανίχνευση μόνο με τον Canny, (β) εξαγωγή μόνο από συσταδοποίηση K-μέσου ως το όριο των δύο κλάσεων, και (γ) εξαγωγή βάσει της μεθοδολογίας που περιγράφηκε στο διάγραμμα ροής του σχήματος 4.5, για τη συσταδοποίηση. Η σύγκριση πραγματοποιήθηκε για ζώνες εύρους 1, 3 και 5 εικονοστοιχείων, σε σχέση με την ψηφιοποιημένη ακτογραμμή αναφοράς.

		Εύρος ζώνης (εικονοστοιχεία)		
ΠΛΗΡΟΤΗΤΑ		1	3	5
	Συσταδοποίηση K-μέσου	0.4467	0.61685	0.6862
ALM	Canny	0.67597	0.86663	0.92042
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.56804	0.73618	0.79602
ALM&ML	Canny	0.67992	0.86258	0.91389
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.57568	0.73327	0.79215
		Εύρος ζώνης (εικονοστοιχεία)		
ΟΡΘΟΤΗΤΑ		1	3	5
	Συσταδοποίηση K-μέσου	0.41901	0.55842	0.62297
ALM	Canny	0.64767	0.80805	0.86873
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.38426	0.50303	0.57653
ALM&ML	Canny	0.68045	0.83409	0.8893
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.42376	0.52634	0.58984
		Εύρος ζώνης (εικονοστοιχεία)		
ΠΟΙΟΤΗΤΑ		1	3	5
	Συσταδοποίηση K-μέσου	0.27585	0.41461	0.48485
ALM	Canny	0.49423	0.71868	0.80804
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.29737	0.4262	0.50231
ALM&ML	Canny	0.51536	0.73626	0.82054
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.3229	0.44176	0.51079

Πίνακας 4.10: 4^η Εφαρμογή, αξιολόγηση ανίχνευσης ακτογραμμής με: συσταδοποίηση K-μέσου, Canny και την υλοποιημένη μεθοδολογία, για τις δυο μεθόδους προ-επεξεργασίας.

Με βάση τον παραπάνω πίνακα, οι παρατηρήσεις είναι ίδιες με την κατωφλίωση:

- Σε επίπεδο *πληρότητας*, η ανίχνευση των ακμών με προ-επεξεργασία την ALM έχει παρόμοια αποτελέσματα με την ALM συνδυαστικά με την ML. Ομοίως και για την υλοποιημένη μεθοδολογία, αν και **τα αποτελέσματα είναι πολύ**

μειωμένα, σε σχέση με τον Canny. Αυτό οφείλεται κυρίως στη συσταδοποίηση.

- Σε επίπεδα *ορθότητας* και *ποιότητας*, η ανίχνευση των ακμών με προεπεξεργασία την ALM συνδυαστικά με την ML έχει καλύτερα αποτελέσματα από την ALM. Ομοίως και για την υλοποιημένη μεθοδολογία, αν και τα αποτελέσματα είναι πολύ μειωμένα, σε σχέση με τον Canny. Αυτό οφείλεται κυρίως στη συσταδοποίηση.
- Για εύρος ζώνης 1 εικονοστοιχείου οι δείκτες αξιολόγησης, συνολικά, δεν κυμαίνονται σε ικανοποιητικά επίπεδα (μ.ό. πληρότητας 58,9%, μ.ό ορθότητας 51,1%, μ.ό ποιότητας 38,1%).
- Ομοίως και για εύρος ζώνης 3 εικονοστοιχείων, κυρίως λόγω της συσταδοποίησης, εκτός της πληρότητας (μ.ό. πληρότητας 76,3%, μ.ό ορθότητας 64,6%, μ.ό ποιότητας 54,8%).
- Ομοίως και για εύρος ζώνης 5 εικονοστοιχείων, κυρίως λόγω της συσταδοποίησης, εκτός της πληρότητας (μ.ό. πληρότητας 82,2%, μ.ό ορθότητας 70,9% και για την υλοποιημένη μεθοδολογία 58,3%, μ.ό ποιότητας 62,5%).

Εντροπία

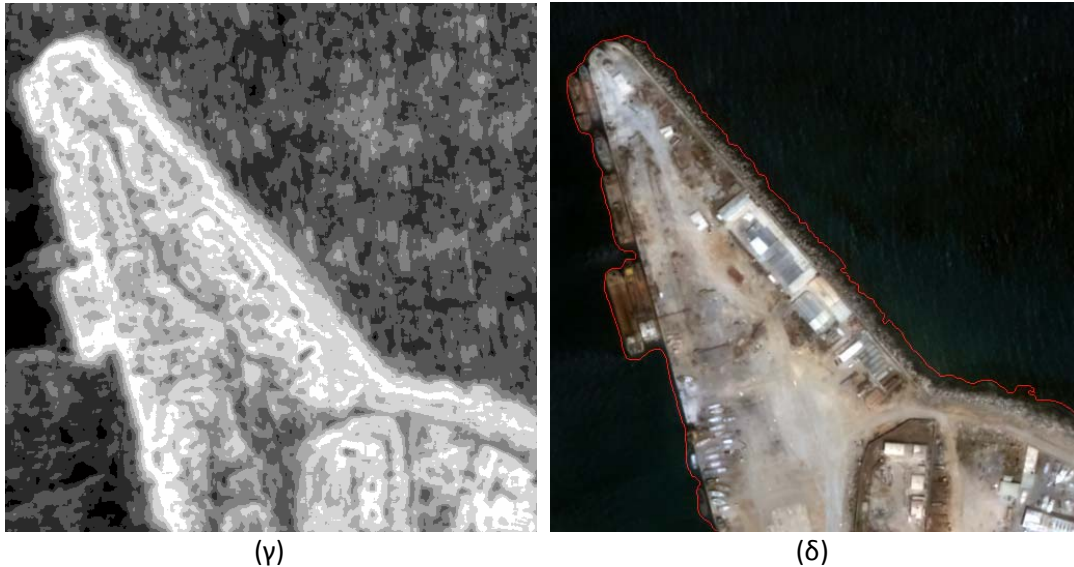
Στη συγκεκριμένη απεικόνιση, η μέτρηση της εντροπίας με χρήση της πολυεπίπεδης κατωφλίωσης δεν έχει καλά αποτελέσματα. Στις εικόνες που επισυνάπτονται παρουσιάζεται και η εξαγωγή της ακτογραμμής έπειτα από μορφολογική επεξεργασία του προϊόντος της πολυεπίπεδης κατωφλίωσης. Έπειτα από πολλές δοκιμές προέκυψε ότι η ορθότερη κατωφλίωση ήταν επτά επιπέδων. Φαίνεται ότι δεν εντοπίζεται σωστά η ακτογραμμή, ούτε όσον αφορά στο περίγραμμα του λιμένος ούτε στο όριο χερσαίας και υδάτινης επιφάνειας. Σημειώνεται ότι η εξαγωγή της ακτογραμμής με συγχώνευση πληροφορίας (fusion) είναι πολύ πιθανό να δίνει πολύ καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με την πολυεπίπεδη κατωφλίωση.



(α)



(β)



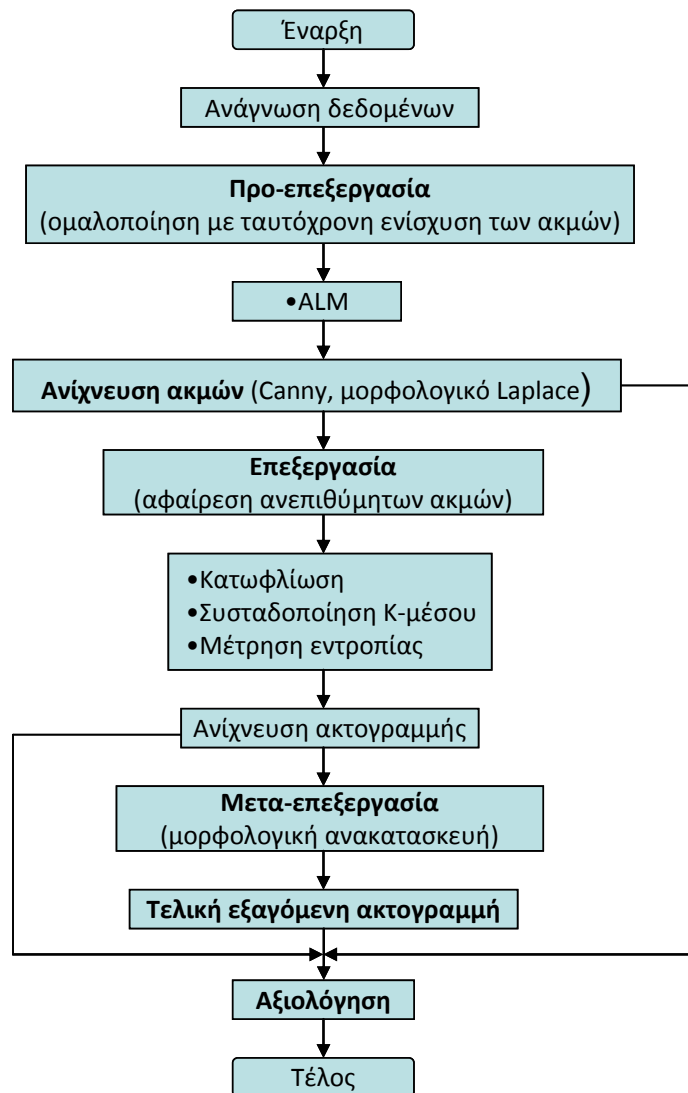
Εικόνα 4.34: 4^η Εφαρμογή, (α) απεικόνιση QUICKBIRD στο εγγύς υπέρυθρο κανάλι, (β) ανάλυση υφής με μέτρηση της εντροπίας, (γ) κατωφλίωση επτά επιπέδων στην εικόνα υφής, (δ) υπέρθεση ακτογραμμής στην αρχική απεικόνιση έπειτα από μέτρηση της εντροπίας.

Συνοψίζοντας:

- Οι ακμές που ανιχνεύονται «υποφέρουν» από κενά και ασυνέχειες, το οποίο επηρεάζει αρνητικά την τελική εξαγωγή της ακτογραμμής. Παράλληλα, εξαρτώνται άμεσα από την ποιότητα και τη δυσκολία της απεικόνισης (π.χ. θόρυβος, βράχια, αβαθή νερά, λιμένες).
- Η κατωφλίωση στο υπέρυθρο κανάλι, αν και αποτελεί ενδεδειγμένη τεχνική, ωστόσο είναι πολύ χρονοβόρα όσον αφορά στην επιλογή του κατάλληλου κατωφλίου.
- Σε επίπεδο πληρότητας, η χρήση της ALM παρουσιάζει παρόμοια αποτελέσματα με τον συνδυασμό της με την ML. Ωστόσο, βάσει των κριτηρίων ορθότητας και ολικής ποιότητας των ακμών, ο συνδυασμός της ALM με την ML έχει καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με την ALM. Φωτοερμηνευτικά, δεν παρατηρήθηκαν έντονες διαφορές στην εξαγόμενη ακτογραμμή, για τις δύο μεθόδους προεπεξεργασίας.
- Η κατωφλίωση δεν υπερέχει – βάσει των κριτηρίων αξιολόγησης – της συσταδοποίησης K-μέσου σε τρεις κλάσεις. Ωστόσο, **ο υλοποιημένος αλγόριθμος δεν έχει ενθαρρυντικά αποτελέσματα για δύο λόγους. Αφενός, η συγκεκριμένη απεικόνιση παρουσιάζει έντονες δυσκολίες λόγω της παρουσίας του λιμένος και των αβαθών υδάτων, αφετέρου τόσο η κατωφλίωση όσο και η συσταδοποίηση δεν είχαν αποδεκτά αποτελέσματα.** Παρόλα αυτά, είναι ενθαρρυντικό το γεγονός ότι ο υλοποιημένος αλγόριθμος συσταδοποίησης είχε τα ίδια αποτελέσματα με την κατωφλίωση, η οποία ενδείκνυται για το διαχωρισμό χερσαίων και υδάτινων περιοχών. Καταλληλότερη τεχνική προεπεξεργασίας κρίνεται η ALM 200 επαναλήψεων συνδυαστικά με 5 επαναλήψεις ML.
- Η μέθοδος που αναπτύχθηκε βάσει της εντροπίας δεν είχε καλά αποτελέσματα.

- Η τελική εξαγωγή της ακτογραμμής εξαρτάται – εκτός από την αρχική ανίχνευση των ακμών – και από την τεχνική επεξεργασίας και τα μορφολογικά εργαλεία που επιλέγονται για την ανακατασκευή της – συμπεριλαμβανομένου και του εύρους ζώνης.
- Η αξιολόγηση της εξαγόμενης ακτογραμμής εξαρτάται άμεσα από την ορθότητα της ψηφιοποίησης των δεδομένων αναφοράς, καθώς και από τη μετατροπή τους σε ψηφιδωτά δεδομένα. Στη συγκεκριμένη απεικόνιση, επειδή η επαναφορά της στις αρχικές της διαστάσεις έγινε από μεγαλύτερης διάστασης εικόνα, παρουσιάστηκαν κενά στην ακτογραμμή αναφοράς.
- Η υλοποιημένη μεθοδολογία απαιτείται βελτίωσης προκειμένου να εφαρμοστεί σε δεδομένα ιδιαίτερης δυσκολίας, όπως λιμένες, ενδεχομένως με χρήση συστημάτων ανθρώπινης γνώσης. Ως εκ τούτου, δεν προτείνεται για τη χαρτογράφησή τους.

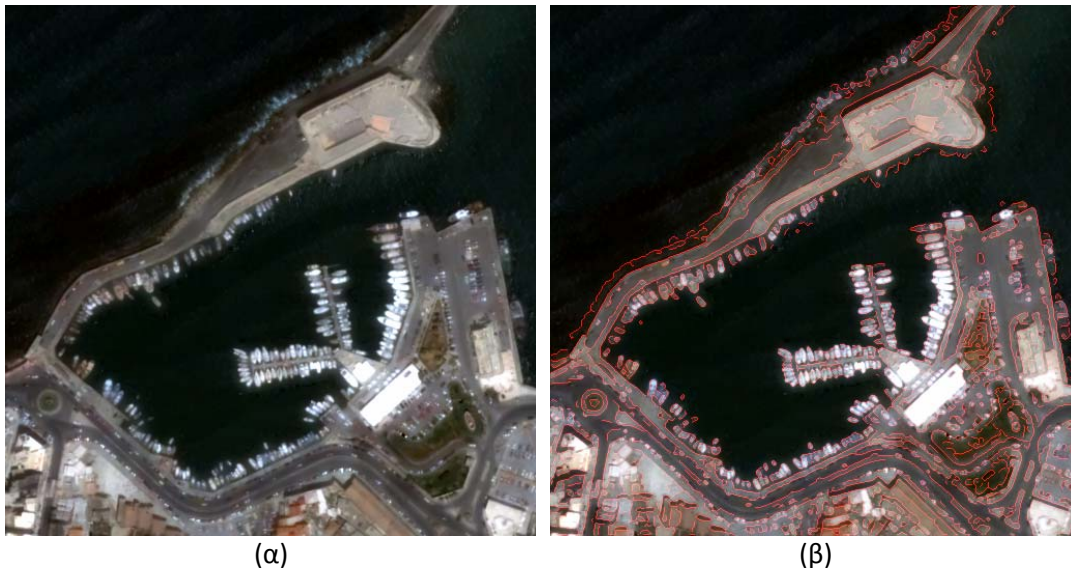
4.5 5^η Εφαρμογή – Περιοχή: λιμένας Ηρακλείου Κρήτης (QUICKBIRD)



Σχήμα 4.6: 5^η Εφαρμογή, διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε, με σκοπό τη διερεύνηση ανίχνευσης ακτογραμμής με προηγμένες τεχνικές ομαλοποίησης και τον τελεστή Canny.

Σημειώνεται ότι αν και οι εφαρμογές 4 και 5 αποτελούν τμήματα της ίδιας απεικόνισης, ωστόσο χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές τεχνικές και παράμετροι αυτών, λόγω προγραμματιστικής δυσκολίας.

Όπως παρουσιάστηκε στο προηγούμενο εδάφιο, η πιο αποτελεσματική τεχνική (από αυτές που εξετάστηκαν και για τις συγκεκριμένες εφαρμογές) ομαλοποίησης με ταυτόχρονη ενίσχυση των ακμών είναι η ανιστροπική διάχυση ALM. Κατά την εφαρμογή της παρατηρήθηκε ότι τα καλύτερα αποτελέσματα δίνονται έπειτα από 200 επαναλήψεις. Η ανίχνευση των ακμών έγινε με τον Canny και το μορφολογικό Laplace τελεστή. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.35(β), οι ακμές δεν είναι συνεχείς και αυτό αναδεικνύεται και στις υπόλοιπες τεχνικές, δημιουργώντας περαιτέρω προβλήματα. Ακόμα και η φωτοερμηνεία της συγκεκριμένης απεικόνισης ήταν απαιτητική, λόγω της παρουσίας βραχωδών σημείων στο πέρας της χερσαίας επιφάνειας (εικόνα 4.35(α)). Η ανίχνευση ακμών στα σημεία αυτά δημιούργησε σύγχυση τόσο στην ψηφιοποίηση όσο στον προσδιορισμό της αληθούς θέσης της ακτογραμμής, συμβάλλοντας αρνητικά και στη συνέχειά της.



Εικόνα 4.35: 5^η Εφαρμογή, (α) απεικόνιση QUICKBIRD στο φυσικό έγχρωμο σύνθετο, (β) ανιστροπική διάχυση ALM 200 επαναλήψεων και ανίχνευση ακμών με τον Canny.

Σημειώνεται ότι η ορθή θέση της ακτογραμμής δεν περιλαμβάνει το περίγραμμα των πλοίων που βρίσκονται στο λιμάνι, αλλά μόνο την χερσαία επιφάνεια. Ωστόσο, παρατηρούνται ασυνέχειες στην ανίχνευσή της με τον Canny και λιγότερες με το μορφολογικό Laplace τελεστή.

Ο δεύτερος αλγόριθμος που υλοποιήθηκε περιλαμβάνει 200 επαναλήψεις ALM και ανίχνευση των ακμών με το μορφολογικό Laplace τελεστή (εικόνα 4.36(β)). Τα προβλήματα που ανέκυψαν είναι τα ίδια με αυτά που παρουσιάστηκαν για τον Canny. Αν και οι ακμές εντοπίζονται καλύτερα με τον Canny, δεν απορρίφθηκε η χρήση του μορφολογικού Laplace λόγω των λιγότερων ασυνεχειών και του καλού εντοπισμού του λιμένος – φωτοερμηνευτικά.



Εικόνα 4.36: 5^η Εφαρμογή, (α) απεικόνιση QUICKBIRD στο φυσικό έγχρωμο σύνθετο, (β) ανισοτροπική διάχυση ALM 200 επαναλήψεων και ανίχνευση ακμών με το μορφολογικό Laplace τελεστή.

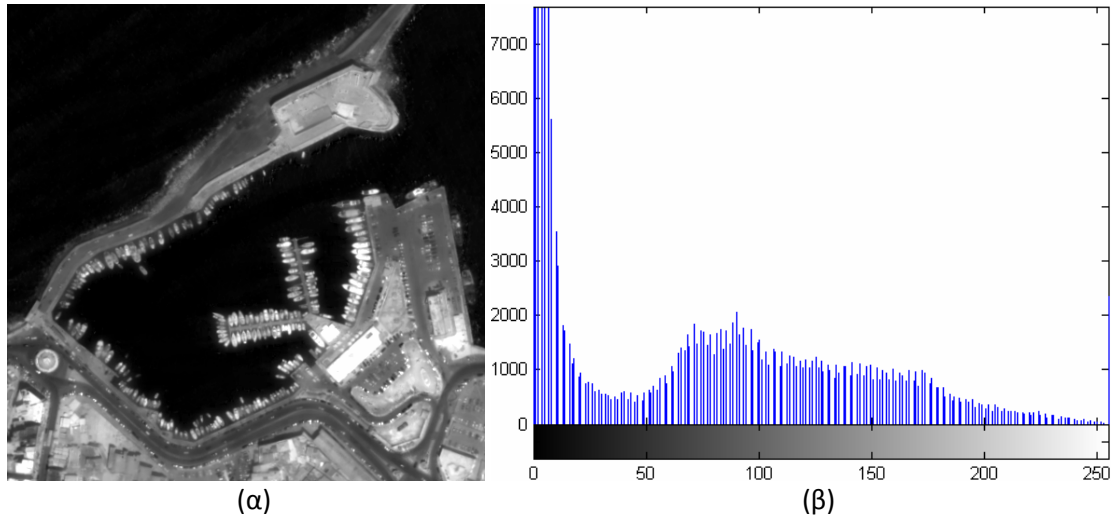
Συνοψίζοντας, τα βασικά προβλήματα που αναδείχτηκαν και παρουσιάστηκαν κατά την ανίχνευση ακμών ήταν τα εξής:

- (α) δυσκολία απεικόνισης (βράχια, λιμένας).
- (β) ασυνέχεια ακμών.

Για την αφαίρεση των ανεπιθύμητων ακμών χρησιμοποιήθηκαν: (α) κατωφλίωση στο υπέρυθρο κανάλι βάσει του ιστογράμματος, (β) συσταδοποίηση K-μέσου, και (γ) μέτρηση της εντροπίας. Στη συνέχεια επισυνάπτονται και αναλύονται οι παράμετροι της εκάστοτε τεχνικής, καθώς και τα αποτελέσματα που προέκυψαν.

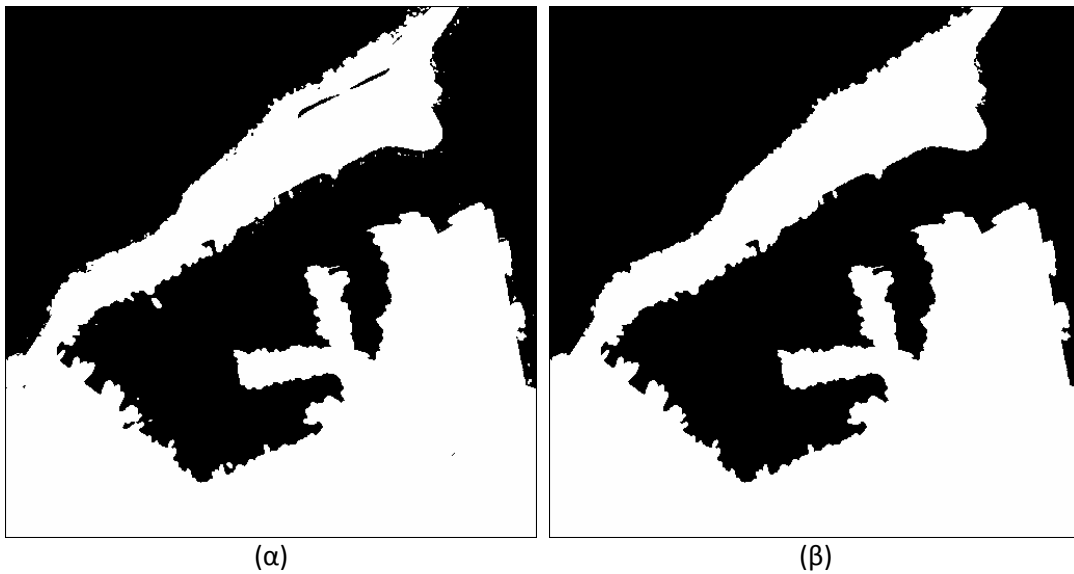
Κατωφλίωση

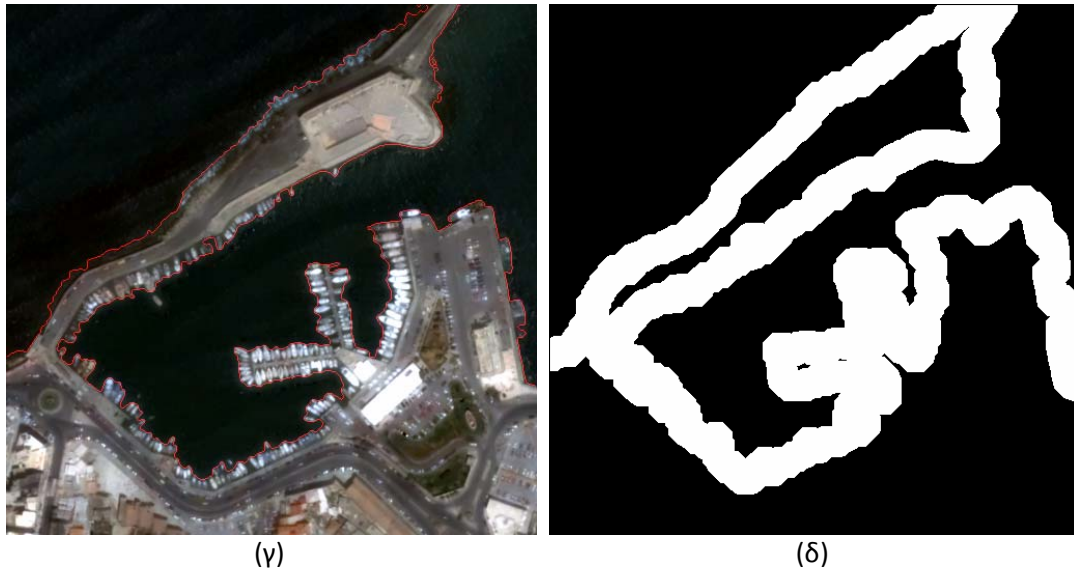
Η επιλογή του κατάλληλου κατωφλίου έγινε βάσει του ιστογράμματος της απεικόνισης. Όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, οι δύο «καμπάνες» του ιστογράμματος παρουσιάζουν την κατανομή των τιμών φωτεινότητας στην υδάτινη και τη χερσαία επιφάνεια, αντίστοιχα. Επομένως, το κατάλληλο κατώφλι ορίζεται στην τιμή 40, που εκτιμάται ως οριακή τιμή φωτεινότητας για τη θαλάσσια περιοχή. Ωστόσο, δοκιμάστηκαν και άλλες τιμές φωτεινότητας για την επιλογή κατάλληλου κατωφλίου.



Εικόνα 4.37: 5^η Εφαρμογή, (α) απεικόνιση QUICKBIRD στο εγγύς υπέρυθρο κανάλι, (β) το ιστόγραμμα συχνοτήτων της απεικόνισης.

Τελικά, η δυαδική εικόνα που προέκυψε – έπειτα από απαλοιφή κάποιων μικρών αντικειμένων της χερσαίας και της υδάτινης επιφάνειας (εικόνα 4.38(α)) – καθώς και η θέση της ακτογραμμής, παρουσιάζονται στις εικόνες 4.38(β) και 4.38(γ), αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι η ακτογραμμή που προέκυψε από την κατωφλίωση και παρουσιάζεται στην εικόνα 4.38(γ) δεν είναι η τελική θέση της ακτογραμμής, αλλά χρησιμοποιείται για την αφαίρεση των ανεπιθύμητων ακμών. Σε αυτήν τέθηκε ένα εύρος ζώνης 15 εικονοστοιχείων (εικόνα 4.38(δ)), οπότε και αφαιρέθηκαν οι περισσότερες από τις ανεπιθύμητες ακμές.

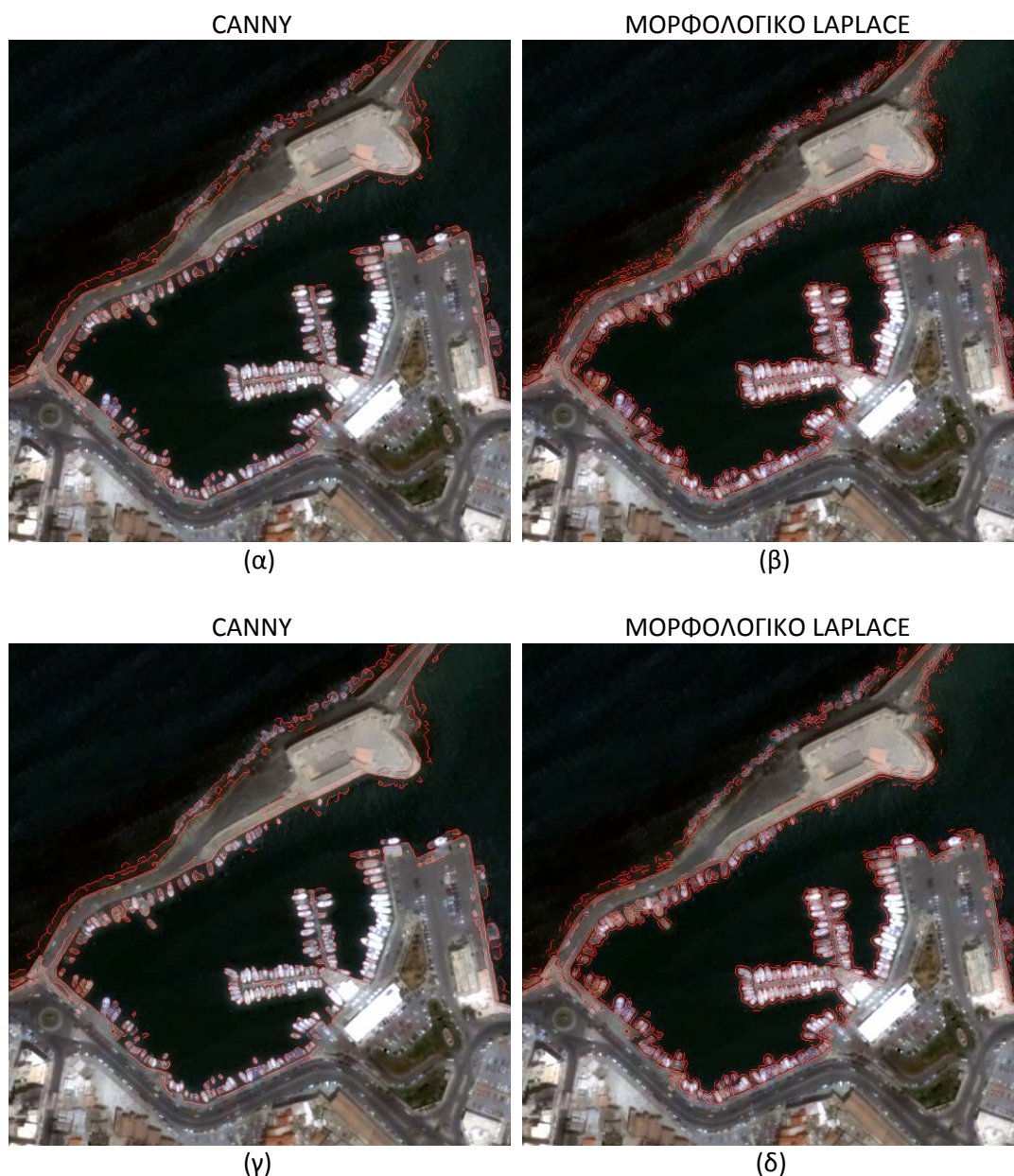




Εικόνα 4.38: 5^η Εφαρμογή, (α) διαχωρισμός χερσαίας-υδάτινης επιφάνειας έπειτα από κατωφλίωση (δυαδική εικόνα), (β) αφαίρεση μικρών αντικειμένων της χερσαίας και της υδάτινης επιφάνειας, (γ) υπέρθεση ακτογραμμής στην αρχική απεικόνιση έπειτα από κατωφλίωση, (δ) εύρος ζώνης 15 εικονοστοιχείων στην ακτογραμμή που προκύπτει από την κατωφλίωση.

Όπως φαίνεται στην εικόνα 4.38(γ), η κατωφλίωση – εξετάζοντας μόνο τις τιμές φωτεινότητας των εικονοστοιχείων – δεν οδηγεί σε ορθά αποτελέσματα, καθώς η αληθής θέση της ακτογραμμής είναι το περίγραμμα μόνον του λιμένος και όχι των πλοίων. Γενικότερα, σε επίπεδο φωτοερμηνείας, η θέση της ακτογραμμής δεν κρίνεται σωστή – αυτό προκύπτει και από την επιλογή μεγάλου εύρους ζώνης – γεγονός το οποίο επιβεβαιώνεται και από τους δείκτες αξιολόγησης (πίνακας 4.11). Ως εκ τούτου, δεν αναμένονται ορθά αποτελέσματα στο τελικό εξαγόμενο προϊόν.

Το εύρος ζώνης τέθηκε στις εικόνες ακμών και που είχαν αρχικά υποστεί προεπεξεργασία με ALM 200 επαναλήψεων (εικόνες 4.35(β) και 4.36(β)). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στις εικόνες 4.39(α) και 4.39(β), αντίστοιχα. Και στις δύο περιπτώσεις ανίχνευσης ακμών (Canny, μορφολογικό Laplace), η εξαγόμενη ακτογραμμή προκύπτει, τελικά, χρησιμοποιώντας το μορφολογικό εργαλείο `bwareaopen`, αφαιρώντας τις μικρές εναπομείνουσες ακμές (εικόνες 4.39(γ) και 4.39(δ)).



Εικόνα 4.39: 5^η Εφαρμογή, υπέρθεση των ακμών εντός του εύρους ζώνης (εικόνα 4.38(δ)) στην αρχική απεικόνιση και τελική θέση ακτογραμμής, αντίστοιχα, έπειτα από προεπεξεργασία με ALM και ανίχνευση ακμών με τον (α), (γ) Canny και (β), (δ) μορφολογικό Laplace τελεστή.

Η τελική θέση της ακτογραμμής προέκυψε από την αρχική ανίχνευση ακμών με τους δύο τελεστές. Επειδή όπως σημειώθηκε παρουσιάζονται αρκετές ασυνέχειες, φαίνεται ότι το πρόβλημα αυτό επηρεάζει και την τελική θέση της ακτογραμμής (εικόνες 4.39(γ) και 4.39(δ)). Τα κενά αυτά οφείλονται στην αρχική ανίχνευση των ακμών από τους τελεστές, καθώς κάποια τμήματα της ακτογραμμής δεν είχαν ανιχνευτεί, και στη μετα-επεξεργασία της απεικόνισης – για να αφαιρεθούν οι εναπομείνουσες ακμές αφαιρέθηκαν και κάποια μικρά τμήματα της ακτογραμμής. Σημειώνεται ότι εάν είχε τεθεί μεγαλύτερο εύρος ζώνης ούτως ώστε να διατηρηθεί η αληθής θέση της ακτογραμμής – δηλαδή το περίγραμμα του λιμένος – θα υπήρχαν πολύ περισσότερες εναπομείνουσες ακμές και στη χερσαία και στην

υδάτινη επιφάνεια. Επίσης, παρατηρείται από την ανίχνευση των ακμών με το μορφολογικό Laplace τελεστή ότι αν και οι εναπομείνουσες ακμές είναι πολύ περισσότερες σε σχέση με τον Canny, ωστόσο η ανίχνευση του λιμένος είναι πιο επιτυχής – φωτοερμηνευτικά. Το βασικό πρόβλημα και σε αυτή την εφαρμογή, ανεξάρτητα από τον τελεστή, παραμένει η ανίχνευση των πλοίων, καθώς ο διαχωρισμός χερσαίας και υδάτινης επιφάνειας γίνεται σε επίπεδο “θάλασσας” και “μη θάλασσας”. Ως εκ τούτου, η επιλογή ενός μόνο κατωφλίου δεν είναι ορθή. Στην περίπτωση απαλοιφής περισσότερων ακμών, επομένως και πλοίων, θα αφαιρούνταν και μεγαλύτερα τμήματα ακτογραμμής – λόγω και της ασυνεχειάς της.

Στη συνέχεια παρατίθεται αξιολόγηση βάσει των κριτηρίων πληρότητας, ορθότητας και ποιότητας, για τρία προϊόντα ακτογραμμής: (α) ανίχνευση μόνο με τους τελεστές Canny και μορφολογικό Laplace, (β) εξαγωγή μόνο από κατωφλίωση ως το όριο των δύο κλάσεων, και (γ) εξαγωγή βάσει της μεθοδολογίας που περιγράφηκε στο διάγραμμα ροής του σχήματος 4.6, για την κατωφλίωση. Η σύγκριση πραγματοποιήθηκε για ζώνες εύρους 1, 3 και 5 εικονοστοιχείων, σε σχέση με την ψηφιοποιημένη ακτογραμμή αναφοράς.

		Εύρος ζώνης (εικονοστοιχεία)		
ΠΛΗΡΟΤΗΤΑ		1	3	5
ALM	Κατωφλίωση	0.17335	0.29772	0.40124
	Canny	0.62905	0.87687	0.93873
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.51531	0.79496	0.89684
	Μορφολογικό Laplace	0.6854	0.90502	0.95358
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.60553	0.84588	0.9139
		Εύρος ζώνης (εικονοστοιχεία)		
ΟΡΘΟΤΗΤΑ		1	3	5
ALM	Κατωφλίωση	0.14804	0.25631	0.34235
	Canny	0.57762	0.78116	0.84247
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.17203	0.28857	0.38471
	Μορφολογικό Laplace	0.51024	0.72844	0.80066
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.13813	0.25637	0.35238
		Εύρος ζώνης (εικονοστοιχεία)		
ΠΟΙΟΤΗΤΑ		1	3	5
ALM	Κατωφλίωση	0.086776	0.15973	0.22659
	Canny	0.43086	0.70394	0.79855
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.14807	0.26858	0.36841
	Μορφολογικό Laplace	0.41342	0.67671	0.77062
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.12673	0.24493	0.34105

Πίνακας 4.11: 5^η Εφαρμογή, αξιολόγηση ανίχνευσης ακτογραμμής με: κατωφλίωση, ανίχνευση ακμών με τον Canny και το μορφολογικό Laplace τελεστή και την υλοποιημένη μεθοδολογία.

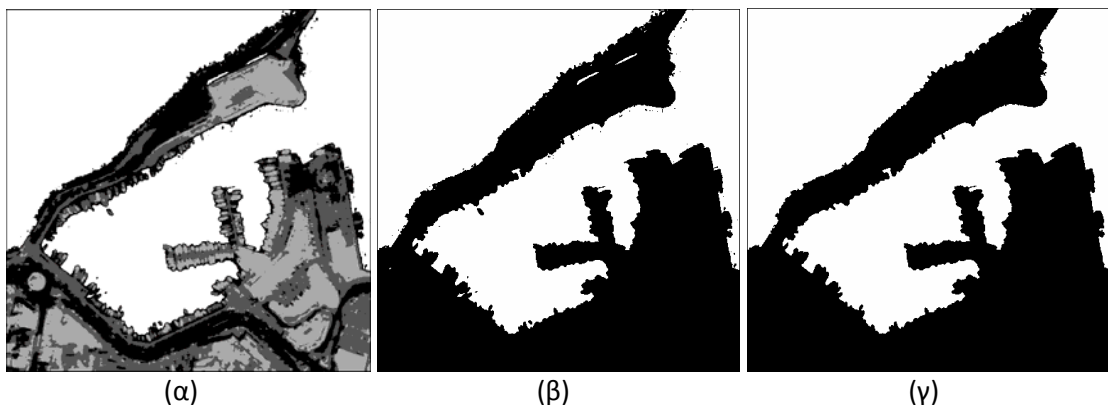
Με βάση τον παραπάνω πίνακα, παρατηρούνται τα εξής:

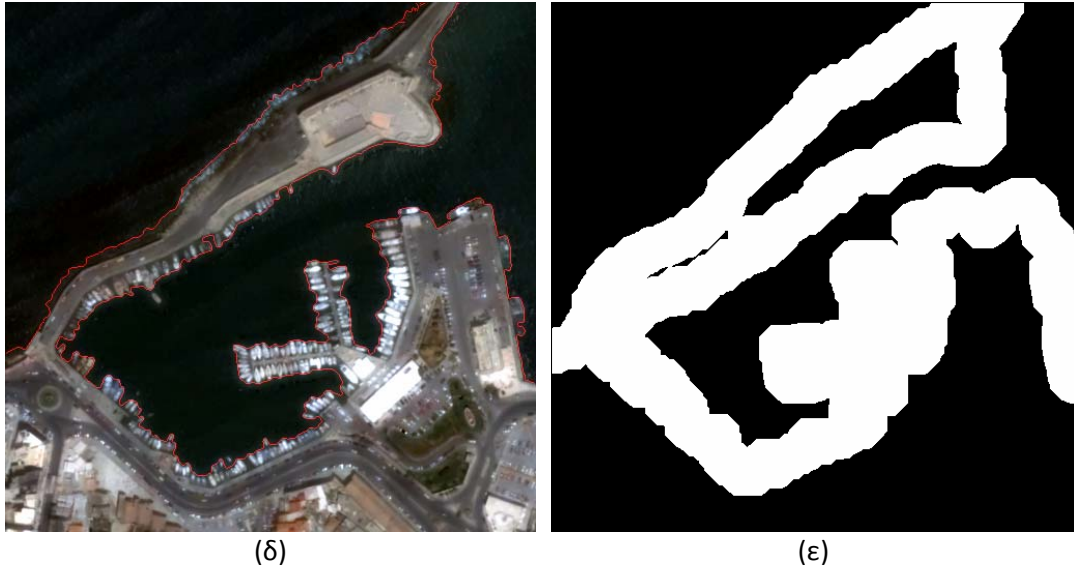
- Σε επίπεδο *πληρότητας*, η ανίχνευση των ακμών με το μορφολογικό Laplace τελεστή έχει καλύτερα αποτελέσματα από τον Canny. Ομοίως και για την υλοποιημένη μεθοδολογία, αν και **τα αποτελέσματα είναι μειωμένα, σε σχέση με την αρχική ανίχνευση. Αυτό οφείλεται κυρίως στην κατωφλίωση, η οποία δεν παρουσιάζει καλά αποτελέσματα.**
- Σε επίπεδα *ορθότητας* και *ποιότητας*, η ανίχνευση των ακμών με τον Canny έχει καλύτερα αποτελέσματα από το μορφολογικό Laplace τελεστή. Ομοίως και για την υλοποιημένη μεθοδολογία, αν και **τα αποτελέσματα είναι πολύ μειωμένα, σε σχέση με την αρχική ανίχνευση, και μη αποδεκτά. Αυτό οφείλεται κυρίως στην κατωφλίωση, η οποία δεν παρουσιάζει καλά αποτελέσματα.**
- Για εύρος ζώνης 1 εικονοστοιχείου οι δείκτες αξιολόγησης, συνολικά, δεν κυμαίνονται σε ικανοποιητικά επίπεδα (μ.ό. πληρότητας 52,2%, μ.ό ορθότητας 30,9%, μ.ό ποιότητας 24,1%). Η συγκεκριμένη απεικόνιση έχει διακριτική ικανότητα 0,6 m (rap-sharpened), και η δεδομένη ζώνη (3 εικονοστοιχεία $\rightarrow \pm 0,7m$) αντιστοιχεί σε κλίμακα χαρτογράφησης 1:4.500, περίπου.
- Ομοίως και για εύρος ζώνης 3 εικονοστοιχείων, κυρίως λόγω της κατωφλίωσης, εκτός της πληρότητας (μ.ό. πληρότητας 74,4%, μ.ό ορθότητας 46,2%, μ.ό ποιότητας 41,1%). Η δεδομένη ζώνη (5 εικονοστοιχεία $\rightarrow \pm 1,4m$) αντιστοιχεί σε κλίμακα χαρτογράφησης 1:7.000.
- Ομοίως και για εύρος ζώνης 5 εικονοστοιχείων, κυρίως λόγω της κατωφλίωσης, εκτός της πληρότητας (μ.ό. πληρότητας 82,1%, μ.ό ορθότητας 54,5%, μ.ό ποιότητας 50,1%). Η δεδομένη ζώνη (9 εικονοστοιχεία $\rightarrow \pm 2,8m$) αντιστοιχεί σε κλίμακα χαρτογράφησης 1:13.000, περίπου.

Σημειώνεται ότι η ακτογραμμή που ανιχνεύτηκε μόνο από τους τελεστές ανίχνευσης ακμών και χρησιμοποιείται στην αξιολόγηση, προέκυψε από τα δεδομένα αναφοράς με χρήση εύρους ζώνης 3 εικονοστοιχείων και μορφολογικών εργαλείων.

Συσταδοποίηση K-μέσου

Η συγκεκριμένη απεικόνιση κατηγοριοποιήθηκε σε τέσσερις κλάσεις (εικόνα 4.40(α)). Έπειτα από την απαλοιφή κάποιων μικρών αντικειμένων της χερσαίας και της υδάτινης επιφάνειας, προέκυψε ο τελικός διαχωρισμός της απεικόνισης σε δύο κλάσεις (εικόνα 4.40(γ)). Ομοίως με την κατωφλίωση, ανιχνεύτηκε η θέση της ακτογραμμής ως το όριο των δύο επιφανειών (εικόνα 4.40(δ)).

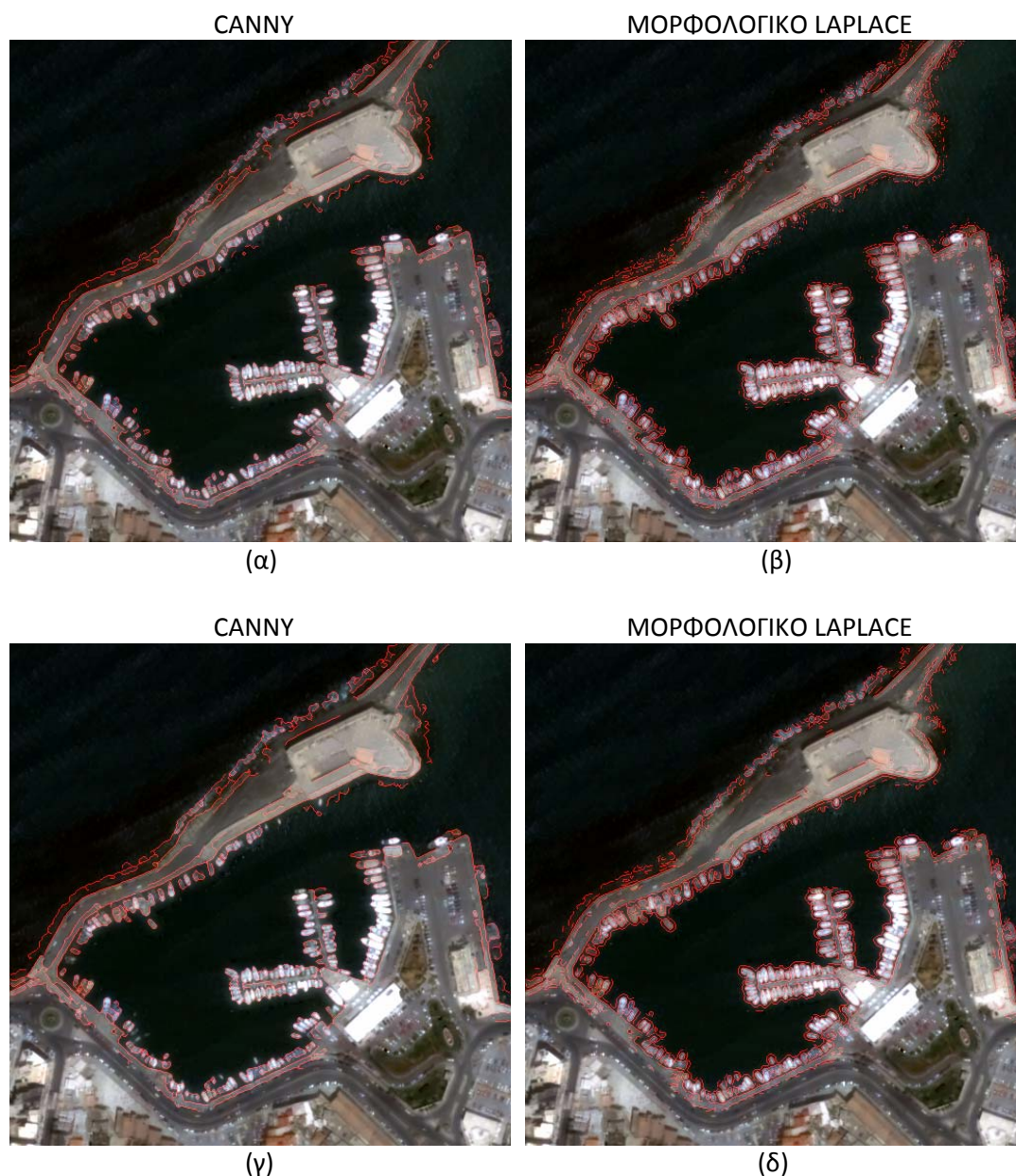




Εικόνα 4.40: 5^η Εφαρμογή, (α) συσταδοποίηση Κ-μέσου σε τέσσερις κλάσεις, (β) διαχωρισμός χερσαίας-υδάτινης επιφάνειας σε δύο κλάσεις, (γ) αφαίρεση μικρών αντικειμένων της χερσαίας και της υδάτινης επιφάνειας, (γ) υπέρθεση ακτογραμμής στην αρχική απεικόνιση έπειτα από συσταδοποίηση Κ-μέσου, (ε) εύρος ζώνης 20 εικονοστοιχείων στην ακτογραμμή που προκύπτει από τη συσταδοποίηση.

Όπως φαίνεται στην εικόνα 4.40(γ), η συσταδοποίηση – όπως και η κατωφλίωση – δεν οδηγεί σε ορθά αποτελέσματα, καθώς η αληθής θέση της ακτογραμμής είναι το περίγραμμα μόνον του λιμένος και όχι των πλοίων. Επιπλέον, η δημιουργία περισσότερων κλάσεων δεν ήταν επιτυχής, προκειμένου να διαχωριστεί η χερσαία επιφάνεια από τα πλοία, κι όχι η “θάλασσα” από τη “μη θάλασσα”. Στην περίπτωση που τα πλοία κατηγοριοποιούνταν σε διαφορετική κλάση από την υπόλοιπη χερσαία επιφάνεια, θα ήταν δυνατή η αφαίρεσή τους. Γενικότερα, σε επίπεδο φωτοερμηνείας, η θέση της ακτογραμμής δεν κρίνεται σωστή, γεγονός το οποίο επιβεβαιώνεται και από τους δείκτες αξιολόγησης (πίνακας 4.12), και δεν αναμένονται ορθά αποτελέσματα στο τελικό εξαγόμενο προϊόν.

Στην ακτογραμμή που προέκυψε ως το όριο των δύο κλάσεων τέθηκε ένα εύρος ζώνης 20 εικονοστοιχείων (εικόνα 4.40(ε)), με σκοπό την αφαίρεση ανεπιθύμητων ακμών. Το εύρος ζώνης τέθηκε στις εικόνες ακμών και που είχαν αρχικά υποστεί προ-επεξεργασία με ALM 200 επαναλήψεων (εικόνες 4.35(β) και 4.36(β)). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στις εικόνες 4.41(α) και 4.41(β), αντίστοιχα. Στην περίπτωση ανίχνευσης ακμών με τον Canny, η εξαγόμενη ακτογραμμή προκύπτει, τελικά, χρησιμοποιώντας τα μορφολογικά εργαλεία `bwareaopen` και `bwmorph` (`bridge`) (`bwareaopen` → `bwmorph` → `bwareaopen`), αφαιρώντας τις μικρές εναπομείνουσες ακμές (εικόνα 4.41(γ)). Στην περίπτωση ανίχνευσης ακμών με το μορφολογικό Laplace τελεστή, η εξαγόμενη ακτογραμμή προκύπτει, τελικά, χρησιμοποιώντας μόνο το μορφολογικό εργαλείο `bwareaopen` (εικόνα 4.41(δ)).



Εικόνα 4.41: 5^η Εφαρμογή, υπέρθεση των ακμών εντός του εύρους ζώνης (εικόνα 4.40(ε)) στην αρχική απεικόνιση και τελική θέση ακτογραμμής, αντίστοιχα, έπειτα από προ-επεξεργασία με ALM και ανίχνευση ακμών με τον (α), (γ) Canny και (β), (δ) μορφολογικό Laplace τελεστή.

Η τελική θέση της ακτογραμμής προέκυψε από την αρχική ανίχνευση ακμών με τους δύο τελεστές. Επειδή όπως σημειώθηκε παρουσιάζονται αρκετές ασυνέχειες, φαίνεται ότι το πρόβλημα αυτό επηρεάζει και την τελική θέση της ακτογραμμής (εικόνες 4.41(γ) και 4.41(δ)). Όπως και στην κατωφλίωση, τα κενά αυτά οφείλονται στην αρχική ανίχνευση των ακμών από τους τελεστές, καθώς κάποια τμήματα της ακτογραμμής δεν είχαν ανιχνευτεί, και στη μετα-επεξεργασία της απεικόνισης – για να αφαιρεθούν οι εναπομείνουσες ακμές αφαιρέθηκαν και κάποια μικρά τμήματα της ακτογραμμής. Σημειώνεται ότι εάν είχε τεθεί μεγαλύτερο εύρος ζώνης ούτως ώστε να διατηρηθεί η αληθής θέση της ακτογραμμής – δηλαδή το περίγραμμα του λιμένος – θα υπήρχαν πολύ περισσότερες εναπομείνουσες ακμές και στη

χερσαία και στην υδάτινη επιφάνεια. Επίσης, παρατηρείται από την ανίχνευση των ακμών με το μορφολογικό Laplace τελεστή ότι αν και οι εναπομείνουσες ακμές είναι πολύ περισσότερες σε σχέση με τον Canny, ωστόσο η ανίχνευση του λιμένου είναι πιο επιτυχής – φωτοερμηνευτικά. Το βασικό πρόβλημα και σε αυτή την εφαρμογή, ανεξάρτητα από τον τελεστή, παραμένει η ανίχνευση των πλοίων, καθώς ο διαχωρισμός χερσαίας και υδάτινης επιφάνειας γίνεται σε επίπεδο “θάλασσας” και “μη θάλασσας”. Στην περίπτωση απαλοιφής περισσότερων ακμών, επομένως και πλοίων, θα αφαιρούνταν και μεγαλύτερα τμήματα ακτογραμμής – λόγω και της ασυνέχειάς της.

Στη συνέχεια παρατίθεται αξιολόγηση βάσει των κριτηρίων πληρότητας, ορθότητας και ποιότητας, για τρία προϊόντα ακτογραμμής: (α) ανίχνευση μόνο με τους τελεστές Canny και μορφολογικό Laplace, (β) εξαγωγή μόνο από συσταδοποίηση K-μέσου ως το όριο των δύο κλάσεων, και (γ) εξαγωγή βάσει της μεθοδολογίας που περιγράφηκε στο διάγραμμα ροής του σχήματος 4.6, για τη συσταδοποίηση. Η σύγκριση πραγματοποιήθηκε για ζώνες εύρους 1, 3 και 5 εικονοστοιχείων, σε σχέση με την ψηφιοποιημένη ακτογραμμή αναφοράς.

		Εύρος ζώνης (εικονοστοιχεία)		
ΠΛΗΡΟΤΗΤΑ		1	3	5
ALM	Συσταδοποίηση K-μέσου	0.17586	0.30682	0.41476
	Canny	0.62905	0.87687	0.93873
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.57536	0.85558	0.94887
	Μορφολογικό Laplace	0.6854	0.90502	0.95358
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.6505	0.90529	0.96463
		Εύρος ζώνης (εικονοστοιχεία)		
ΟΡΘΟΤΗΤΑ		1	3	5
ALM	Συσταδοποίηση K-μέσου	0.14842	0.25978	0.34836
	Canny	0.57762	0.78116	0.84247
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.1671	0.27528	0.36482
	Μορφολογικό Laplace	0.51024	0.72844	0.80066
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.13201	0.24251	0.33012
		Εύρος ζώνης (εικονοστοιχεία)		
ΠΟΙΟΤΗΤΑ		1	3	5
ALM	Συσταδοποίηση K-μέσου	0.087536	0.1637	0.23356
	Canny	0.43086	0.70394	0.79855
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.14875	0.26306	0.35779
	Μορφολογικό Laplace	0.41342	0.67671	0.77062
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.12327	0.23651	0.32617

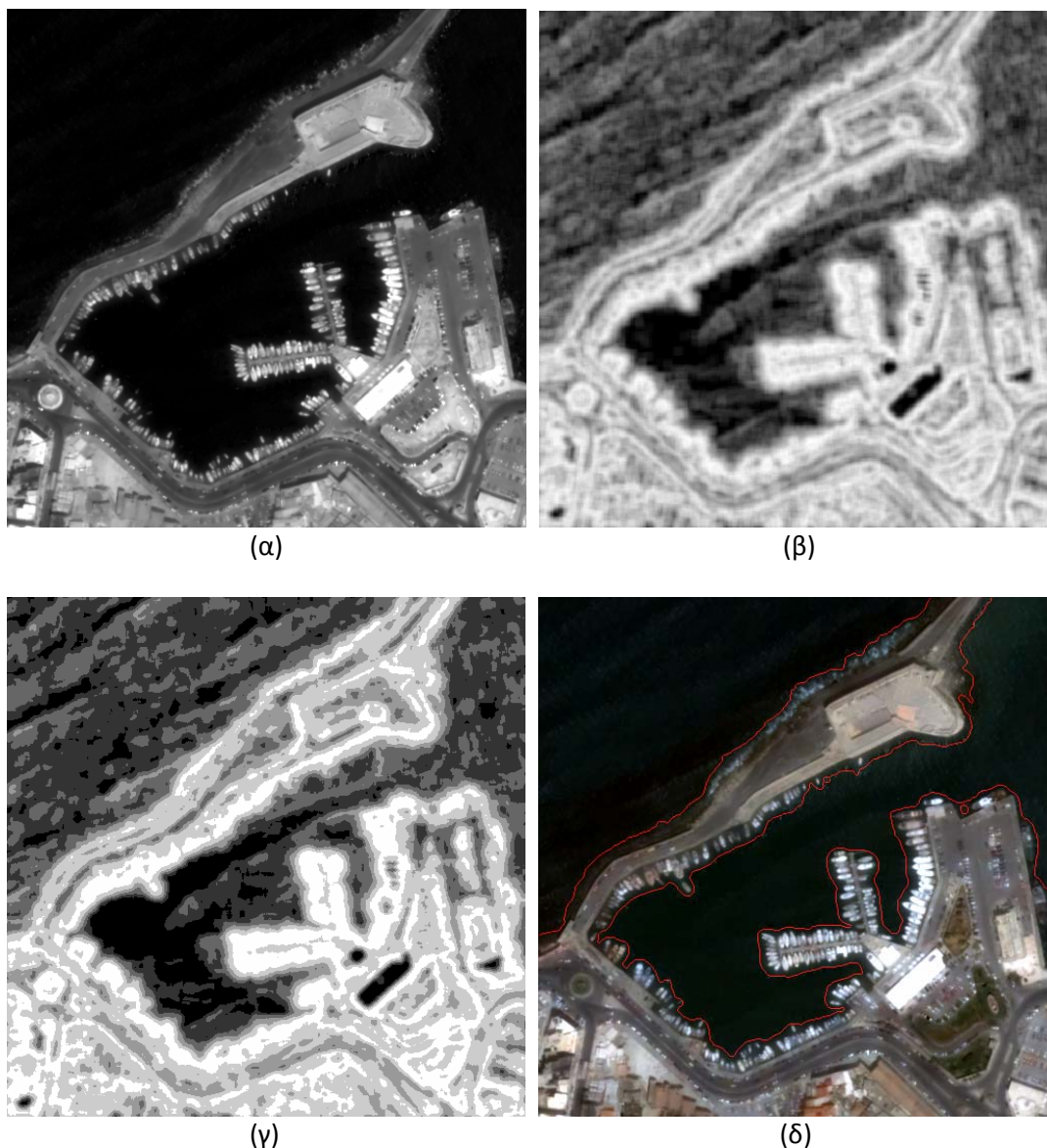
Πίνακας 4.12: 5^η Εφαρμογή, αξιολόγηση ανίχνευσης ακτογραμμής με: συσταδοποίηση K-μέσου, ανίχνευση ακμών με τον Canny και το μορφολογικό Laplace τελεστή και την υλοποιημένη μεθοδολογία.

Με βάση τον παραπάνω πίνακα, οι παρατηρήσεις είναι ίδιες με την κατωφλίωση:

- Σε επίπεδο *πληρότητας*, η ανίχνευση των ακμών με το μορφολογικό Laplace τελεστή έχει καλύτερα αποτελέσματα από τον Canny. Ομοίως και για την υλοποιημένη μεθοδολογία, αν και **τα αποτελέσματα είναι μειωμένα, σε σχέση με την αρχική ανίχνευση. Αυτό οφείλεται κυρίως στη συσταδοποίηση, η οποία δεν παρουσιάζει καλά αποτελέσματα.**
- Σε επίπεδα *ορθότητας* και *ποιότητας*, η ανίχνευση των ακμών με τον Canny έχει καλύτερα αποτελέσματα από το μορφολογικό Laplace τελεστή. Ομοίως και για την υλοποιημένη μεθοδολογία, αν και **τα αποτελέσματα είναι πολύ μειωμένα, σε σχέση με την αρχική ανίχνευση, και μη αποδεκτά. Αυτό οφείλεται κυρίως στη συσταδοποίηση, η οποία δεν παρουσιάζει καλά αποτελέσματα.**
- Για εύρος ζώνης 1 εικονοστοιχείου οι δείκτες αξιολόγησης, συνολικά, δεν κυμαίνονται σε ικανοποιητικά επίπεδα (μ.ό. πληρότητας 54,3%, μ.ό ορθότητας 30,7%, μ.ό ποιότητας 24,1%).
- Ομοίως και για εύρος ζώνης 3 εικονοστοιχείων, κυρίως λόγω της συσταδοποίησης, εκτός της πληρότητας (μ.ό. πληρότητας 77%, μ.ό ορθότητας 45,7%, μ.ό ποιότητας 40,9%).
- Ομοίως και για εύρος ζώνης 5 εικονοστοιχείων, κυρίως λόγω της συσταδοποίησης, εκτός της πληρότητας (μ.ό. πληρότητας 84,4%, μ.ό ορθότητας 53,7%, μ.ό ποιότητας 49,7%).

Εντροπία

Στη συγκεκριμένη απεικόνιση, η μέτρηση της εντροπίας με χρήση της πολυεπίπεδης κατωφλίωσης δεν έχει καλά αποτελέσματα. Στις εικόνες που επισυνάπτονται παρουσιάζεται και η εξαγωγή της ακτογραμμής έπειτα από μορφολογική επεξεργασία του προϊόντος της πολυεπίπεδης κατωφλίωσης. Έπειτα από πολλές δοκιμές προέκυψε ότι η ορθότερη κατωφλίωση ήταν έξι επιπέδων. Φαίνεται ότι δεν εντοπίζεται σωστά η ακτογραμμή, ούτε όσον αφορά στο περίγραμμα του λιμένος ούτε στο όριο χερσαίας και υδάτινης επιφάνειας. Σημειώνεται ότι η εξαγωγή της ακτογραμμής με συγχώνευση πληροφορίας (fusion) είναι πολύ πιθανό να δίνει πολύ καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με την πολυεπίπεδη κατωφλίωση.



Εικόνα 4.42: 5^η Εφαρμογή, (α) απεικόνιση QUICKBIRD στο εγγύς υπέρυθρο κανάλι, (β) ανάλυση υφής με μέτρηση της εντροπίας, (γ) κατωφλίωση έξι επιπέδων στην εικόνα υφής, (δ) υπέρρθεση ακτογραμμής στην αρχική απεικόνιση έπειτα από μέτρηση της εντροπίας.

Η ακαταλληλότητα της τεχνικής παρουσιάζεται στις παρακάτω εικόνες και στον πίνακα 4.13, έπειτα από εφαρμογή της υλοποιημένης μεθοδολογίας για τους δυο τελεστές ανίχνευσης ακμών. Η τελική θέση της ακτογραμμής προκύπτει από αυτούς, με χρήση εύρους ζώνης 25 εικονοστοιχείων, με σκοπό την αφαίρεση ανεπιθύμητων ακμών. Το εύρος ζώνης τέθηκε στις εικόνες ακμών που είχαν αρχικά υποστεί προ-επεξεργασία με ALM 200 επαναλήψεων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στις εικόνες 4.43(α) και 4.43(β), αντίστοιχα. Και στις δύο περιπτώσεις ανίχνευσης ακμών η εξαγόμενη ακτογραμμή προκύπτει, τελικά, χρησιμοποιώντας το μορφολογικό εργαλείο bwareaopen, αφαιρώντας τις εναπομείνουσες ακμές (εικόνες 4.43(γ) και 4.43(δ)).

		Εύρος ζώνης (εικονοστοιχεία)		
ΠΛΗΡΟΤΗΤΑ		1	3	5
ALM	Μέτρηση Εντροπίας	0.011241	0.051125	0.11711
	Canny	0.62905	0.87687	0.93873
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.55021	0.83113	0.91865
	Μορφολογικό Laplace	0.6854	0.90502	0.95358
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.62091	0.86811	0.93121
		Εύρος ζώνης (εικονοστοιχεία)		
ΟΡΘΟΤΗΤΑ		1	3	5
ALM	Μέτρηση Εντροπίας	0.011113	0.050392	0.11347
	Canny	0.57762	0.78116	0.84247
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.16527	0.27238	0.36166
	Μορφολογικό Laplace	0.51024	0.72844	0.80066
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.13381	0.24746	0.33902
		Εύρος ζώνης (εικονοστοιχεία)		
ΠΟΙΟΤΗΤΑ		1	3	5
ALM	Μέτρηση Εντροπίας	0.0056196	0.026039	0.061155
	Canny	0.43086	0.70394	0.79855
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.1456	0.25809	0.35044
	Μορφολογικό Laplace	0.41342	0.67671	0.77062
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.1237	0.23849	0.33074

Πίνακας 4.13: 5^η Εφαρμογή, αξιολόγηση ανίχνευσης ακτογραμμής με: μέτρηση εντροπίας, ανίχνευση ακμών με τον Canny και το μορφολογικό Laplace τελεστή και την υλοποιημένη μεθοδολογία.

Με βάση τον παραπάνω πίνακα, οι παρατηρήσεις είναι ίδιες με την κατωφλίωση και τη συσταδοποίηση K-μέσου:

- Σε επίπεδο **πληρότητας**, η ανίχνευση των ακμών με το μορφολογικό Laplace τελεστή έχει καλύτερα αποτελέσματα από τον Canny. Ομοίως και για την υλοποιημένη μεθοδολογία, αν και **τα αποτελέσματα είναι μειωμένα, σε σχέση με την αρχική ανίχνευση. Αυτό οφείλεται κυρίως στην εντροπία, η οποία δεν παρουσιάζει καλά αποτελέσματα.**
- Σε επίπεδα **ορθότητας** και **ποιότητας**, η ανίχνευση των ακμών με τον Canny έχει καλύτερα αποτελέσματα από το μορφολογικό Laplace τελεστή. Ομοίως και για την υλοποιημένη μεθοδολογία, αν και **τα αποτελέσματα είναι πολύ μειωμένα, σε σχέση με την αρχική ανίχνευση, και μη αποδεκτά. Αυτό οφείλεται κυρίως στην εντροπία, η οποία δεν παρουσιάζει καλά αποτελέσματα.**
- Για εύρος ζώνης **1** **εικονοστοιχείου** οι δείκτες αξιολόγησης, συνολικά, δεν κυμαίνονται σε ικανοποιητικά επίπεδα (μ.ό. πληρότητας 49,9%, μ.ό ορθότητας 28%, μ.ό ποιότητας 22,4%).

- **Ομοίως και για εύρος ζώνης 3 εικονοστοιχείων, κυρίως λόγω της εντροπίας, εκτός της πληρότητας** (μ.ό. πληρότητας 70,6%, μ.ό ορθότητας 41,6%, μ.ό ποιότητας 38,1%).
- **Ομοίως και για εύρος ζώνης 5 εικονοστοιχείων, κυρίως λόγω της εντροπίας, εκτός της πληρότητας** (μ.ό. πληρότητας 77,2%, μ.ό ορθότητας 49,1%, μ.ό ποιότητας 46,2%).

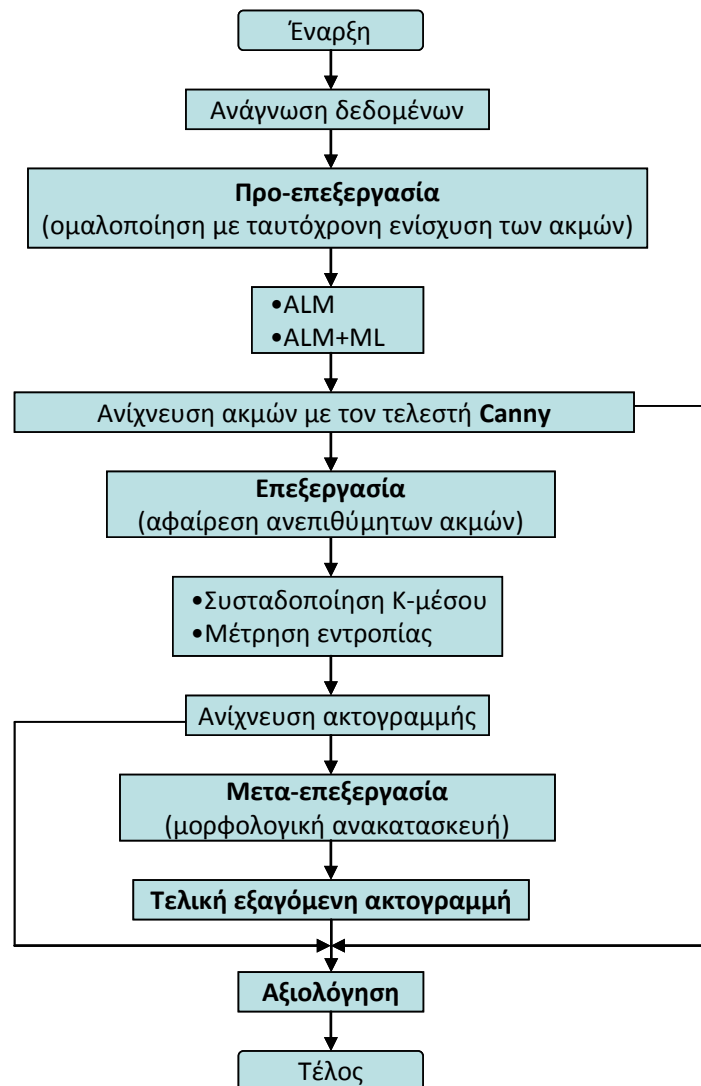
Συνοψίζοντας:

- Οι ακμές που ανιχνεύονται «υποφέρουν» από κενά και ασυνέχειες, το οποίο επηρεάζει αρνητικά την τελική εξαγωγή της ακτογραμμής. Παράλληλα, εξαρτώνται άμεσα από την ποιότητα και τη δυσκολία της απεικόνισης (π.χ. θόρυβος, βράχια, λιμένας).
- Η κατωφλίωση στο υπέρυθρο κανάλι, αν και αποτελεί ενδεδειγμένη τεχνική, ωστόσο είναι πολύ χρονοβόρα όσον αφορά στην επιλογή του κατάλληλου κατωφλίου.
- Σε επίπεδο πληρότητας, η ανίχνευση των ακμών με το μορφολογικό Laplace τελεστή παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα από τον Canny. Το αντίθετο ισχύει βάσει των κριτηρίων ορθότητας και ολικής ποιότητας των ακμών. Φωτοερμηνευτικά παρατηρείται ότι αν και με το μορφολογικό Laplace τελεστή οι εναπομείνουσες ακμές είναι πολύ περισσότερες σε σχέση με τον Canny, ωστόσο η ανίχνευση του λιμένος είναι πιο επιτυχής. Γενικότερα, **η ανίχνευση των ακμών με τον Canny παρουσιάζει καλύτερα ποσοστά ορθότητας και ολικής ποιότητας. Επομένως, καταλληλότερος τελεστής ανίχνευσης ακμών κρίνεται ο Canny.**
- Η κατωφλίωση δεν υπερέχει – βάσει των κριτηρίων αξιολόγησης – της συσταδοποίησης K-μέσου σε τέσσερις κλάσεις, και στις περισσότερες περιπτώσεις υστερεί αυτής – και σε ότι αφορά την υλοποιημένη μεθοδολογία. Ωστόσο, **ο υλοποιημένος αλγόριθμος δεν έχει ενθαρρυντικά αποτελέσματα για δύο λόγους. Αφενός, η συγκεκριμένη απεικόνιση παρουσιάζει έντονες δυσκολίες λόγω της παρουσίας του λιμένος, αφετέρου τόσο η κατωφλίωση όσο και η συσταδοποίηση δεν είχαν αποδεκτά αποτελέσματα.** Παρόλα αυτά, είναι ενθαρρυντικό το γεγονός ότι ο υλοποιημένος αλγόριθμος συσταδοποίησης είχε τα ίδια αποτελέσματα με την κατωφλίωση, η οποία ενδείκνυται για το διαχωρισμό χερσαίων και υδάτινων περιοχών.
- Αν και η μέτρηση της εντροπίας δεν είχε καλά αποτελέσματα, κατά την υλοποιημένη μεθοδολογία οι δείκτες αξιολόγησης βρίσκονται στα ίδια επίπεδα με τις άλλες δύο τεχνικές επεξεργασίας. Αυτό συμβαίνει γιατί η εξαγόμενη από την εντροπία ακτογραμμή φέρει τα ίδια σφάλματα.
- Η τελική εξαγωγή της ακτογραμμής εξαρτάται – εκτός από την αρχική ανίχνευση των ακμών – και από την τεχνική επεξεργασίας και τα μορφολογικά εργαλεία που επιλέγονται για την ανακατασκευή της – συμπεριλαμβανομένου και του εύρους ζώνης.
- Η αξιολόγηση της εξαγόμενης ακτογραμμής εξαρτάται άμεσα από την ορθότητα της ψηφιοποίησης των δεδομένων αναφοράς, καθώς και από τη μετατροπή τους σε ψηφιδωτά δεδομένα. Στη συγκεκριμένη απεικόνιση, επειδή η

επαναφορά της στις αρχικές της διαστάσεις έγινε από μεγαλύτερης διάστασης εικόνα, παρουσιάστηκαν κενά στην ακτογραμμή αναφοράς.

- Η υλοποιημένη μεθοδολογία απαιτείται βελτίωσης προκειμένου να εφαρμοστεί σε δεδομένα ιδιαίτερης δυσκολίας, όπως λιμένες, ενδεχομένως με χρήση συστημάτων ανθρώπινης γνώσης. Ως εκ τούτου, δεν προτείνεται για τη χαρτογράφησή τους.

4.6 6^η Εφαρμογή – Περιοχή: Oman (WORLDVIEW-2)



Σχήμα 4.7: 6^η Εφαρμογή, διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε, με σκοπό τη διερεύνηση ανίχνευσης ακτογραμμής με προηγμένες τεχνικές ομαλοποίησης και τον τελεστή Canny.

Όπως παρουσιάστηκε στο προηγούμενο εδάφιο, οι πιο αποτελεσματικές τεχνικές (από αυτές που εξετάστηκαν και για τις συγκεκριμένες εφαρμογές) ομαλοποίησης με ταυτόχρονη ενίσχυση των ακμών είναι η ανισοτροπική διάχυση ALM, καθώς και ο συνδυασμός της με ένα μικρό αριθμό επαναλήψεων μορφολογικής εξομάλυνσης.

Κατά την εφαρμογή της ALM παρατηρήθηκε ότι τα καλύτερα αποτελέσματα δίνονται έπειτα από 300 επαναλήψεις. Η ανίχνευση των ακμών έγινε με τον βέλτιστο τελεστή Canny. Ωστόσο, όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.44(β), οι ακμές δεν είναι συνεχείς και αυτό αναδεικνύεται και στις υπόλοιπες τεχνικές, δημιουργώντας περαιτέρω προβλήματα. Επιπλέον, και η παρουσία βραχωδών σημείων στο πέρας της χερσαίας επιφάνειας δυσχεραίνει τη συνέχεια των ακμών.



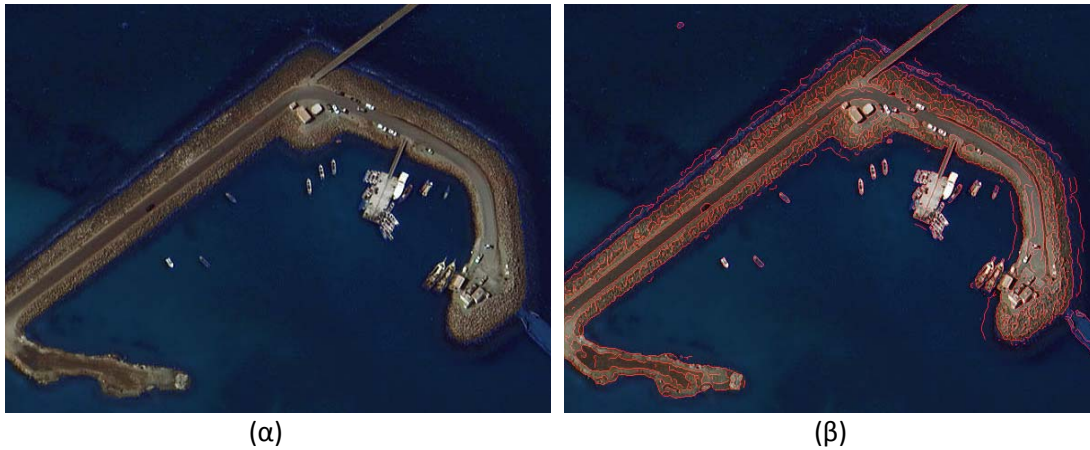
(α)

(β)

Εικόνα 4.44: 6^η Εφαρμογή, (α) απεικόνιση WORLDVIEW-2 στο φυσικό έγχρωμο σύνθετο, (β) ανισοτροπική διάχυση ALM 300 επαναλήψεων και ανίχνευση ακμών με τον Canny.

Σημειώνεται ότι η ορθή θέση της ακτογραμμής δεν περιλαμβάνει το περίγραμμα των πλοίων που βρίσκονται στο λιμάνι, αλλά μόνο την χερσαία επιφάνεια. Ωστόσο, παρατηρούνται ασυνέχειες στην ανίχνευσή της με τον Canny.

Ο δεύτερος αλγόριθμος που υλοποιήθηκε περιλαμβάνει λίγες επαναλήψεις μορφολογικής εξομάλυνσης επικουρικά στην ενίσχυση των ακμών με την ALM, επιτυγχάνοντας μεγαλύτερη ομαλοποίηση κι επομένως απαλείφοντας κάποιες ανεπιθύμητες ακμές. Στην εικόνα 4.45(β) φαίνεται ότι πράγματι η χερσαία επιφάνεια είναι πιο ομαλοποιημένη. Η περιοχή που ιδιαίτερα ενδιαφέρει είναι κοντά στην ακτογραμμή, προκειμένου να απλοποιηθεί η ανίχνευσή της. Έπειτα από πληθώρα συνδυασμών, τα καλύτερα αποτελέσματα δόθηκαν έπειτα από 300 επαναλήψεις ALM και 5 επαναλήψεις ML. Τα προβλήματα που ανέκυψαν είναι τα ίδια με αυτά που παρουσιάστηκαν για την ALM.



Εικόνα 4.45: 6^η Εφαρμογή, (α) απεικόνιση WORLDVIEW-2 στο φυσικό έγχρωμο σύνθετο, (β) ανισοτροπική διάχυση ALM 300 επαναλήψεων, μορφολογική εξομάλυνση ML 5 επαναλήψεων και ανίχνευση ακμών με τον Canny.

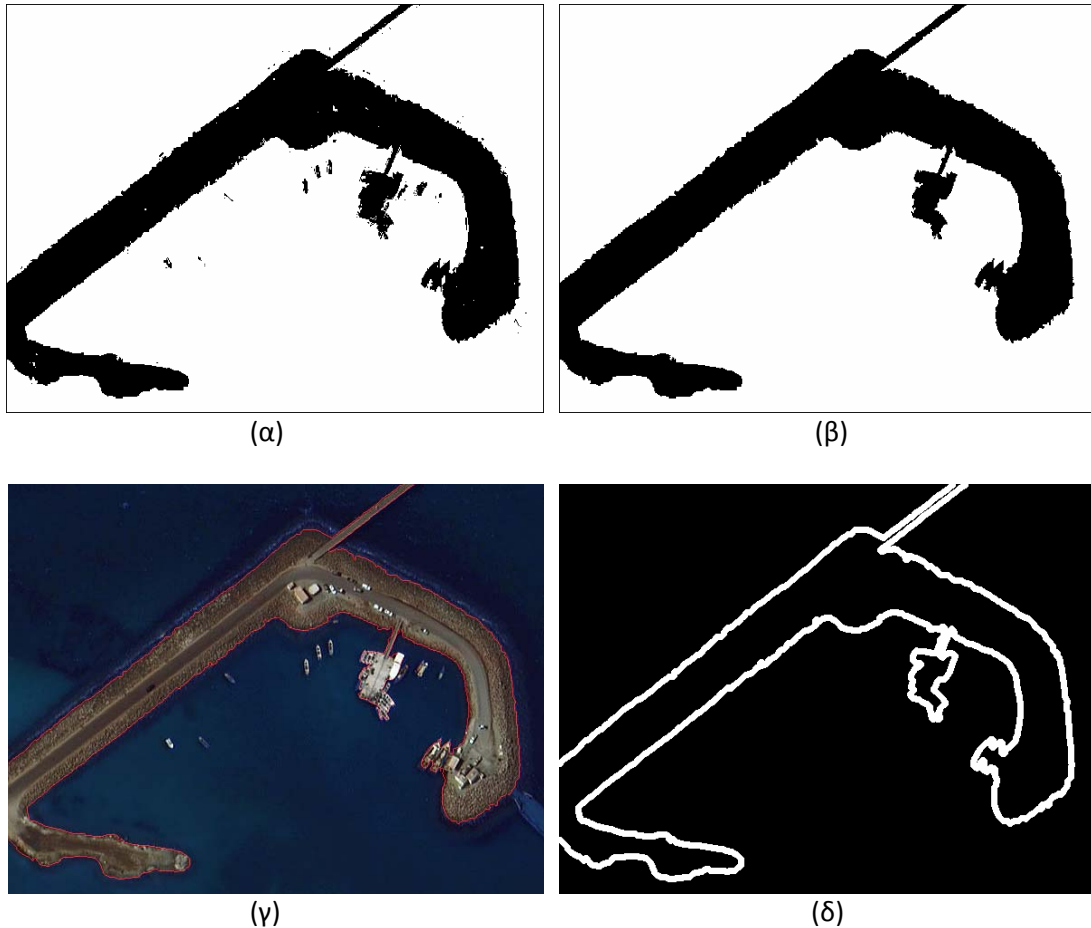
Συνοψίζοντας, τα βασικά προβλήματα που αναδείχτηκαν και παρουσιάστηκαν κατά την ανίχνευση ακμών ήταν τα εξής:

- (α) δυσκολία απεικόνισης (βράχια, λιμένας).
- (β) ασυνέχεια ακμών.

Για την αφαίρεση των ανεπιθύμητων ακμών χρησιμοποιήθηκαν: (α) συσταδοποίηση K-μέσου, και (β) μέτρηση της εντροπίας. Στη συνέχεια επισυνάπτονται και αναλύονται οι παράμετροι της εκάστοτε τεχνικής, καθώς και τα αποτελέσματα που προέκυψαν. **Σημειώνεται ότι τόσο για την 6^η όσο και για την 7^η εφαρμογή χρησιμοποιήθηκε το κόκκινο κανάλι – λόγω της χαμηλής ανακλαστικότητας του νερού σε σχέση με το μπλε και το πράσινο κανάλι (σχήμα 3.15). Επιπλέον, αν και αποτελούν τμήματα της ίδιας απεικόνισης, ωστόσο χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές τεχνικές και παράμετροι αυτών, λόγω προγραμματιστικής δυσκολίας.**

Συσταδοποίηση K-μέσου

Η συγκεκριμένη απεικόνιση κατηγοριοποιήθηκε σε δύο κλάσεις (εικόνα 4.46(α)). Έπειτα από την απαλοιφή κάποιων μικρών αντικειμένων της χερσαίας και της υδάτινης επιφάνειας, προέκυψε ο τελικός διαχωρισμός της απεικόνισης σε δύο κλάσεις (εικόνα 4.46(β)), και η ανίχνευση της θέσης της ακτογραμμής ως το όριο των δύο επιφανειών (εικόνα 4.46(γ)).

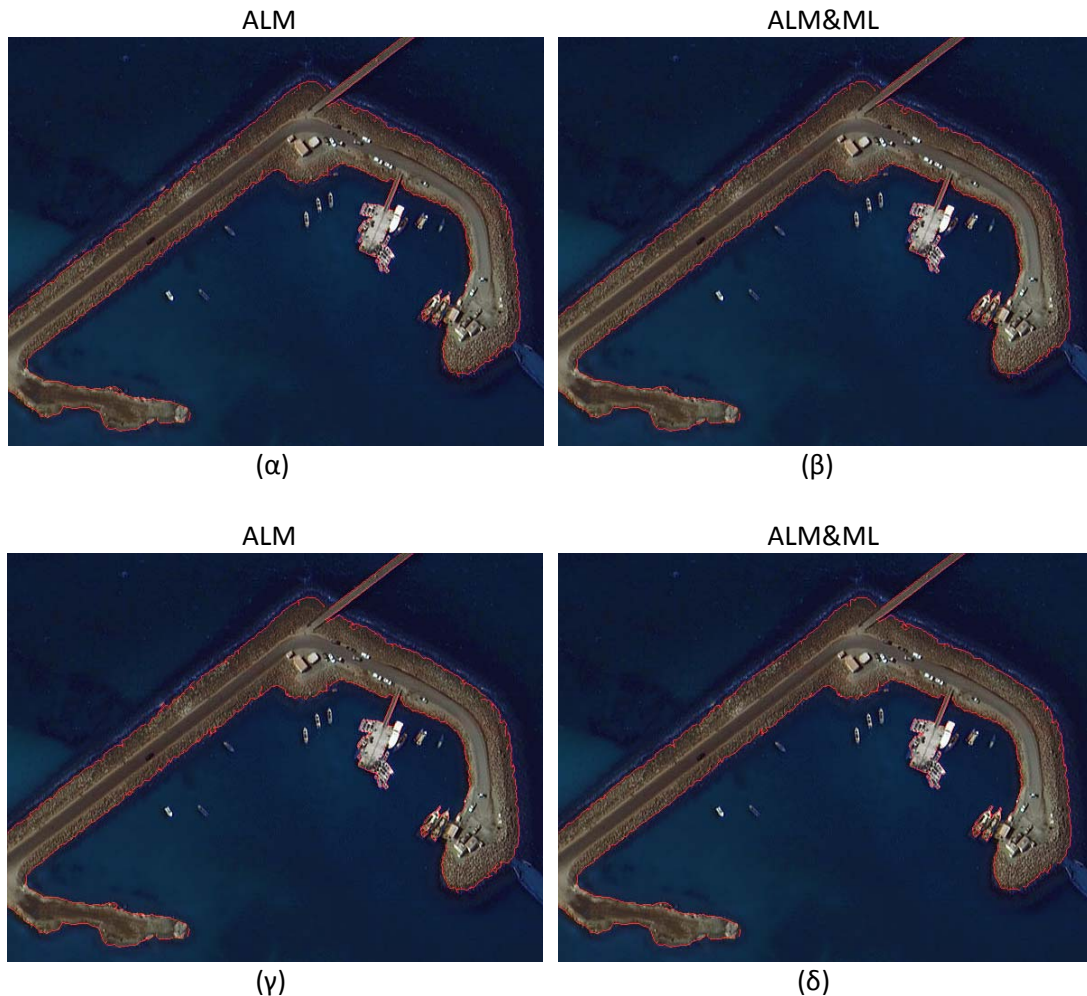


Εικόνα 4.46: 6^η Εφαρμογή, (α) συσταδοποίηση Κ-μέσου σε δυο κλάσεις, (β) αφαίρεση μικρών αντικειμένων της χερσαίας και της υδάτινης επιφάνειας, (γ) υπέρθεση ακτογραμμής στην αρχική απεικόνιση έπειτα από συσταδοποίηση Κ-μέσου, (δ) εύρος ζώνης 4 εικονοστοιχείων στην ακτογραμμή που προκύπτει από τη συσταδοποίηση.

Όπως φαίνεται στην εικόνα 4.46(γ), η συσταδοποίηση υστερεί στην ανίχνευση του λιμένος, καθώς η αληθής θέση της ακτογραμμής είναι το περίγραμμα μόνον αυτού και όχι των πλοίων. Επιπλέον, η δημιουργία περισσότερων κλάσεων δεν ήταν επιτυχής, προκειμένου να διαχωριστεί η χερσαία επιφάνεια από τα πλοία, κι όχι η “θάλασσα” από τη “μη θάλασσα”. Γενικότερα, σε επίπεδο φωτοερμηνείας, η θέση της ακτογραμμής κρίνεται σωστή, γεγονός το οποίο επιβεβαιώνεται και από τους δείκτες αξιολόγησης (πίνακας 4.14).

Στην ακτογραμμή που προέκυψε ως το όριο των δύο κλάσεων τέθηκε ένα εύρος ζώνης 4 εικονοστοιχείων και για τις δυο μεθόδους προ-επεξεργασίας (εικόνα 4.46(δ)), με σκοπό την αφαίρεση ανεπιθύμητων ακμών. Το εύρος ζώνης τέθηκε στις εικόνες ακμών και που είχαν αρχικά υποστεί προ-επεξεργασία με: (α) ALM 300 επαναλήψεων (εικόνα 4.44(β)), και (β) ALM 300 επαναλήψεων συνδυαστικά με ML 5 επαναλήψεων (εικόνα 4.45(β)). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στις εικόνες 4.47(α) και 4.47(β), αντίστοιχα. Στην περίπτωση προ-επεξεργασίας με ALM, η εξαγόμενη ακτογραμμή προκύπτει, τελικά, χρησιμοποιώντας τα μορφολογικά εργαλεία `bwareaopen` και `bwmorph` (`bridge`) (`bwareaopen`→`bwmorph`→`bwareaopen`), αφαιρώντας τις μικρές εναπομείνουσες ακμές (εικόνα 4.47(γ)). Στην

περίπτωση προ-επεξεργασίας με ALM και ML, η εξαγόμενη ακτογραμμή προκύπτει, τελικά, χρησιμοποιώντας τα μορφολογικά εργαλεία (bwareaopen → bwtoprph) (εικόνα 4.47(δ)).



Εικόνα 4.47: 6^η Εφαρμογή, υπέρθεση των ακμών εντός του εύρους ζώνης (εικόνα 4.46(δ)) στην αρχική απεικόνιση και τελική θέση ακτογραμμής, αντίστοιχα, έπειτα από προ-επεξεργασία με (α), (γ) ALM και (β), (δ) ALM συνδυαστικά με ML.

Η τελική θέση της ακτογραμμής προέκυψε από την αρχική ανίχνευση ακμών με τον τελεστή Canny. Σε επίπεδο φωτοερμηνείας για τις δύο μεθόδους προ-επεξεργασίας, δεν παρατηρούνται έντονες διαφορές. Επιπλέον, όπως σημειώθηκε, παρουσιάζονται λίγες ασυνέχειες (εικόνες 4.47(γ) και 4.47(δ)). Τα κενά αυτά οφείλονται στην αρχική ανίχνευση των ακμών από τον Canny, καθώς κάποια τμήματα της ακτογραμμής δεν είχαν ανιχνευτεί. Το βασικό πρόβλημα και σε αυτή την εφαρμογή, παραμένει η ανίχνευση των πλοίων, καθώς ο διαχωρισμός χερσαίας και υδάτινης επιφάνειας γίνεται σε επίπεδο “θάλασσας” και “μη θάλασσας”. Στην περίπτωση απαλοιφής περισσότερων ακμών, επομένως και πλοίων, θα αφαιρούνταν και μεγαλύτερα τμήματα ακτογραμμής – λόγω και της ασυνεχειάς της. Σημειώνεται ότι εάν είχε τεθεί μεγαλύτερο εύρος ζώνης ούτως ώστε να διατηρηθεί η αληθής θέση της ακτογραμμής – δηλαδή το περίγραμμα του λιμένος

– Θα υπήρχαν πολύ περισσότερες εναπομείνουσες ακμές και στη χερσαία και στην υδάτινη επιφάνεια.

Στη συνέχεια παρατίθεται αξιολόγηση βάσει των κριτηρίων πληρότητας, ορθότητας και ποιότητας, για τρία προϊόντα ακτογραμμής: (α) ανίχνευση μόνο με τον Canny, (β) εξαγωγή μόνο από συσταδοποίηση K-μέσου ως το όριο των δύο κλάσεων, και (γ) εξαγωγή βάσει της μεθοδολογίας που περιγράφηκε στο διάγραμμα ροής του σχήματος 4.7, για τη συσταδοποίηση. Η σύγκριση πραγματοποιήθηκε για ζώνες εύρους 1, 3 και 5 εικονοστοιχείων, σε σχέση με την ψηφιοποιημένη ακτογραμμή αναφοράς.

		Εύρος ζώνης (εικονοστοιχεία)		
ΠΛΗΡΟΤΗΤΑ		1	3	5
	Συσταδοποίηση K-μέσου	0.42602	0.70372	0.8102
ALM	Canny	0.54805	0.85036	0.91691
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.48725	0.7585	0.85213
ALM&ML	Canny	0.51693	0.81526	0.89774
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.48379	0.75147	0.84654
		Εύρος ζώνης (εικονοστοιχεία)		
ΟΡΘΟΤΗΤΑ		1	3	5
	Συσταδοποίηση K-μέσου	0.39771	0.65324	0.7605
ALM	Canny	0.46042	0.71537	0.80113
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.41249	0.65385	0.75028
ALM&ML	Canny	0.45707	0.71156	0.80609
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.42442	0.66023	0.75722
		Εύρος ζώνης (εικονοστοιχεία)		
ΠΟΙΟΤΗΤΑ		1	3	5
	Συσταδοποίηση K-μέσου	0.25895	0.51233	0.6455
ALM	Canny	0.33371	0.63538	0.7469
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.28763	0.54118	0.66385
ALM&ML	Canny	0.32027	0.61276	0.7383
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.29213	0.5419	0.66582

Πίνακας 4.14: 6^η Εφαρμογή, αξιολόγηση ανίχνευσης ακτογραμμής με: συσταδοποίηση K-μέσου, Canny και την υλοποιημένη μεθοδολογία, για τις δυο μεθόδους προ-επεξεργασίας.

Με βάση τον παραπάνω πίνακα, παρατηρούνται τα εξής:

- Σε επίπεδο **πληρότητας**, η ανίχνευση των ακμών με προ-επεξεργασία την ALM έχει καλύτερα αποτελέσματα από την ALM συνδυαστικά με την ML. Ομοίως, συνδυαστικά με τη συσταδοποίηση – η οποία έχει, γενικά, χειρότερα αποτελέσματα σε σχέση με τον Canny – η **ανίχνευση των ακμών με προ-επεξεργασία την ALM, βάσει της υλοποιημένης μεθοδολογίας, παρουσιάζει**

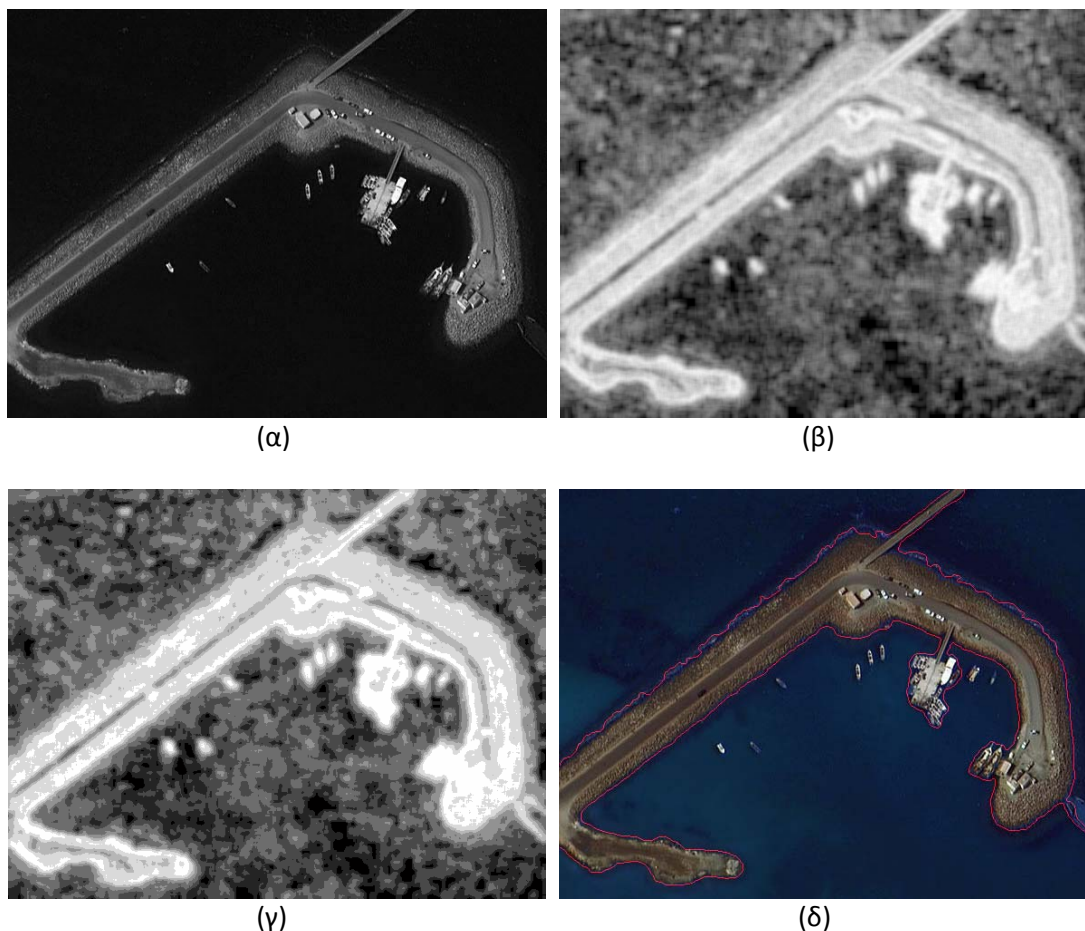
αυξημένα επίπεδα πληρότητας, αν και είναι πιο μειωμένα σε σχέση με τον Canny.

- Σε επίπεδα *ορθότητας* και *ποιότητας*, η ανίχνευση των ακμών με προ-επεξεργασία την ALM έχει καλύτερα αποτελέσματα από την ALM συνδυαστικά με την ML. Ωστόσο, συνδυαστικά με τη συσταδοποίηση – η οποία έχει, γενικά, χειρότερα αποτελέσματα σε σχέση με τον Canny – η **ανίχνευση των ακμών με προ-επεξεργασία την ALM συνδυαστικά με την ML, βάσει της υλοποιημένης μεθοδολογίας, παρουσιάζει αυξημένα επίπεδα ορθότητας και ολικής ποιότητας, αν και είναι πιο μειωμένα σε σχέση με τον Canny.**
- **Για εύρος ζώνης 1 εικονοστοιχείου** οι δείκτες αξιολόγησης, συνολικά, δεν κυμαίνονται σε ικανοποιητικά επίπεδα (<50%). Η συγκεκριμένη απεικόνιση έχει διακριτική ικανότητα 0,5 m, και η δεδομένη ζώνη (3 εικονοστοιχεία → ± 0,5m) αντιστοιχεί σε κλίμακα χαρτογράφησης 1:3.000.
- **Για εύρος ζώνης 3 εικονοστοιχείων**, τα επίπεδα πληρότητας και ορθότητας των ακμών, συνολικά, είναι ενθαρρυντικά (μ.ό. πληρότητας 77,6%, μ.ό ορθότητας 67,9%) και μειωμένα παρατηρούνται μόνο για την ολική ποιότητα των ακμών (μ.ό ποιότητας 56,9%). Για την υλοποιημένη μεθοδολογία με τις δύο μεθόδους προ-επεξεργασίας τα αντίστοιχα ποσοστά είναι τα εξής: μ.ό. πληρότητας 75,5%, μ.ό ορθότητας 65,7% και μ.ό ποιότητας 54,2%. Η δεδομένη ζώνη (5 εικονοστοιχεία → ± 1m) αντιστοιχεί σε κλίμακα χαρτογράφησης 1:5.000.
- **Για εύρος ζώνης 5 εικονοστοιχείων**, τα επίπεδα αξιολόγησης των ακμών, συνολικά, είναι πολύ καλά (μ.ό. πληρότητας 86,5%, μ.ό ορθότητας 77,5%, μ.ό ποιότητας 69,2%). Για την υλοποιημένη μεθοδολογία με τις δύο μεθόδους προ-επεξεργασίας τα αντίστοιχα ποσοστά είναι τα εξής: μ.ό. πληρότητας 84,9%, μ.ό ορθότητας 75,4% και μ.ό ποιότητας 66,5%. Η δεδομένη ζώνη (9 εικονοστοιχεία → ± 2m) αντιστοιχεί σε κλίμακα χαρτογράφησης 1:9.000.
- **Η υλοποιημένη μεθοδολογία για τη συσταδοποίηση κρίνεται ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για χαρτογραφήσεις μέγιστης κλίμακας 1:9.000.**

Σημειώνεται ότι η ακτογραμμή που ανιχνεύτηκε μόνο με τον Canny και χρησιμοποιείται στην αξιολόγηση, προέκυψε από τα δεδομένα αναφοράς με χρήση εύρους ζώνης 4 και 5 εικονοστοιχείων για τις ALM και ALM συνδυαστικά με ML, αντίστοιχα, καθώς και μορφολογικών εργαλείων.

Εντροπία

Στη συγκεκριμένη απεικόνιση, η **μέτρηση της εντροπίας με χρήση της πολυεπίπεδης κατωφλίωσης δεν έχει καλά αποτελέσματα**. Στις εικόνες που επισυνάπτονται παρουσιάζεται και η εξαγωγή της ακτογραμμής έπειτα από μορφολογική επεξεργασία του προϊόντος της πολυεπίπεδης κατωφλίωσης. Έπειτα από πολλές δοκιμές προέκυψε ότι η ορθότερη κατωφλίωση ήταν οκτώ επιπέδων. Φαίνεται ότι δεν εντοπίζεται σωστά η ακτογραμμή, ούτε όσον αφορά στο περίγραμμα του λιμένος ούτε στο όριο χερσαίας και υδάτινης επιφάνειας. Σημειώνεται ότι η εξαγωγή της ακτογραμμής με συγχώνευση πληροφορίας (fusion) είναι πολύ πιθανό να δίνει πολύ καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με την πολυεπίπεδη κατωφλίωση.



Εικόνα 4.48: 6^η Εφαρμογή, (α) απεικόνιση WORLDVIEW-2 στο κόκκινο κανάλι, (β) ανάλυση υφής με μέτρηση της εντροπίας, (γ) κατωφλίωση οκτώ επιπέδων στην εικόνα υφής, (δ) υπέρθεση ακτογραμμής στην αρχική απεικόνιση έπειτα από μέτρηση της εντροπίας.

Η ακαταλληλότητα της τεχνικής παρουσιάζεται και στον παρακάτω πίνακα, όπου παρατίθεται αξιολόγηση βάσει των κριτηρίων πληρότητας, ορθότητας και ποιότητας, για την εξαγόμενη ακτογραμμή της εικόνας 4.48(δ). Η σύγκριση πραγματοποιήθηκε για ζώνες εύρους 1, 3 και 5 εικονοστοιχείων, σε σχέση με την ψηφιοποιημένη ακτογραμμή αναφοράς.

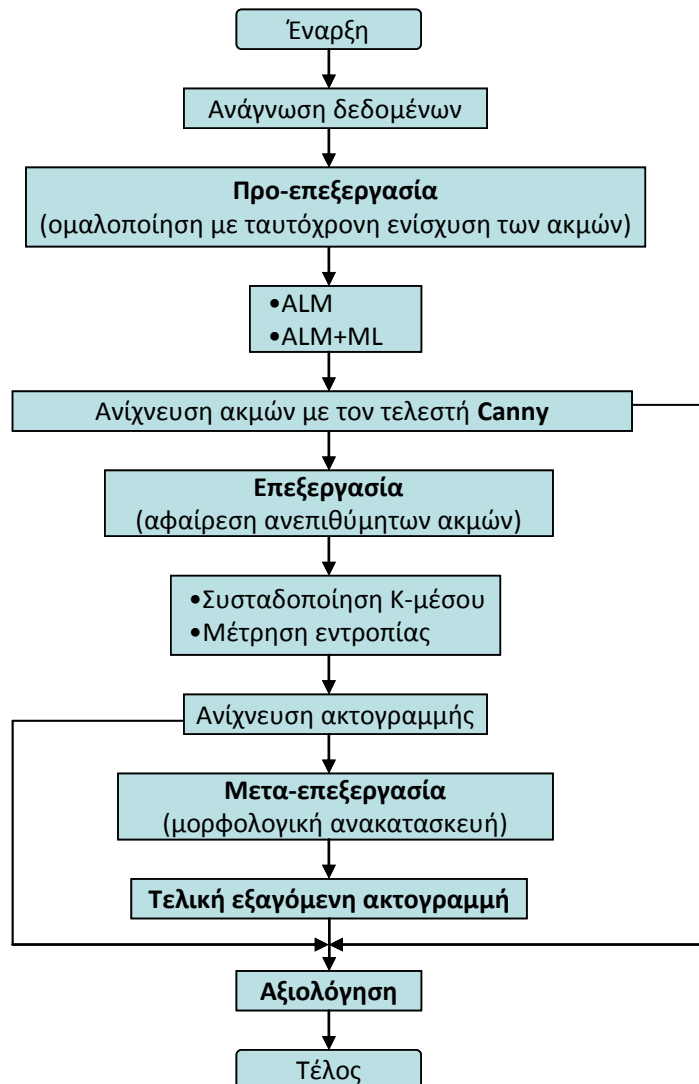
		Εύρος ζώνης (εικονοστοιχεία)		
		1	3	5
Μέτρηση Εντροπίας	ΠΛΗΡΟΤΗΤΑ	0.13961	0.36992	0.5608
	ΟΡΘΟΤΗΤΑ	0.13095	0.34601	0.52056
	ΠΟΙΟΤΗΤΑ	0.072465	0.2177	0.3698

Πίνακας 4.15: 6^η Εφαρμογή, αξιολόγηση ανίχνευσης ακτογραμμής με μέτρηση εντροπίας.

Συνοψίζοντας:

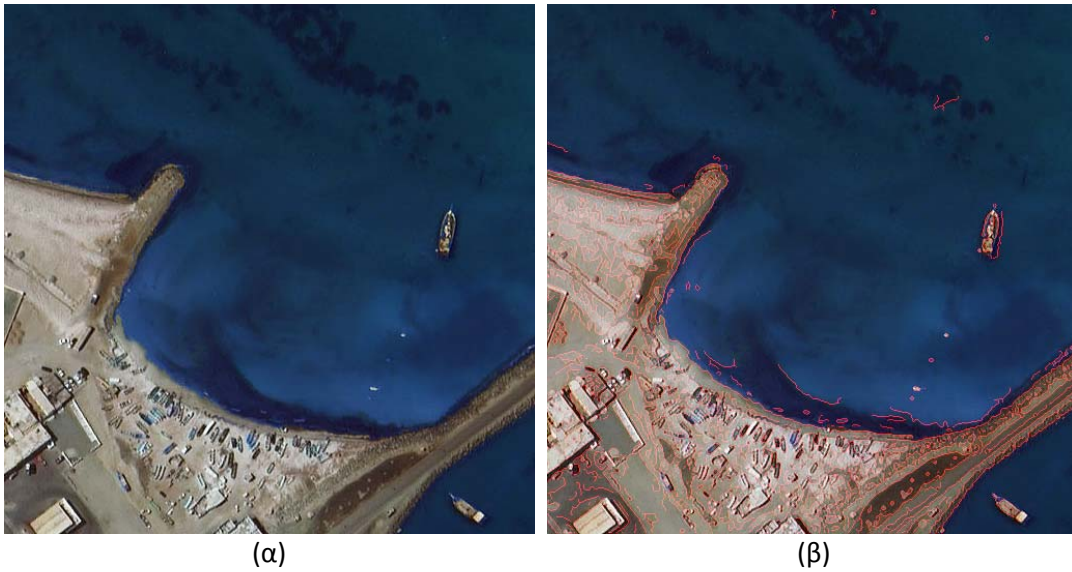
- Οι ακμές που ανιχνεύονται «υποφέρουν» από κενά και ασυνέχειες, το οποίο επηρεάζει αρνητικά την τελική εξαγωγή της ακτογραμμής. Παράλληλα, εξαρτώνται άμεσα από την ποιότητα και τη δυσκολία της απεικόνισης (π.χ. βράχια, λιμένας).
- Βάσει της αξιολόγησης, η χρήση της ALM παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με τον συνδυασμό της με την ML. Φωτοερμηνευτικά, δεν παρατηρήθηκαν έντονες διαφορές στην εξαγόμενη ακτογραμμή, για τις δύο μεθόδους προ-επεξεργασίας.
- Βάσει των κριτηρίων αξιολόγησης, η ανίχνευση των ακμών με τον Canny είχε πολύ καλά αποτελέσματα για εύρος ζώνης 3 και 5 εικονοστοιχείων. Ωστόσο, επειδή η συσταδοποίηση δεν ήταν το ίδιο επιτυχής, τα επίπεδα πληρότητας, ορθότητας και ολικής ποιότητας του υλοποιημένου αλγορίθμου παρουσιάζονται μειωμένα, σε σχέση με τον Canny. Επομένως, **ο υλοποιημένος αλγόριθμος συσταδοποίησης έχει ενθαρρυντικά αποτελέσματα. Καταλληλότερη τεχνική προ-επεξεργασίας κρίνεται η ALM 300 επαναλήψεων συνδυαστικά με 5 επαναλήψεις ML.**
- Η μέθοδος που αναπτύχθηκε βάσει της εντροπίας δεν είχε καλά αποτελέσματα.
- Η τελική εξαγωγή της ακτογραμμής εξαρτάται – εκτός από την αρχική ανίχνευση των ακμών – και από την τεχνική επεξεργασίας και τα μορφολογικά εργαλεία που επιλέγονται για την ανακατασκευή της – συμπεριλαμβανομένου και του εύρους ζώνης.
- Η αξιολόγηση της εξαγόμενης ακτογραμμής εξαρτάται άμεσα από την ορθότητα της ψηφιοποίησης των δεδομένων αναφοράς, καθώς και από τη μετατροπή τους σε ψηφιδωτά δεδομένα.
- **Η υλοποιημένη μεθοδολογία – για τη συσταδοποίηση Κ-μέσου – κρίνεται ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί, με καλά αποτελέσματα, σε απεικονίσεις WORLDVIEW-2 διακριτικής ικανότητας 0,5 m, για χαρτογραφήσεις μέγιστης κλίμακας 1:9.000.**

4.7 7^η Εφαρμογή – Περιοχή: Oman (WORLDVIEW-2)



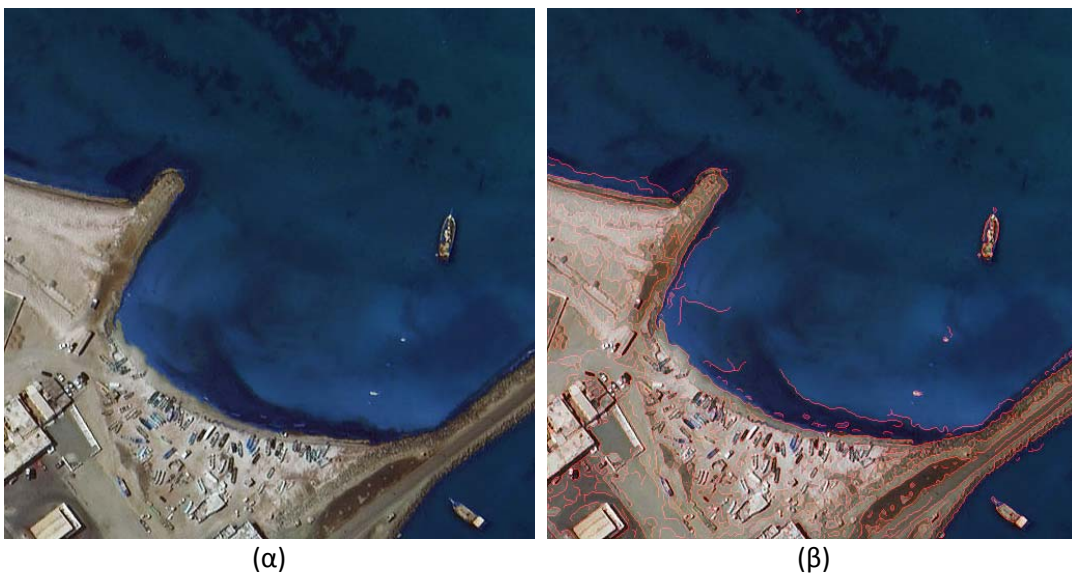
Σχήμα 4.8: 7^η Εφαρμογή, διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε, με σκοπό τη διερεύνηση ανίχνευσης ακτογραμμής με προηγμένες τεχνικές ομαλοποίησης και τον τελεστή Canny.

Όπως παρουσιάστηκε στο προηγούμενο εδάφιο, οι πιο αποτελεσματικές τεχνικές (από αυτές που εξετάστηκαν και για τις συγκεκριμένες εφαρμογές) ομαλοποίησης με ταυτόχρονη ενίσχυση των ακμών είναι η ανισοτροπική διάχυση ALM, καθώς και ο συνδυασμός της με ένα μικρό αριθμό επαναλήψεων μορφολογικής εξομάλυνσης. Κατά την εφαρμογή της ALM παρατηρήθηκε ότι τα καλύτερα αποτελέσματα δίνονται έπειτα από 1 επανάληψη. Η ανίχνευση των ακμών έγινε με τον βέλτιστο τελεστή Canny. Ωστόσο, όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.49(β), οι ακμές δεν είναι συνεχείς και αυτό αναδεικνύεται και στις υπόλοιπες τεχνικές, δημιουργώντας περαιτέρω προβλήματα. Επιπλέον, και η παρουσία βραχιδών σημείων στο πέρας της χερσαίας επιφάνειας δυσχεραίνει τη συνέχεια των ακμών.



Εικόνα 4.49: 7^η Εφαρμογή, (α) απεικόνιση WORLDVIEW-2 στο φυσικό έγχρωμο σύνθετο, (β) ανισοτροπική διάχυση ALM 1 επανάληψης και ανίχνευση ακμών με τον Canny.

Ο δεύτερος αλγόριθμος που υλοποιήθηκε περιλαμβάνει λίγες επαναλήψεις μορφολογικής εξομάλυνσης επικουρικά στην ενίσχυση των ακμών με την ALM, επιτυγχάνοντας μεγαλύτερη ομαλοποίηση κι επομένως απαλείφοντας κάποιες ανεπιθύμητες ακμές. Στην εικόνα 4.50(β) φαίνεται ότι πράγματι η χερσαία επιφάνεια είναι πιο ομαλοποιημένη. Η περιοχή που ιδιαίτερα ενδιαφέρει είναι κοντά στην ακτογραμμή, προκειμένου να απλοποιηθεί η ανίχνευσή της. Έπειτα από πληθώρα συνδυασμών, τα καλύτερα αποτελέσματα δόθηκαν έπειτα από 200 επαναλήψεις ALM και 5 επαναλήψεις ML. Τα προβλήματα που ανέκυψαν είναι τα ίδια με αυτά που παρουσιάστηκαν για την ALM.



Εικόνα 4.50: 7^η Εφαρμογή, (α) απεικόνιση WORLDVIEW-2 στο φυσικό έγχρωμο σύνθετο, (β) ανισοτροπική διάχυση ALM 200 επαναλήψεων, μορφολογική εξομάλυνση ML 5 επαναλήψεων και ανίχνευση ακμών με τον Canny.

Συνοψίζοντας, τα βασικά προβλήματα που αναδείχτηκαν και παρουσιάστηκαν κατά την ανίχνευση ακμών ήταν τα εξής:

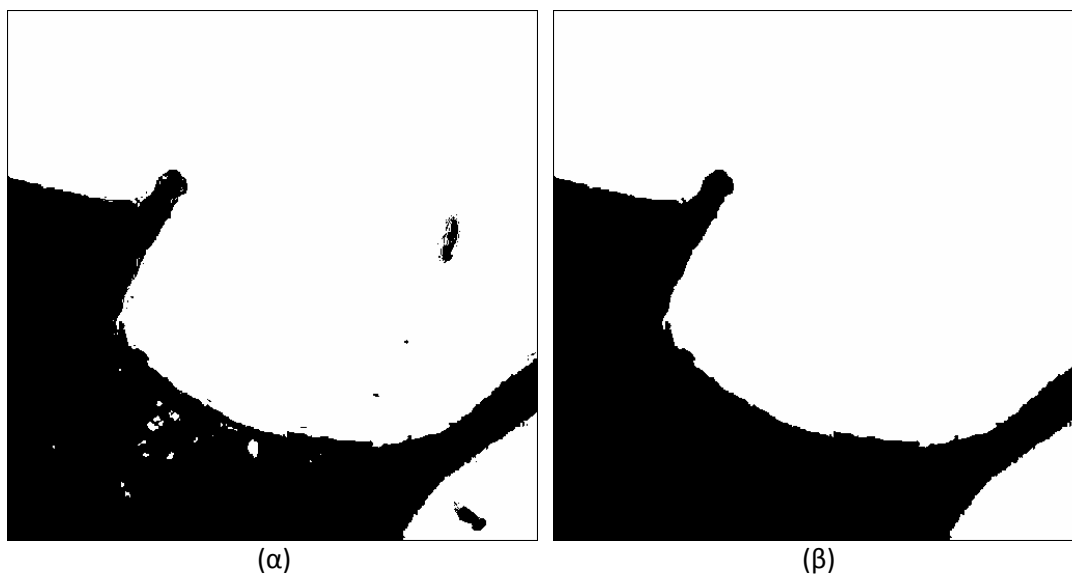
(α) δυσκολία απεικόνισης (βράχια).

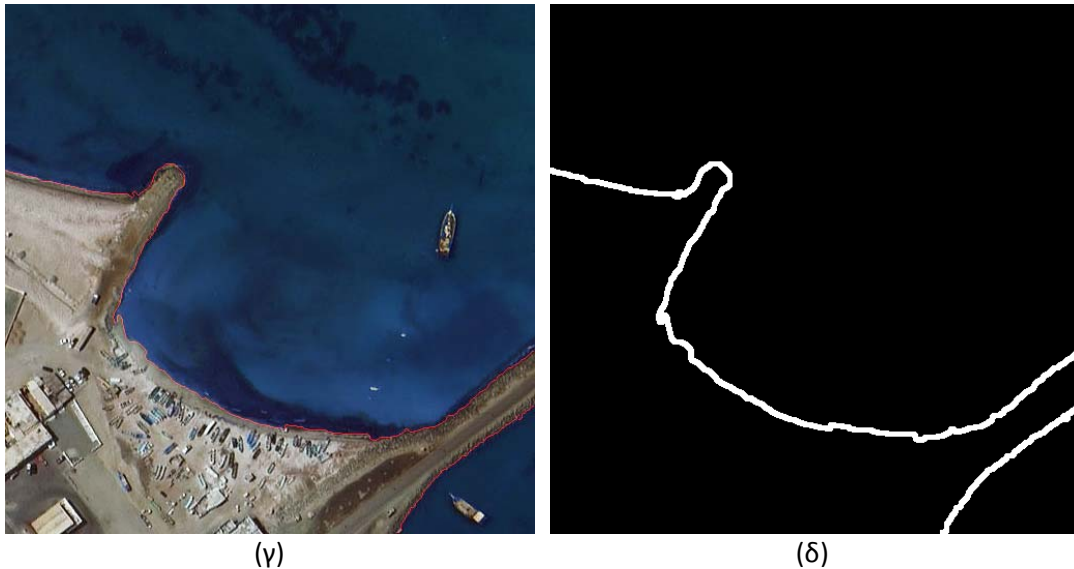
(β) ασυνέχεια ακμών.

Για την αφαίρεση των ανεπιθύμητων ακμών χρησιμοποιήθηκαν: (α) συσταδοποίηση Κ-μέσου, και (β) μέτρηση της εντροπίας. Στη συνέχεια επισυνάπτονται και αναλύονται οι παράμετροι της εκάστοτε τεχνικής, καθώς και τα αποτελέσματα που προέκυψαν. *Σημειώνεται ότι τόσο για την 6^η όσο και για την 7^η εφαρμογή χρησιμοποιήθηκε το κόκκινο κανάλι – λόγω της χαμηλής ανακλαστικότητας του νερού σε σχέση με το μπλε και το πράσινο κανάλι (σχήμα 3.15). Επιπλέον, αν και αποτελούν τμήματα της ίδιας απεικόνισης, ωστόσο χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές τεχνικές και παράμετροι αυτών, λόγω προγραμματιστικής δυσκολίας.*

Συσταδοποίηση Κ-μέσου

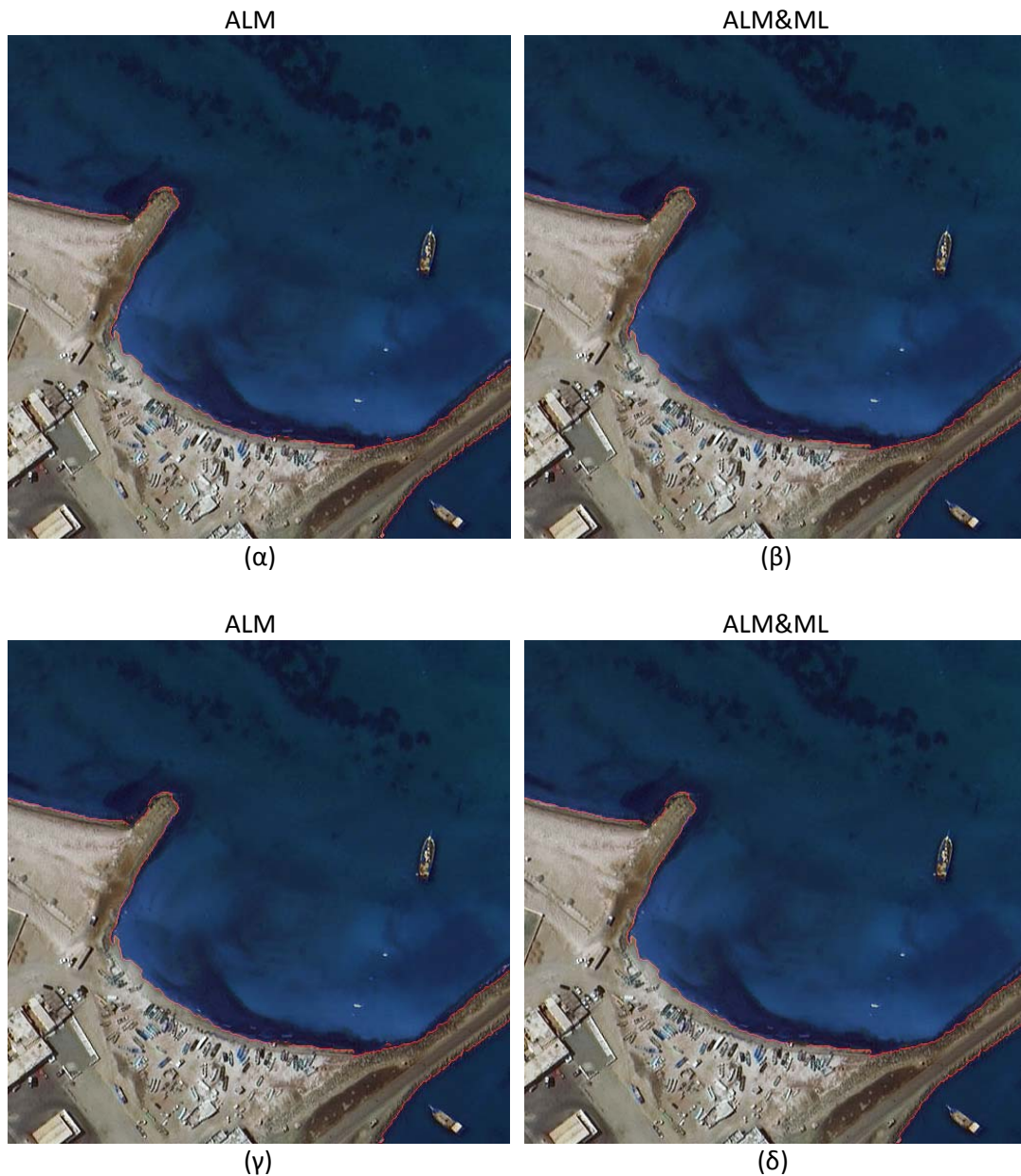
Η συγκεκριμένη απεικόνιση κατηγοριοποιήθηκε σε δύο κλάσεις (εικόνα 4.51(α)). Έπειτα από την απαλοιφή κάποιων μικρών αντικειμένων της χερσαίας και της υδάτινης επιφάνειας, προέκυψε ο τελικός διαχωρισμός της απεικόνισης σε δύο κλάσεις (εικόνα 4.51(β)), και η ανίχνευση της θέσης της ακτογραμμής ως το όριο των δύο επιφανειών (εικόνα 4.51(γ)).





Εικόνα 4.51: 7^η Εφαρμογή, (α) συσταδοποίηση Κ-μέσου σε δυο κλάσεις, (β) αφαίρεση μικρών αντικειμένων της χερσαίας και της υδάτινης επιφάνειας, (γ) υπέρθεση ακτογραμμής στην αρχική απεικόνιση έπειτα από συσταδοποίηση Κ-μέσου, (δ) εύρος ζώνης 3 εικονοστοιχείων στην ακτογραμμή που προκύπτει από τη συσταδοποίηση.

Στην ακτογραμμή που προέκυψε ως το όριο των δύο κλάσεων τέθηκε ένα εύρος ζώνης 3 εικονοστοιχείων και για τις δυο μεθόδους προ-επεξεργασίας (εικόνα 4.51(δ)), με σκοπό την αφαίρεση ανεπιθύμητων ακμών. Το εύρος ζώνης τέθηκε στις εικόνες ακμών και που είχαν αρχικά υποστεί προ-επεξεργασία με: (α) ALM 1 επανάληψης (εικόνα 4.49(β)), και (β) ALM 200 επαναλήψεων συνδυαστικά με ML 5 επαναλήψεων (εικόνα 4.50(β)). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στις εικόνες 4.52(α) και 4.52(β), αντίστοιχα. Στην περίπτωση προ-επεξεργασίας με ALM, η εξαγόμενη ακτογραμμή προκύπτει, τελικά, χρησιμοποιώντας το μορφολογικό εργαλείο `bwareaopen`, αφαιρώντας τις μικρές εναπομείνουσες ακμές (εικόνα 4.52(γ)). Στην περίπτωση προ-επεξεργασίας με ALM και ML, η εξαγόμενη ακτογραμμή προκύπτει, τελικά, χρησιμοποιώντας τα μορφολογικά εργαλεία `bwareaopen` και `bwmorph (bridge)` (`bwareaopen` → `bwmorph`) (εικόνα 4.52(δ)).



Εικόνα 4.52: 7^η Εφαρμογή, υπέρθεση των ακμών εντός του εύρους ζώνης (εικόνα 4.51(δ)) στην αρχική απεικόνιση και τελική θέση ακτογραμμής, αντίστοιχα, έπειτα από προ-επεξεργασία με (α), (γ) ALM και (β), (δ) ALM συνδυαστικά με ML.

Η τελική θέση της ακτογραμμής προέκυψε από την αρχική ανίχνευση ακμών με τον τελεστή Canny. Σε επίπεδο φωτοερμηνείας για τις δύο μεθόδους προ-επεξεργασίας, δεν παρατηρούνται έντονες διαφορές. Επιπλέον, όπως σημειώθηκε, παρουσιάζονται λίγες ασυνέχειες (εικόνες 4.52(γ) και 4.52(δ)). Τα κενά αυτά οφείλονται στην αρχική ανίχνευση των ακμών από τον Canny, καθώς κάποια τμήματα της ακτογραμμής δεν είχαν ανιχνευτεί, και στη μετα-επεξεργασία της απεικόνισης – για να αφαιρεθούν οι εναπομείναντες ακμές αφαιρέθηκαν και κάποια μικρά τμήματα της ακτογραμμής. Στην περίπτωση απαλοιφής περισσότερων ακμών, θα αφαιρούνταν και μεγαλύτερα τμήματα ακτογραμμής – λόγω και της ασυνεχειάς της. Επιπλέον, εάν είχε τεθεί μεγαλύτερο εύρος ζώνης ούτως ώστε να διατηρηθεί μεγαλύτερο τμήμα της, θα υπήρχαν πολύ περισσότερες εναπομείναντες ακμές.

Στη συνέχεια παρατίθεται αξιολόγηση βάσει των κριτηρίων πληρότητας, ορθότητας και ποιότητας, για τρία προϊόντα ακτογραμμής: (α) ανίχνευση μόνο με τον Canny, (β) εξαγωγή μόνο από συσταδοποίηση K-μέσου ως το όριο των δύο κλάσεων, και (γ) εξαγωγή βάσει της μεθοδολογίας που περιγράφηκε στο διάγραμμα ροής του σχήματος 4.8, για τη συσταδοποίηση. Η σύγκριση πραγματοποιήθηκε για ζώνες εύρους 1, 3 και 5 εικονοστοιχείων, σε σχέση με την ψηφιοποιημένη ακτογραμμή αναφοράς.

		Εύρος ζώνης (εικονοστοιχεία)		
ΠΛΗΡΟΤΗΤΑ		1	3	5
	Συσταδοποίηση K-μέσου	0.65269	0.84297	0.89703
ALM	Canny	0.62544	0.82773	0.88716
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.63417	0.82741	0.88775
ALM&ML	Canny	0.64151	0.83574	0.89397
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.64151	0.83134	0.89041
		Εύρος ζώνης (εικονοστοιχεία)		
ΟΡΘΟΤΗΤΑ		1	3	5
	Συσταδοποίηση K-μέσου	0.66171	0.84577	0.90724
ALM	Canny	0.63273	0.81859	0.88341
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.65311	0.83942	0.90037
ALM&ML	Canny	0.63839	0.82281	0.88757
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.65806	0.84059	0.90199
		Εύρος ζώνης (εικονοστοιχεία)		
ΠΟΙΟΤΗΤΑ		1	3	5
	Συσταδοποίηση K-μέσου	0.48939	0.73065	0.82167
ALM	Canny	0.45886	0.69943	0.79417
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.47439	0.71434	0.80834
ALM&ML	Canny	0.47053	0.70827	0.80303
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.48113	0.71813	0.81186

Πίνακας 4.16: 7^η Εφαρμογή, αξιολόγηση ανίχνευσης ακτογραμμής με: συσταδοποίηση K-μέσου, Canny και την υλοποιημένη μεθοδολογία, για τις δυο μεθόδους προ-επεξεργασίας.

Με βάση τον παραπάνω πίνακα, παρατηρούνται τα εξής:

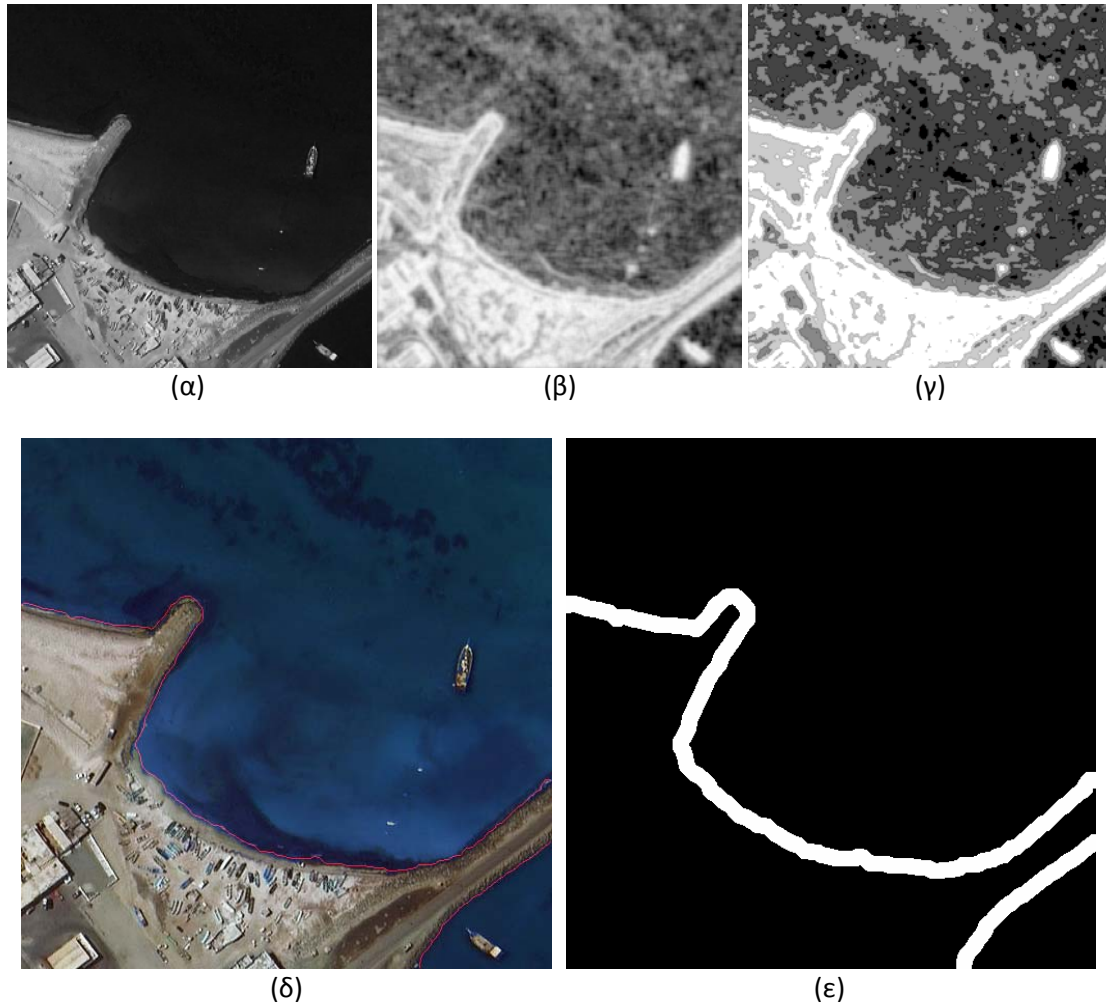
- Σε επίπεδο *πληρότητας*, η ανίχνευση των ακμών με προ-επεξεργασία την ALM συνδυαστικά με την ML έχει καλύτερα αποτελέσματα από την ALM. Ομοίως, συνδυαστικά με τη συσταδοποίηση – η οποία έχει, γενικά, καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με τον Canny – η **ανίχνευση των ακμών με προ-επεξεργασία την ALM συνδυαστικά με την ML, βάσει της υλοποιημένης μεθοδολογίας, παρουσιάζει αυξημένα επίπεδα πληρότητας, κοντά στον Canny και τη συσταδοποίηση.**

- Σε επίπεδα *ορθότητας και ποιότητας*, η ανίχνευση των ακμών με προεπεξεργασία την ALM συνδυαστικά με την ML έχει καλύτερα αποτελέσματα από την ALM. Ομοίως, συνδυαστικά με τη συσταδοποίηση – η οποία έχει, γενικά, καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με τον Canny – **η ανίχνευση των ακμών με προεπεξεργασία την ALM συνδυαστικά με την ML, βάσει της υλοποιημένης μεθοδολογίας, παρουσιάζει αυξημένα επίπεδα ορθότητας και ολικής ποιότητας, κοντά στη συσταδοποίηση και καλύτερα από τον Canny.**
- **Για εύρος ζώνης 1 εικονοστοιχείου**, τα επίπεδα πληρότητας και ορθότητας των ακμών, συνολικά, είναι ικανοποιητικά (μ.ό. πληρότητας 63,9%, μ.ό ορθότητας 64,9%), σε αντίθεση με την ολική ποιότητα των ακμών (μ.ό ποιότητας 47,5%). Η συγκεκριμένη απεικόνιση έχει διακριτική ικανότητα 0,5 m, και η δεδομένη ζώνη (3 εικονοστοιχεία $\rightarrow \pm 0,5m$) αντιστοιχεί σε κλίμακα χαρτογράφησης 1:3.000.
- **Για εύρος ζώνης 3 εικονοστοιχείων**, τα επίπεδα αξιολόγησης των ακμών, συνολικά, είναι πολύ καλά (μ.ό. πληρότητας 83,3%, μ.ό ορθότητας 83,3%, μ.ό ποιότητας 71,4%). Για την υλοποιημένη μεθοδολογία με τις δύο μεθόδους προεπεξεργασίας τα αντίστοιχα ποσοστά είναι τα εξής: μ.ό. πληρότητας 82,9%, μ.ό ορθότητας 84% και μ.ό ποιότητας 71,6%. Η δεδομένη ζώνη (5 εικονοστοιχεία $\rightarrow \pm 1m$) αντιστοιχεί σε κλίμακα χαρτογράφησης 1:5.000.
- **Για εύρος ζώνης 5 εικονοστοιχείων**, τα επίπεδα αξιολόγησης των ακμών, συνολικά, είναι πολύ καλά (μ.ό. πληρότητας 89,1%, μ.ό ορθότητας 89,6%, μ.ό ποιότητας 80,8%). Για την υλοποιημένη μεθοδολογία με τις δύο μεθόδους προεπεξεργασίας τα αντίστοιχα ποσοστά είναι τα εξής: μ.ό. πληρότητας 88,9%, μ.ό ορθότητας 90,1% και μ.ό ποιότητας 81%. Η δεδομένη ζώνη (9 εικονοστοιχεία $\rightarrow \pm 2m$) αντιστοιχεί σε κλίμακα χαρτογράφησης 1:9.000.
- **Η υλοποιημένη μεθοδολογία για τη συσταδοποίηση κρίνεται ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για χαρτογραφήσεις μέγιστης κλίμακας 1:5.000.**

Σημειώνεται ότι η ακτογραμμή που ανιχνεύτηκε μόνο με τον Canny και χρησιμοποιείται στην αξιολόγηση, προέκυψε από τα δεδομένα αναφοράς με χρήση εύρους ζώνης 3 και 5 εικονοστοιχείων για τις ALM και ALM συνδυαστικά με ML, αντίστοιχα, καθώς και μορφολογικών εργαλείων.

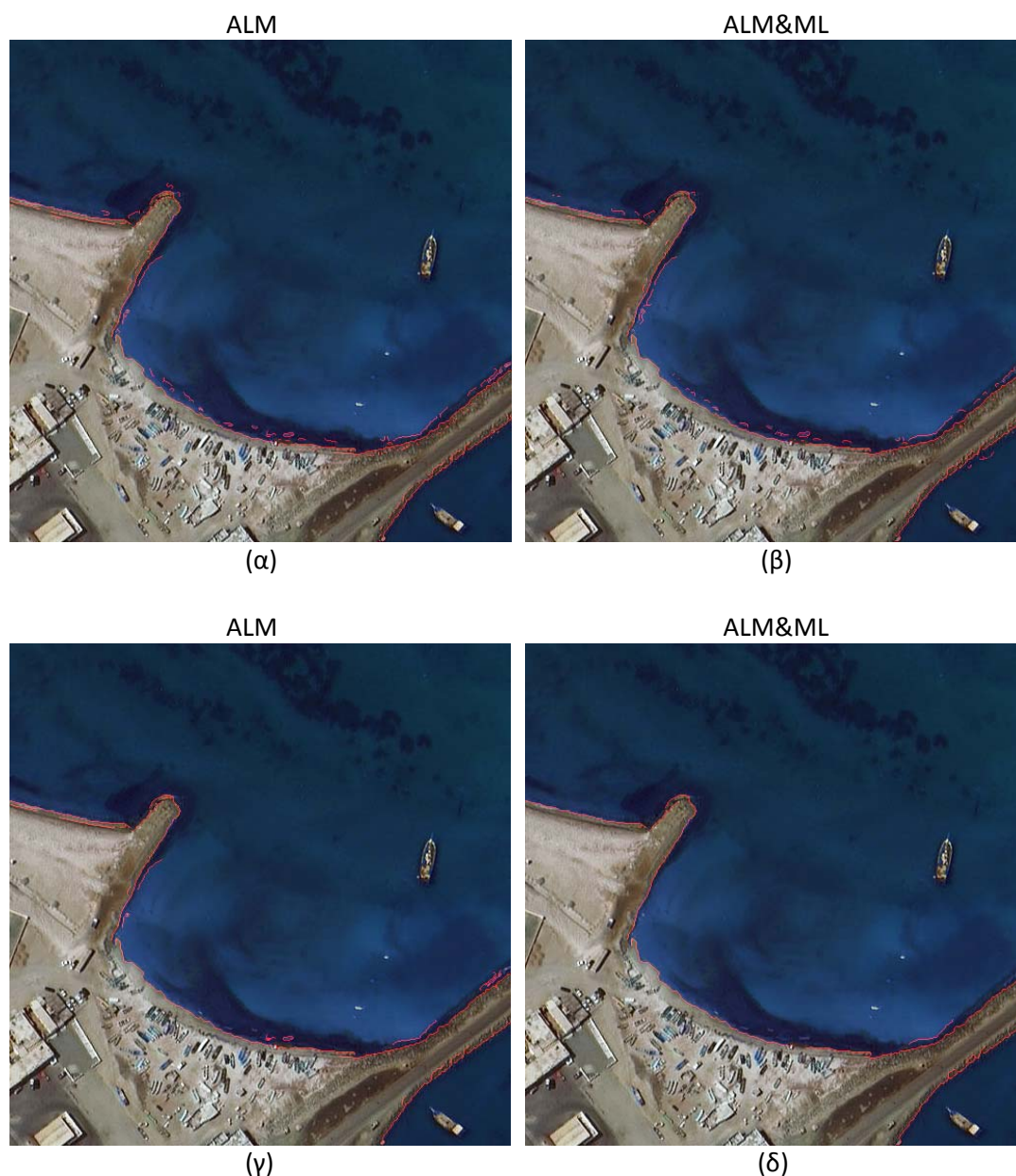
Εντροπία

Στη συγκεκριμένη απεικόνιση η μέτρηση της εντροπίας με χρήση της πολυεπίπεδης κατωφλίωσης έχει μέτρια αποτελέσματα, σε αντίθεση ωστόσο με την υλοποιημένη μεθοδολογία. Έπειτα από τη μέτρηση της εντροπίας και αρκετές δοκιμές, η απεικόνιση κατωφλιώθηκε σε πέντε επίπεδα. Στις εικόνες που επισυνάπτονται παρουσιάζεται και η εξαγωγή της ακτογραμμής έπειτα από μορφολογική επεξεργασία του προϊόντος της πολυεπίπεδης κατωφλίωσης. Φαίνεται ότι δεν εντοπίζεται σωστά η ακτογραμμή, δηλαδή ως το όριο της χερσαίας και της υδάτινης επιφάνειας, η οποία είναι αρκετά μετατοπισμένη από την αληθή της θέση.



Εικόνα 4.53: 7^η Εφαρμογή, (α) απεικόνιση WORLDVIEW-2 στο κόκκινο κανάλι, (β) ανάλυση υφής με μέτρηση της εντροπίας, (γ) κατωφλίωση πέντε επιπέδων στην εικόνα υφής, (δ) υπέρθεση ακτογραμμής στην αρχική απεικόνιση έπειτα από μέτρηση της εντροπίας, (ε) εύρος ζώνης 8 εικονοστοιχείων στην ακτογραμμή που προκύπτει από την εντροπία.

Ωστόσο, επειδή πρόκειται για εύκολη περίπτωση ανίχνευσης ακτογραμμής και η τελική της θέση προκύπτει από τον Canny, τέθηκε ένα εύρος ζώνης 8 και 7 εικονοστοιχείων για την ALM (εικόνα 4.53(ε)) και την ALM συνδυαστικά με ML, αντίστοιχα, με σκοπό την αφαίρεση ανεπιθύμητων ακμών. Το εύρος ζώνης τέθηκε στις εικόνες ακμών και που είχαν αρχικά υποστεί προ-επεξεργασία με: (α) ALM 1 επανάληψης (εικόνα 4.49(β)), και (β) ALM 200 επαναλήψεων συνδυαστικά με ML 5 επαναλήψεων (εικόνα 4.50(β)). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στις εικόνες 4.54(α) και 4.54(β), αντίστοιχα. Και στις δύο περιπτώσεις προ-επεξεργασίας η εξαγόμενη ακτογραμμή προκύπτει, τελικά, χρησιμοποιώντας τα μορφολογικά εργαλεία `bwareaopen` και `bwmorph` (`bridge`) (`bwareaopen` → `bwmorph` → `bwareaopen`), αφαιρώντας τις εναπομείνουσες ακμές (εικόνας 4.54(γ) και 4.54(δ)).



Εικόνα 4.54: 7^η Εφαρμογή, υπέρθεση των ακμών εντός του εύρους ζώνης (εικόνα 4.53(ε)) στην αρχική απεικόνιση και τελική θέση ακτογραμμής, αντίστοιχα, έπειτα από προ-επεξεργασία με (α), (γ) ALM και (β), (δ) ALM συνδυαστικά με ML.

Η τελική θέση της ακτογραμμής προέκυψε από την αρχική ανίχνευση ακμών με τον τελεστή Canny. Σε επίπεδο φωτοερμηνείας για τις δύο μεθόδους προ-επεξεργασίας, παρατηρείται ότι με την ALM οι εναπομείνουσες ακμές είναι περισσότερες. Επιπλέον, όπως σημειώθηκε, παρουσιάζονται λίγες ασυνέχειες (εικόνες 4.54(γ) και 4.54(δ)). Τα κενά αυτά οφείλονται στην αρχική ανίχνευση των ακμών από τον Canny, καθώς κάποια τμήματα της ακτογραμμής δεν είχαν ανιχνευτεί, και στη μετα-επεξεργασία της απεικόνισης – για να αφαιρεθούν οι εναπομείνουσες ακμές αφαιρέθηκαν και κάποια μικρά τμήματα της ακτογραμμής. Στην περίπτωση απαλοιφής περισσότερων ακμών, θα αφαιρούνταν και μεγαλύτερα τμήματα ακτογραμμής – λόγω και της ασυνεχειάς της. Επιπλέον, εάν είχε τεθεί μεγαλύτερο

εύρος ζώνης ούτως ώστε να διατηρηθεί μεγαλύτερο τμήμα της, θα υπήρχαν πολύ περισσότερες εναπομείνουσες ακμές.

Στη συνέχεια παρατίθεται αξιολόγηση βάσει των κριτηρίων πληρότητας, ορθότητας και ποιότητας, για τρία προϊόντα ακτογραμμής: (α) ανίχνευση μόνο με τον Canny, (β) εξαγωγή μόνο από την εντροπία, και (γ) εξαγωγή βάσει της μεθοδολογίας που περιγράφηκε στο διάγραμμα ροής του σχήματος 4.8, για την εντροπία. Η σύγκριση πραγματοποιήθηκε για ζώνες εύρους 1, 3 και 5 εικονοστοιχείων, σε σχέση με την ψηφιοποιημένη ακτογραμμή αναφοράς.

		Εύρος ζώνης (εικονοστοιχεία)		
ΠΛΗΡΟΤΗΤΑ		1	3	5
	Μέτρηση Εντροπίας	0.28302	0.61616	0.74696
ALM	Canny	0.62544	0.82773	0.88716
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.63312	0.85193	0.9146
ALM&ML	Canny	0.64151	0.83574	0.89397
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.63697	0.83574	0.89881
		Εύρος ζώνης (εικονοστοιχεία)		
ΟΡΘΟΤΗΤΑ		1	3	5
	Μέτρηση Εντροπίας	0.30258	0.63833	0.77912
ALM	Canny	0.63273	0.81859	0.88341
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.45323	0.63998	0.74201
ALM&ML	Canny	0.63839	0.82281	0.88757
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.59265	0.76824	0.84846
		Εύρος ζώνης (εικονοστοιχεία)		
ΠΟΙΟΤΗΤΑ		1	3	5
	Μέτρηση Εντροπίας	0.17128	0.45672	0.61642
ALM	Canny	0.45886	0.69943	0.79417
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.35895	0.57592	0.69393
ALM&ML	Canny	0.47053	0.70827	0.80303
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.44301	0.66746	0.77448

Πίνακας 4.17: 7^η Εφαρμογή, αξιολόγηση ανίχνευσης ακτογραμμής με: μέτρηση εντροπίας, Canny και την υλοποιημένη μεθοδολογία, για τις δυο μεθόδους προ-επεξεργασίας.

Με βάση τον παραπάνω πίνακα, παρατηρούνται τα εξής:

- Σε επίπεδο *πληρότητας*, η ανίχνευση των ακμών με προ-επεξεργασία την ALM συνδυαστικά με την ML έχει καλύτερα αποτελέσματα από την ALM. Ωστόσο, συνδυαστικά με την εντροπία – η οποία έχει, γενικά, πολύ χειρότερα αποτελέσματα σε σχέση με τον Canny – η **ανίχνευση των ακμών με προ-επεξεργασία την ALM, βάσει της υλοποιημένης μεθοδολογίας, παρουσιάζει αυξημένα επίπεδα πληρότητας, καλύτερα από τον Canny.**

- Σε επίπεδα *ορθότητας* και *ποιότητας*, η ανίχνευση των ακμών με προ-επεξεργασία την ALM συνδυαστικά με την ML έχει καλύτερα αποτελέσματα από την ALM. Ομοίως, συνδυαστικά με την εντροπία – η οποία έχει, γενικά, πολύ χειρότερα αποτελέσματα σε σχέση με τον Canny – **η ανίχνευση των ακμών με προ-επεξεργασία την ALM συνδυαστικά με την ML, βάσει της υλοποιημένης μεθοδολογίας, παρουσιάζει υψηλά επίπεδα ορθότητας και ολικής ποιότητας, ωστόσο μειωμένα σε σχέση με τον Canny.**
- Θα πρέπει, ωστόσο, να σημειωθεί ότι η συγκεκριμένη περίπτωση ακτογραμμής ήταν απλή. Ως εκ τούτου, η χρήση της εντροπίας σε πιο απαιτητικές απεικονίσεις είναι πολύ πιθανό να μην παρουσιάζει αποδεκτά αποτελέσματα, λόγω των μέτριων επιπέδων πληρότητας, ορθότητας και ολικής ποιότητας της τεχνικής.
- **Για εύρος ζώνης 1 εικονοστοιχείου** οι δείκτες αξιολόγησης, συνολικά, δεν κυμαίνονται σε ικανοποιητικά επίπεδα (μ.ό. πληρότητας 56,4%, μ.ό. ορθότητας 52,4%, μ.ό. ποιότητας 38,1%).
- **Για εύρος ζώνης 3 εικονοστοιχείων**, τα επίπεδα αξιολόγησης των ακμών, συνολικά, παρουσιάζονται ενθαρρυντικά (μ.ό. πληρότητας 79,3%, μ.ό. ορθότητας 73,8%, μ.ό. ποιότητας 62,2%). Για την υλοποιημένη μεθοδολογία με τις δύο μεθόδους προ-επεξεργασίας τα αντίστοιχα ποσοστά είναι τα εξής: μ.ό. πληρότητας 84,4%, μ.ό. ορθότητας 70,4% και μ.ό. ποιότητας 62,2%.
- **Για εύρος ζώνης 5 εικονοστοιχείων**, τα επίπεδα αξιολόγησης των ακμών, συνολικά, είναι πολύ καλά (μ.ό. πληρότητας 86,8%, μ.ό. ορθότητας 82,8%, μ.ό. ποιότητας 73,6%). Για την υλοποιημένη μεθοδολογία με τις δύο μεθόδους προ-επεξεργασίας τα αντίστοιχα ποσοστά είναι τα εξής: μ.ό. πληρότητας 90,7%, μ.ό. ορθότητας 79,5% και μ.ό. ποιότητας 73,4%.
- **Η υλοποιημένη μεθοδολογία για την εντροπία κρίνεται ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για χαρτογραφήσεις μέγιστης κλίμακας 1:5.000.**

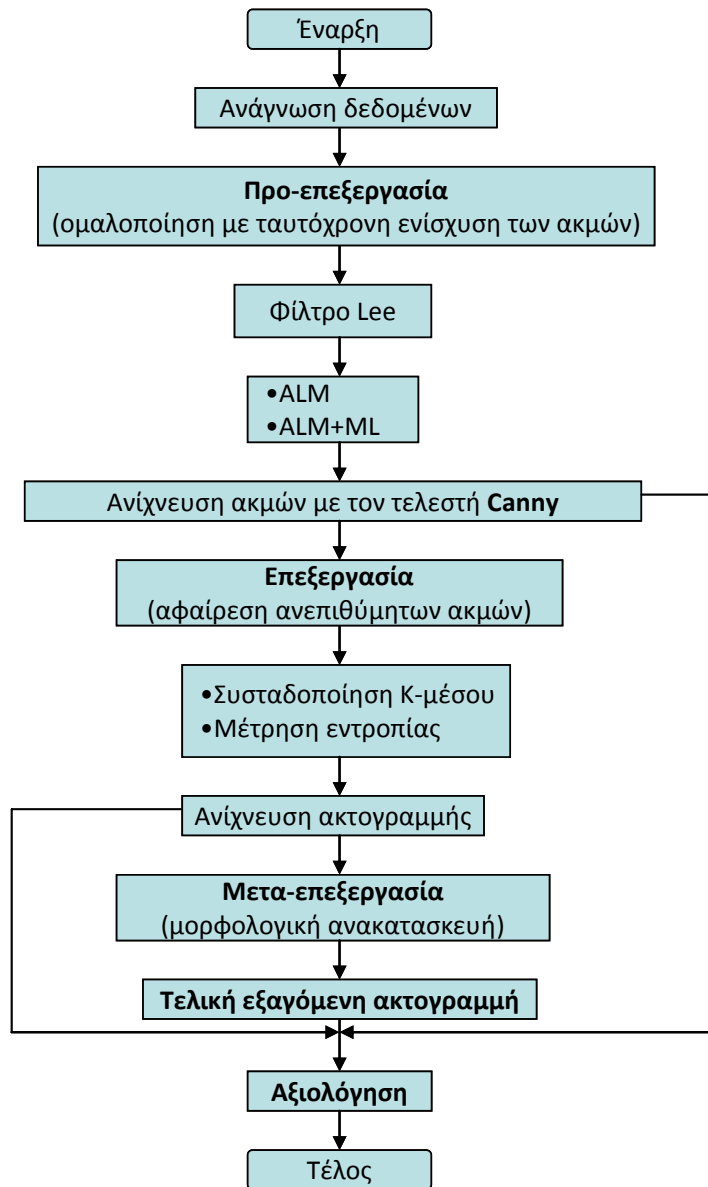
Συνοψίζοντας:

- Οι ακμές που ανιχνεύονται «υποφέρουν» από κενά και ασυνέχειες, το οποίο επηρεάζει αρνητικά την τελική εξαγωγή της ακτογραμμής. Παράλληλα, εξαρτώνται άμεσα από την ποιότητα και τη δυσκολία της απεικόνισης (π.χ. βράχια).
- Βάσει της αξιολόγησης, η χρήση της ALM συνδυαστικά με την ML παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με την ALM. Φωτοερμηνευτικά, δεν παρατηρήθηκαν έντονες διαφορές στην εξαγόμενη ακτογραμμή με χρήση συσταδοποίησης, για τις δύο μεθόδους προ-επεξεργασίας. Στην περίπτωση της εντροπίας παρατηρείται ότι με την ALM οι εναπομείνουσες ακμές είναι περισσότερες.
- Βάσει των κριτηρίων αξιολόγησης, η ανίχνευση των ακμών με τον Canny είχε πολύ καλά αποτελέσματα για εύρος ζώνης 3 και 5 εικονοστοιχείων. Επίσης, θα πρέπει να σημειωθεί ότι **η εξαγόμενη ακτογραμμή από τη συσταδοποίηση ως το όριο των δύο κλάσεων είχε, συνολικά, τα καλύτερα αποτελέσματα.** Τα επίπεδα ορθότητας και ολικής ποιότητας του υλοποιημένου αλγορίθμου συσταδοποίησης παρουσιάζονται καλύτερα από τον Canny και παρόμοια με αυτά της συσταδοποίησης (μέγιστη απόκλιση περίπου 2,5% για την ALM και 1%

για την ALM συνδυαστικά με ML). Τα επίπεδα πληρότητας του υλοποιημένου αλγορίθμου συσταδοποίησης δεν παρουσιάζουν διαφορές σε σχέση με τον Canny, ενώ καταγράφονται λίγο μειωμένα σε σχέση με τη συσταδοποίηση. Επομένως, **ο υλοποιημένος αλγόριθμος συσταδοποίησης έχει ενθαρρυντικά αποτελέσματα. Καταλληλότερη τεχνική προ-επεξεργασίας κρίνεται η ALM 200 επαναλήψεων συνδυαστικά με 5 επαναλήψεις ML.**

- Αν και η μέτρηση της εντροπίας παρουσιάζει μέτρια αποτελέσματα, βάσει των δεικτών αξιολόγησης, στην υλοποιημένη μεθοδολογία τα αποτελέσματα είναι ενθαρρυντικά, και μάλιστα σε επίπεδα πληρότητας καλύτερα από τον υλοποιημένο αλγόριθμο συσταδοποίησης. Ωστόσο, εκτιμάται ότι η χρήση της σε πιο απαιτητικές απεικονίσεις είναι πολύ πιθανό να μην παρουσιάζει αποδεκτά αποτελέσματα, λόγω των μέτρων επιπέδων πληρότητας, ορθότητας και ολικής ποιότητας της τεχνικής.
- Η τελική εξαγωγή της ακτογραμμής εξαρτάται – εκτός από την αρχική ανίχνευση των ακμών – και από την τεχνική επεξεργασίας και τα μορφολογικά εργαλεία που επιλέγονται για την ανακατασκευή της – συμπεριλαμβανομένου και του εύρους ζώνης.
- Η αξιολόγηση της εξαγόμενης ακτογραμμής εξαρτάται άμεσα από την ορθότητα της ψηφιοποίησης των δεδομένων αναφοράς, καθώς και από τη μετατροπή τους σε ψηφιδωτά δεδομένα.
- **Η υλοποιημένη μεθοδολογία κρίνεται ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί, με καλά αποτελέσματα, σε απεικονίσεις WORLDVIEW-2 διακριτικής ικανότητας 0,5 m, για χαρτογραφήσεις μέγιστης κλίμακας 1:5.000.**

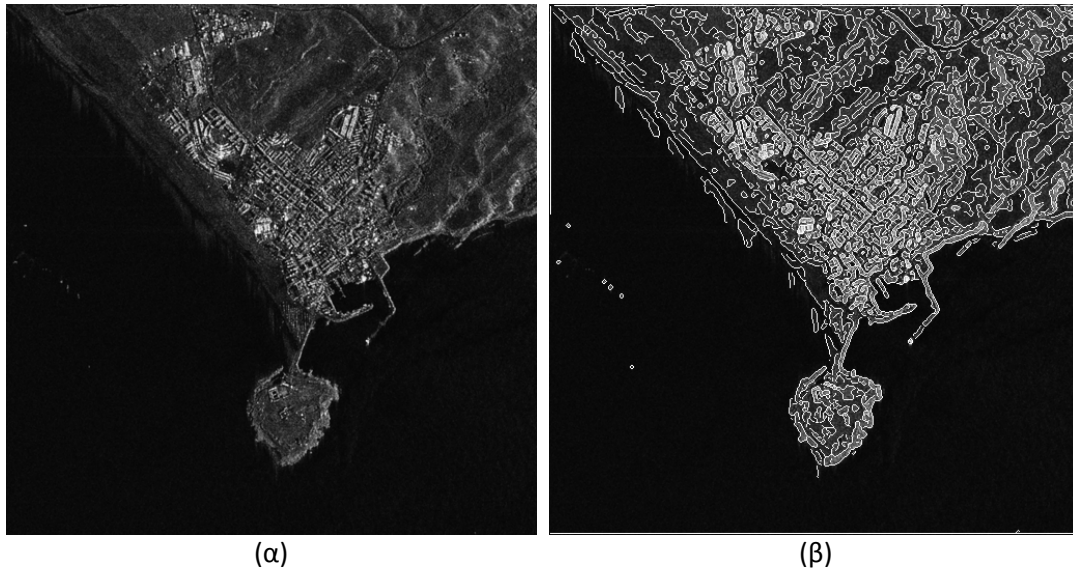
4.8 8^η Εφαρμογή – Περιοχή: Gibraltar (TERRASAR-X)



Σχήμα 4.9: 8^η Εφαρμογή, διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε, με σκοπό τη διερεύνηση ανίχνευσης ακτογραμμής με προηγμένες τεχνικές ομαλοποίησης και τον τελεστή Canny.

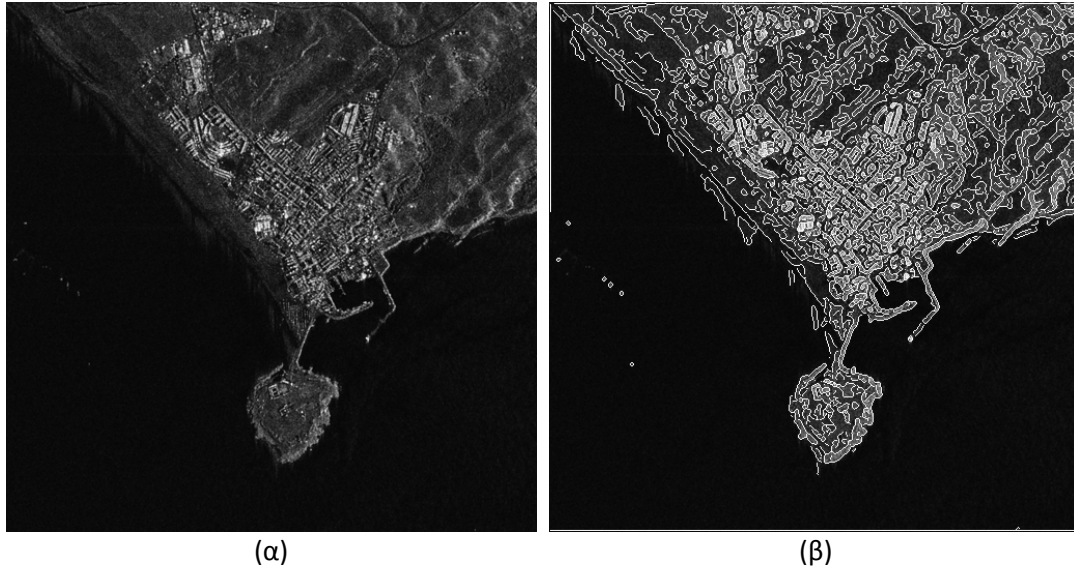
Όπως παρουσιάστηκε στο προηγούμενο εδάφιο, οι πιο αποτελεσματικές τεχνικές (από αυτές που εξετάστηκαν και για τις συγκεκριμένες εφαρμογές) ομαλοποίησης με ταυτόχρονη ενίσχυση των ακμών είναι η ανισοτροπική διάχυση ALM, καθώς και ο συνδυασμός της με ένα μικρό αριθμό επαναλήψεων μορφολογικής εξομάλυνσης. Κατά την εφαρμογή της ALM παρατηρήθηκε ότι τα καλύτερα αποτελέσματα δίνονται έπειτα από 100 επαναλήψεις. Η ανίχνευση των ακμών έγινε με τον βέλτιστο τελεστή Canny. Ωστόσο, όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.55(β), οι ακμές δεν είναι συνεχείς και αυτό αναδεικνύεται και στις υπόλοιπες τεχνικές, δημιουργώντας περαιτέρω προβλήματα. Της προ-επεξεργασίας των εικόνων

προηγήθηκε η εφαρμογή του φίλτρου Lee για την απαλοιφή της «κηλίδωσης», καθώς η σημασία της μείωσης του θορύβου υψηλής συχνότητας είναι πολύ μεγάλη για την ερμηνεία SAR εικόνων.



Εικόνα 4.55: 8^η Εφαρμογή, (α) απεικόνιση TERRASAR-X, (β) ανισοτροπική διάχυση ALM 100 επαναλήψεων και ανίχνευση ακμών με τον Canny.

Ο δεύτερος αλγόριθμος που υλοποιήθηκε περιλαμβάνει λίγες επαναλήψεις μορφολογικής εξομάλυνσης επικουρικά στην ενίσχυση των ακμών με την ALM, επιτυγχάνοντας μεγαλύτερη ομαλοποίηση κι επομένως απαλείφοντας κάποιες ανεπιθύμητες ακμές. Στην εικόνα 4.56(β) φαίνεται ότι πράγματι η χερσαία επιφάνεια είναι πιο ομαλοποιημένη. Η περιοχή που ιδιαίτερα ενδιαφέρει είναι κοντά στην ακτογραμμή, προκειμένου να απλοποιηθεί η ανίχνευσή της. Έπειτα από πληθώρα συνδυασμών, τα καλύτερα αποτελέσματα δόθηκαν έπειτα από 100 επαναλήψεις ALM και 10 επαναλήψεις ML. Τα προβλήματα που ανέκυψαν είναι τα ίδια με αυτά που παρουσιάστηκαν για την ALM.



Εικόνα 4.56: 8^η Εφαρμογή, (α) απεικόνιση TERRASAR-X, (β) ανισοτροπική διάχυση ALM 100 επαναλήψεων, μορφολογική εξομάλυνση ML 10 επαναλήψεων και ανίχνευση ακμών με τον Canny.

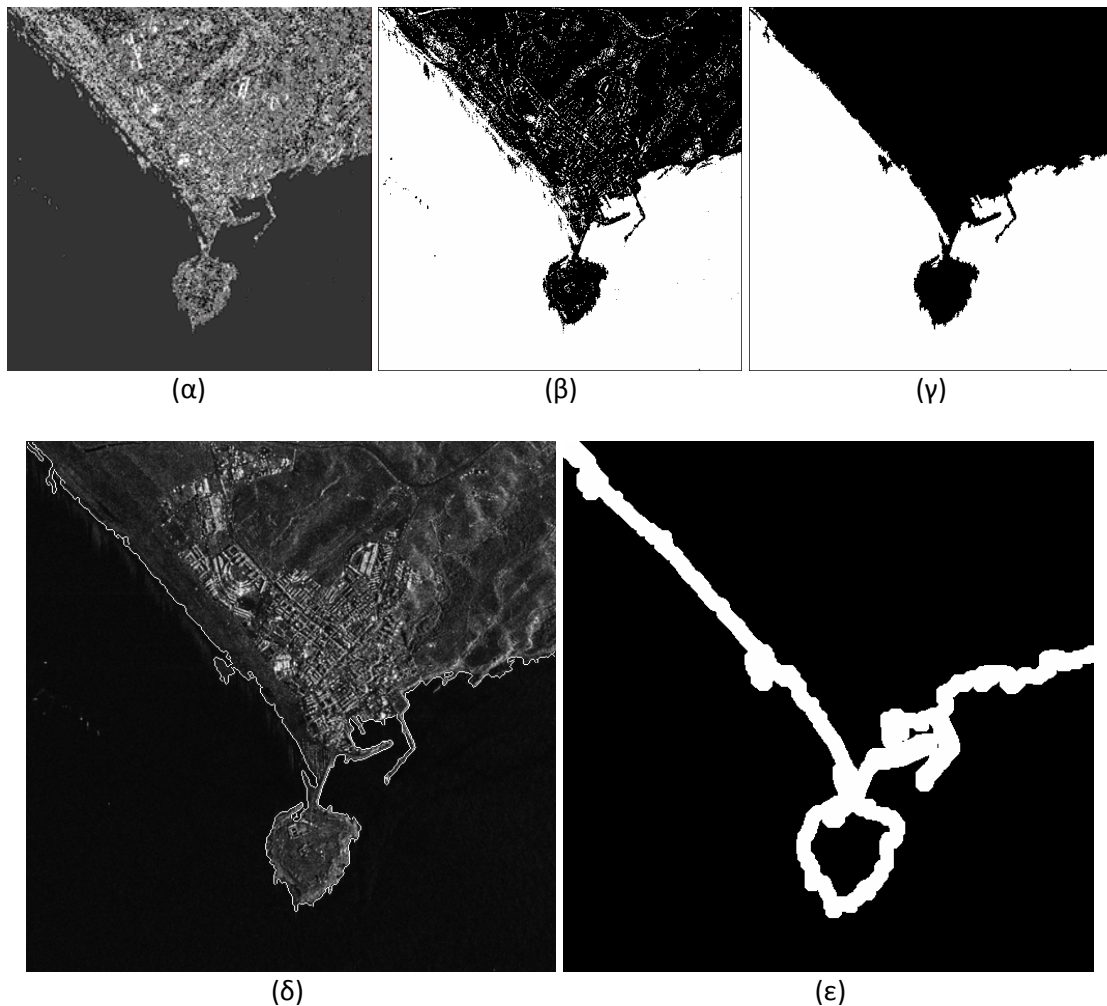
Συνοψίζοντας, το βασικό πρόβλημα που αναδείχτηκε κατά την ανίχνευση ακμών ήταν η ασυνέχειά τους.

Σημειώνεται ότι αν και οι εφαρμογές 8 και 9 αποτελούν τμήματα της ίδιας απεικόνισης, ωστόσο χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές τεχνικές και παράμετροι αυτών, λόγω προγραμματιστικής δυσκολίας.

Για την αφαίρεση των ανεπιθύμητων ακμών χρησιμοποιήθηκαν: (α) συσταδοποίηση K-μέσου, και (β) μέτρηση της εντροπίας. Ωστόσο, έχει ήδη τονιστεί ότι η χρήση τεχνικών που σχετίζονται με τις τιμές φωτεινότητας του γκρι δεν είναι πάντα χρήσιμη στην επεξεργασία SAR απεικονίσεων, επειδή η θάλασσα δεν χαρακτηρίζεται γενικά από ενιαίες τιμές φωτεινότητας. Στη συνέχεια επισυνάπτονται και αναλύονται οι παράμετροι της εκάστοτε τεχνικής, καθώς και τα αποτελέσματα που προέκυψαν.

Συσταδοποίηση K-μέσου

Η συγκεκριμένη απεικόνιση κατηγοριοποιήθηκε σε έξι κλάσεις (εικόνα 4.57(α)). Έπειτα από την απαλοιφή κάποιων μικρών αντικειμένων της χερσαίας και της υδάτινης επιφάνειας, προέκυψε ο τελικός διαχωρισμός της απεικόνισης σε δύο κλάσεις (εικόνα 4.57(γ)), και η ανίχνευση της θέσης της ακτογραμμής ως το όριο των δύο επιφανειών (εικόνα 4.57(δ)).

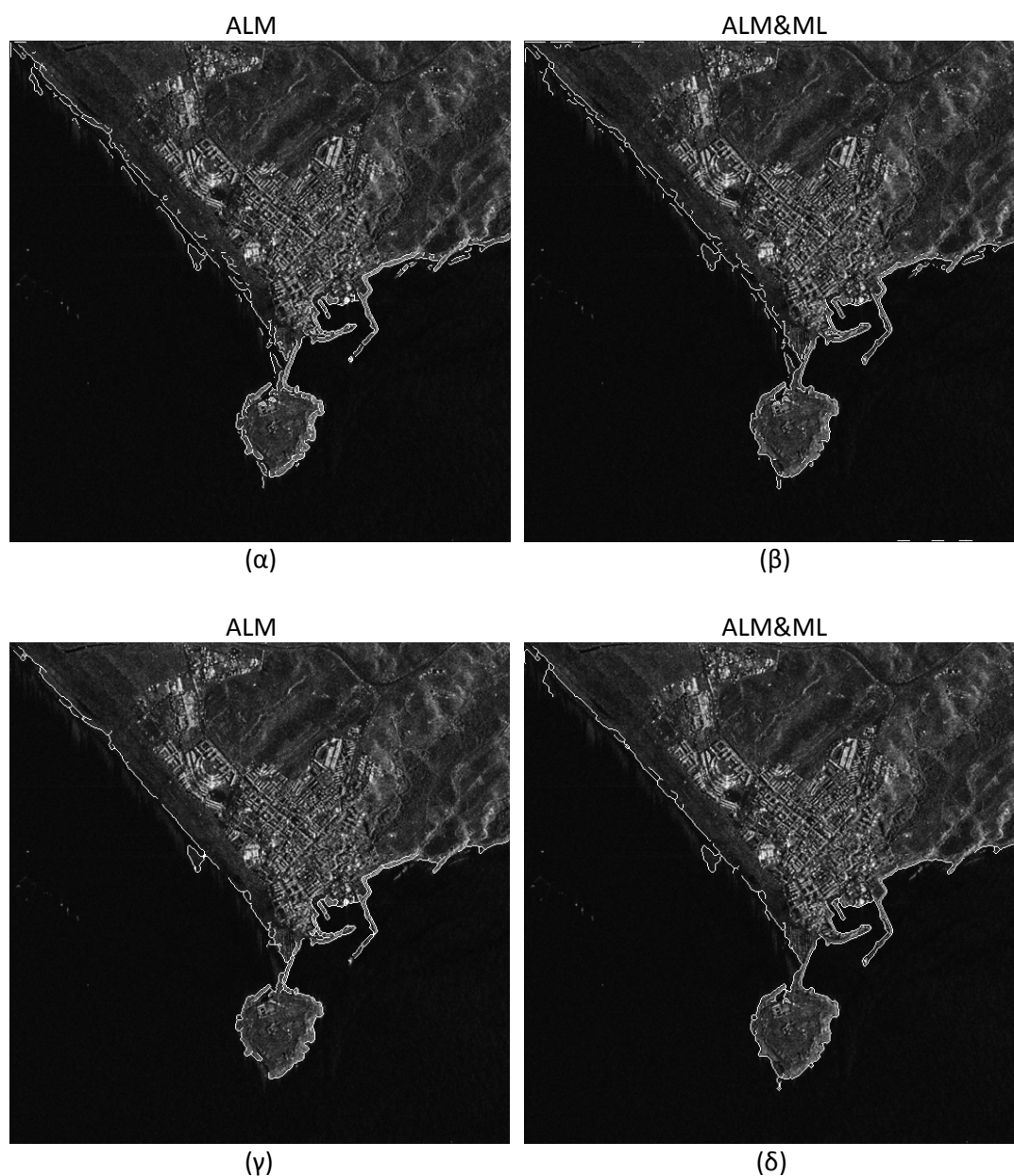


Εικόνα 4.57: 8^η Εφαρμογή, (α) συσταδοποίηση Κ-μέσου σε έξι κλάσεις, (β) διαχωρισμός χερσαίας-υδάτινης επιφάνειας σε δύο κλάσεις, (γ) αφαίρεση μικρών αντικειμένων της χερσαίας και της υδάτινης επιφάνειας, (γ) υπέρθεση ακτογραμμής στην αρχική απεικόνιση έπειτα από συσταδοποίηση Κ-μέσου, (ε) εύρος ζώνης 7 εικονοστοιχείων στην ακτογραμμή που προκύπτει από τη συσταδοποίηση.

Όπως φαίνεται στην εικόνα 4.57(γ), φωτοερμηνευτικά η συσταδοποίηση δεν είναι επιτυχής για κάποια εικονοστοιχεία της απεικόνισης. Αν και πρόκειται για SAR απεικόνιση, δεν είναι βάσιμο ότι η «αδυναμία» της ορθής συσταδοποίησης κάποιων εικονοστοιχείων οφείλεται σε αυτό, για δυο λόγους. Αφενός, σε επίπεδο φωτοερμηνείας η θέση της ακτογραμμής κρίνεται ικανοποιητική για το μεγαλύτερο τμήμα της, αφετέρου η συσταδοποίηση παρουσίασε χειρότερα αποτελέσματα σε κάποιες απεικονίσεις ηλεκτρο-οπτικών αισθητήρων. Η δημιουργία περισσότερων κλάσεων προκειμένου να αποφευχθούν οι εσφαλμένες αντιστοιχίσεις στις κλάσεις, δεν ήταν επιτυχής. Γενικότερα, σε επίπεδο φωτοερμηνείας, η θέση της ακτογραμμής κρίνεται ικανοποιητική για το μεγαλύτερο τμήμα της, γεγονός το οποίο επιβεβαιώνεται και από τους δείκτες αξιολόγησης (πίνακας 4.18).

Στην ακτογραμμή που προέκυψε ως το όριο των δύο κλάσεων τέθηκε ένα εύρος ζώνης 7 εικονοστοιχείων στην περίπτωση προ-επεξεργασίας με την ALM (εικόνα 4.57(ε)) και 6 εικονοστοιχείων στην περίπτωση προ-επεξεργασίας με την ALM

συνδυαστικά με την ML, με σκοπό την αφαίρεση ανεπιθύμητων ακμών. Το εύρος ζώνης τέθηκε στις εικόνες ακμών και που είχαν αρχικά υποστεί προ-επεξεργασία με: (α) ALM 100 επαναλήψεων (εικόνα 4.55(β)), και (β) ALM 100 επαναλήψεων συνδυαστικά με ML 10 επαναλήψεων (εικόνα 4.56(β)). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στις εικόνες 4.58(α) και 4.58(β), αντίστοιχα. Και στις δυο περιπτώσεις προ-επεξεργασίας, η εξαγόμενη ακτογραμμή προκύπτει, τελικά, χρησιμοποιώντας τα μορφολογικά εργαλεία `bwareaopen`, `bwmorph (bridge, thin)` και `imclose (bwareaopen → bwmorph (bridge) → bwareaopen → imclose → bwmorph (bridge) → bwmorph (thin) → bwareaopen)`, αφαιρώντας τις μικρές εναπομείνουσες ακμές (εικόνας 4.58(γ) και 4.58(δ)).



Εικόνα 4.58: 8^η Εφαρμογή, υπέρθεση των ακμών εντός του εύρους ζώνης (εικόνα 4.57(ε)) στην αρχική απεικόνιση και τελική θέση ακτογραμμής, αντίστοιχα, έπειτα από προ-επεξεργασία με (α), (γ) ALM και (β), (δ) ALM συνδυαστικά με ML.

Η τελική θέση της ακτογραμμής προέκυψε από την αρχική ανίχνευση ακμών με τον τελεστή Canny. Σε επίπεδο φωτοερμηνείας για τις δύο μεθόδους προ-επεξεργασίας, παρατηρείται ότι με την ALM οι εναπομείνουσες ακμές είναι περισσότερες. Επιπλέον, όπως σημειώθηκε, παρουσιάζονται λίγες ασυνέχειες (εικόνες 4.58(γ) και 4.58(δ)). Τα κενά αυτά – τα οποία παρατηρούνται μεγαλύτερα για την ALM σε σχέση με το συνδυασμό της με την ML – οφείλονται στην αρχική ανίχνευση των ακμών από τον Canny, καθώς κάποια τμήματα της ακτογραμμής δεν είχαν ανιχνευτεί και στη μετα-επεξεργασία της απεικόνισης – για να αφαιρεθούν οι εναπομείνουσες ακμές αφαιρέθηκαν και κάποια μικρά τμήματα της ακτογραμμής. Στην περίπτωση απαλοιφής περισσότερων ακμών, θα αφαιρούνταν και μεγαλύτερα τμήματα ακτογραμμής – λόγω και της ασυνεχειάς της. Επιπλέον, εάν είχε τεθεί μεγαλύτερο εύρος ζώνης ούτως ώστε να διατηρηθεί μεγαλύτερο τμήμα της, θα υπήρχαν πολύ περισσότερες εναπομείνουσες ακμές.

Στη συνέχεια παρατίθεται αξιολόγηση βάσει των κριτηρίων πληρότητας, ορθότητας και ποιότητας, για τρία προϊόντα ακτογραμμής: (α) ανίχνευση μόνο με τον Canny, (β) εξαγωγή μόνο από συσταδοποίηση K-μέσου ως το όριο των δύο κλάσεων, και (γ) εξαγωγή βάσει της μεθοδολογίας που περιγράφηκε στο διάγραμμα ροής του σχήματος 4.9, για την συσταδοποίηση. Η σύγκριση πραγματοποιήθηκε για ζώνες εύρους 1, 3 και 5 εικονοστοιχείων, σε σχέση με την ψηφιοποιημένη ακτογραμμή αναφοράς.

		Εύρος ζώνης (εικονοστοιχεία)		
ΠΛΗΡΟΤΗΤΑ		1	3	5
	Συσταδοποίηση K-μέσου	0.55885	0.78475	0.86947
ALM	Canny	0.57656	0.77325	0.84626
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.55758	0.76084	0.83827
ALM&ML	Canny	0.56492	0.77883	0.87047
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.55505	0.76642	0.85933
		Εύρος ζώνης (εικονοστοιχεία)		
ΟΡΘΟΤΗΤΑ		1	3	5
	Συσταδοποίηση K-μέσου	0.45227	0.66764	0.74764
ALM	Canny	0.42571	0.61253	0.70584
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.43937	0.62549	0.7164
ALM&ML	Canny	0.4848	0.6679	0.75143
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.47161	0.64959	0.72889

ΠΟΙΟΤΗΤΑ		Εύρος ζώνης (εικονοστοιχεία)		
		1	3	5
	Συσταδοποίηση K-μέσου	0,33328	0.5643	0.67219
ALM	Canny	0.32432	0.51926	0.62562
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.32579	0.52272	0.6294
ALM&ML	Canny	0.353	0.56142	0.67586
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.34223	0.54224	0.65119

Πίνακας 4.18: 8^η Εφαρμογή, αξιολόγηση ανίχνευσης ακτογραμμής με: συσταδοποίηση K-μέσου, Canny και την υλοποιημένη μεθοδολογία, για τις δυο μεθόδους προ-επεξεργασίας.

Με βάση τον παραπάνω πίνακα, παρατηρούνται τα εξής:

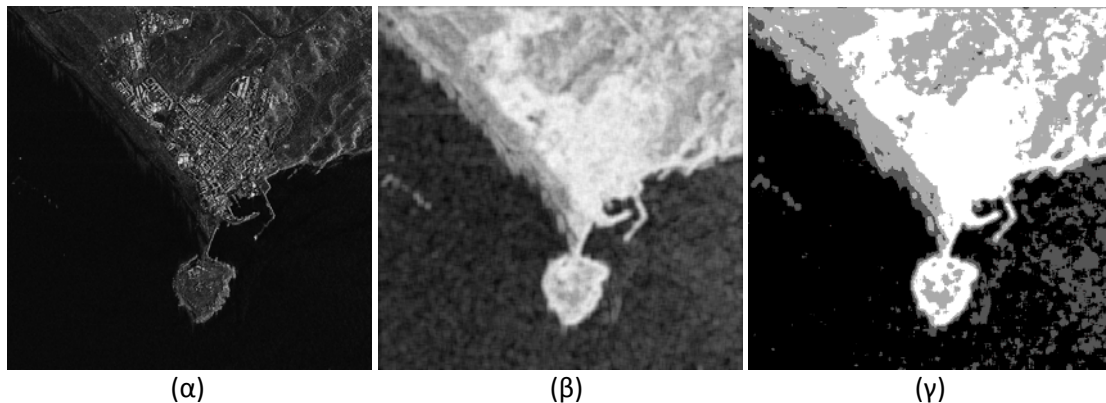
- Σε επίπεδο *πληρότητας*, η ανίχνευση των ακμών με προ-επεξεργασία την ALM συνδυαστικά με την ML έχει καλύτερα αποτελέσματα από την ALM. Ομοίως, συνδυαστικά με τη συσταδοποίηση – η οποία έχει, γενικά, παρόμοια αποτελέσματα με τον Canny – **η ανίχνευση των ακμών με προ-επεξεργασία την ALM συνδυαστικά με την ML, βάσει της υλοποιημένης μεθοδολογίας, παρουσιάζει αυξημένα επίπεδα πληρότητας, πολύ κοντά στον Canny και τη συσταδοποίηση.**
- Σε επίπεδο *ορθότητας*, η ανίχνευση των ακμών με προ-επεξεργασία την ALM συνδυαστικά με την ML έχει καλύτερα αποτελέσματα από την ALM. Ομοίως, συνδυαστικά με τη συσταδοποίηση – η οποία παρουσιάζει ελαφρώς μειωμένα αποτελέσματα σε σχέση με την ALM συνδυαστικά με την ML, και καλύτερα σε σχέση με την ALM – **η ανίχνευση των ακμών με προ-επεξεργασία την ALM συνδυαστικά με την ML, βάσει της υλοποιημένης μεθοδολογίας, παρουσιάζει αυξημένα επίπεδα ορθότητας, αν και είναι λίγο πιο μειωμένα σε σχέση με τον Canny και τη συσταδοποίηση.**
- Σε επίπεδο *ποιότητας*, η ανίχνευση των ακμών με προ-επεξεργασία την ALM συνδυαστικά με την ML έχει καλύτερα αποτελέσματα από την ALM. Η συσταδοποίηση παρουσιάζει παρόμοια αποτελέσματα σε σχέση με την ALM συνδυαστικά με την ML, και καλύτερα σε σχέση με την ALM. **Η ανίχνευση των ακμών με προ-επεξεργασία την ALM συνδυαστικά με την ML, βάσει της υλοποιημένης μεθοδολογίας, παρουσιάζει αυξημένα επίπεδα ολικής ποιότητας, αν και είναι λίγο πιο μειωμένα σε σχέση με τον Canny και τη συσταδοποίηση.** Σημειώνεται ότι η ανίχνευση των ακμών με προ-επεξεργασία την ALM, βάσει της υλοποιημένης μεθοδολογίας, παρουσιάζει υψηλότερα επίπεδα ολικής ποιότητας σε σχέση με τον Canny. Ωστόσο, είναι μειωμένα συγκριτικά με τη συσταδοποίηση και τον υλοποιημένο αλγόριθμο συσταδοποίησης με προ-επεξεργασία την ALM συνδυαστικά με την ML.
- **Για εύρος ζώνης 1 εικονοστοιχείου** οι δείκτες αξιολόγησης, συνολικά, δεν κυμαίνονται σε ικανοποιητικά επίπεδα (μ.ό. πληρότητας 56,3%, μ.ό ορθότητας 45,5%, μ.ό ποιότητας 33,6%). Η συγκεκριμένη απεικόνιση έχει διακριτική ικανότητα 3 m, και η δεδομένη ζώνη (3 εικονοστοιχεία → ± 3m) αντιστοιχεί σε κλίμακα χαρτογράφησης 1:18.000.

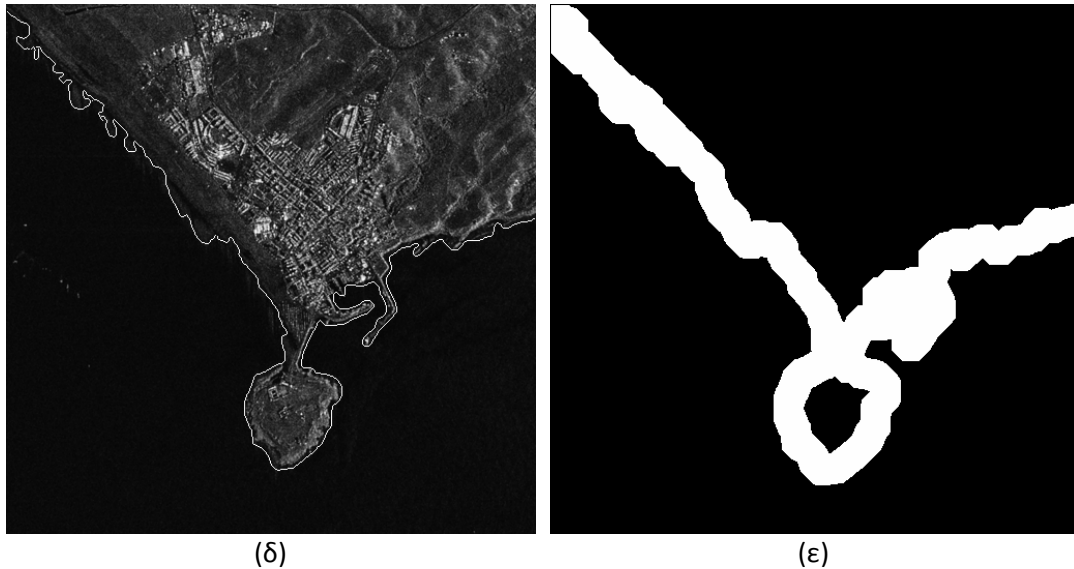
- **Για εύρος ζώνης 3 εικονοστοιχείων**, τα επίπεδα πληρότητας και ορθότητας των ακμών, συνολικά, είναι ενθαρρυντικά (μ.ό. πληρότητας 72,3%, μ.ό ορθότητας 64,5%) και μειωμένα παρατηρούνται μόνο για την ολική ποιότητα των ακμών (μ.ό ποιότητας 54,2%). Για την υλοποιημένη μεθοδολογία με τις δύο μεθόδους προ-επεξεργασίας τα αντίστοιχα ποσοστά είναι τα εξής: μ.ό. πληρότητας 76,4%, μ.ό ορθότητας 63,8% και μ.ό ποιότητας 53,3%. Η δεδομένη ζώνη (5 εικονοστοιχεία $\rightarrow \pm 6m$) αντιστοιχεί σε κλίμακα χαρτογράφησης 1:30.000.
- **Για εύρος ζώνης 5 εικονοστοιχείων**, τα επίπεδα αξιολόγησης των ακμών, συνολικά, είναι πολύ καλά (μ.ό. πληρότητας 85,7%, μ.ό ορθότητας 73%, μ.ό ποιότητας 65,1%). Για την υλοποιημένη μεθοδολογία με τις δύο μεθόδους προ-επεξεργασίας τα αντίστοιχα ποσοστά είναι τα εξής: μ.ό. πληρότητας 84,9%, μ.ό ορθότητας 72,3% και μ.ό ποιότητας 64%. Η δεδομένη ζώνη (9 εικονοστοιχεία $\rightarrow \pm 12m$) αντιστοιχεί σε κλίμακα χαρτογράφησης 1:54.000.
- **Η υλοποιημένη μεθοδολογία για τη συσταδοποίηση κρίνεται ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για χαρτογραφήσεις μέγιστης κλίμακας 1:54.000.**

Σημειώνεται ότι η ακτογραμμή που ανιχνεύτηκε μόνο με τον Canny και χρησιμοποιείται στην αξιολόγηση, προέκυψε από τα δεδομένα αναφοράς με χρήση εύρους ζώνης 7 εικονοστοιχείων και μορφολογικών εργαλείων.

Εντροπία

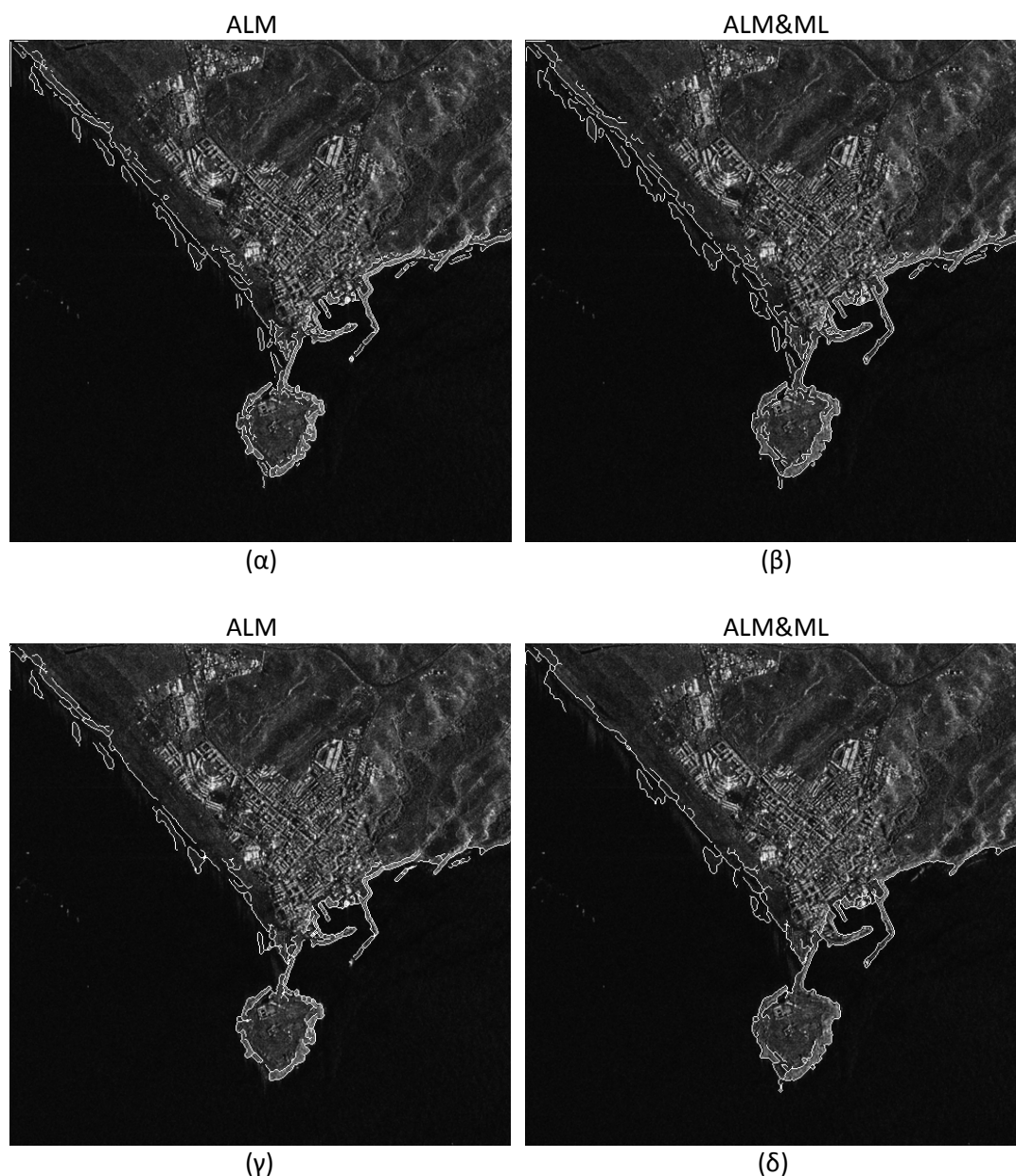
Στη συγκεκριμένη απεικόνιση η μέτρηση της εντροπίας με χρήση της πολυεπίπεδης κατωφλίωσης έχει μέτρια αποτελέσματα, σε αντίθεση ωστόσο με την υλοποιημένη μεθοδολογία. Έπειτα από τη μέτρηση της εντροπίας και αρκετές δοκιμές, η απεικόνιση κατωφλιώθηκε σε τέσσερα επίπεδα. Στις εικόνες που επισυνάπτονται παρουσιάζεται και η εξαγωγή της ακτογραμμής έπειτα από μορφολογική επεξεργασία του προϊόντος της πολυεπίπεδης κατωφλίωσης. Φαίνεται ότι δεν εντοπίζεται σωστά η ακτογραμμή, δηλαδή ως το όριο της χερσαίας και της υδάτινης επιφάνειας, η οποία είναι πολύ μετατοπισμένη από την αληθή της θέση. Σημειώνεται ότι η εξαγωγή της ακτογραμμής με συγχώνευση πληροφορίας (fusion) είναι πολύ πιθανό να δίνει πολύ καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με την πολυεπίπεδη κατωφλίωση.





Εικόνα 4.59: 8^η Εφαρμογή, (α) απεικόνιση TERRASAR-X, (β) ανάλυση υψής με μέτρηση της εντροπίας, (γ) κατωφλίωση τεσσάρων επιπέδων στην εικόνα υψής, (δ) υπέρθεση ακτογραμμής στην αρχική απεικόνιση έπειτα από μέτρηση της εντροπίας, (ε) εύρος ζώνης 15 εικονοστοιχείων στην ακτογραμμή που προκύπτει από την εντροπία.

Ωστόσο, επειδή στόχος της εφαρμογής είναι η **διερεύνηση** της αποτελεσματικότητας της υλοποιημένης μεθοδολογίας σε SAR απεικονίσεις και η τελική θέση της ακτογραμμής προκύπτει από τον Canny, τέθηκε ένα εύρος ζώνης 15 και 16 εικονοστοιχείων για την ALM (εικόνα 4.59(ε)) και την ALM συνδυαστικά με ML, αντίστοιχα, με σκοπό την αφαίρεση ανεπιθύμητων ακμών. Το εύρος ζώνης τέθηκε στις εικόνες ακμών και που είχαν αρχικά υποστεί προ-επεξεργασία με: (α) ALM 100 επαναλήψεων (εικόνα 4.55(β)), και (β) ALM 100 επαναλήψεων συνδυαστικά με ML 10 επαναλήψεων (εικόνα 4.56(β)). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στις εικόνες 4.60(α) και 4.60(β), αντίστοιχα. Και στις δύο περιπτώσεις προ-επεξεργασίας η εξαγόμενη ακτογραμμή προκύπτει, τελικά, χρησιμοποιώντας τα μορφολογικά εργαλεία `bwareaopen`, `bwmorph (bridge, thin)` και `imclose (bwareaopen → bwmorph (bridge) → bwareaopen → imclose → bwmorph (bridge) → bwmorph (thin) → bwareaopen)`, αφαιρώντας τις μικρές εναπομείνουσες ακμές (εικόνας 4.60(γ) και 4.60(δ)).



Εικόνα 4.60: 8^η Εφαρμογή, υπέρθεση των ακμών εντός του εύρους ζώνης (εικόνα 4.59(ε)) στην αρχική απεικόνιση και τελική θέση ακτογραμμής, αντίστοιχα, έπειτα από προ-επεξεργασία με (α), (γ) ALM και (β), (δ) ALM συνδυαστικά με ML.

Η τελική θέση της ακτογραμμής προέκυψε από την αρχική ανίχνευση ακμών με τον τελεστή Canny. Σε επίπεδο φωτοερμηνείας για τις δύο μεθόδους προ-επεξεργασίας, παρατηρείται ότι με την ALM οι εναπομείνουσες ακμές είναι περισσότερες. Επιπλέον, όπως σημειώθηκε, παρουσιάζονται λίγες ασυνέχειες (εικόνες 4.60(γ) και 4.60(δ)). Τα κενά αυτά – τα οποία παρατηρούνται μεγαλύτερα για την ALM σε σχέση με το συνδυασμό της με την ML – οφείλονται στην αρχική ανίχνευση των ακμών από τον Canny, καθώς κάποια τμήματα της ακτογραμμής δεν είχαν ανιχνευτεί και στη μετα-επεξεργασία της απεικόνισης – για να αφαιρεθούν οι εναπομείνουσες ακμές αφαιρέθηκαν και κάποια μικρά τμήματα της ακτογραμμής. Στην περίπτωση απαλοιφής περισσότερων ακμών, θα αφαιρούνταν και μεγαλύτερα τμήματα ακτογραμμής – λόγω και της ασυνεχιάς της. Επιπλέον, εάν είχε τεθεί

μεγαλύτερο εύρος ζώνης ούτως ώστε να διατηρηθεί μεγαλύτερο τμήμα της, θα υπήρχαν πολύ περισσότερες εναπομείνουσες ακμές.

Στη συνέχεια παρατίθεται αξιολόγηση βάσει των κριτηρίων πληρότητας, ορθότητας και ποιότητας, για τρία προϊόντα ακτογραμμής: (α) ανίχνευση μόνο με τον Canny, (β) εξαγωγή μόνο από την εντροπία, και (γ) εξαγωγή βάσει της μεθοδολογίας που περιγράφηκε στο διάγραμμα ροής του σχήματος 4.9, για την εντροπία. Η σύγκριση πραγματοποιήθηκε για ζώνες εύρους 1, 3 και 5 εικονοστοιχείων, σε σχέση με την ψηφιοποιημένη ακτογραμμή αναφοράς.

		Εύρος ζώνης (εικονοστοιχεία)		
ΠΛΗΡΟΤΗΤΑ		1	3	5
	Μέτρηση Εντροπίας	0.15262	0.47308	0.64717
ALM	Canny	0.57656	0.77325	0.84626
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.58188	0.81799	0.8993
ALM&ML	Canny	0.56492	0.77883	0.87047
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.57099	0.79943	0.89108
		Εύρος ζώνης (εικονοστοιχεία)		
ΟΡΘΟΤΗΤΑ		1	3	5
	Μέτρηση Εντροπίας	0.1465	0.4554	0.59444
ALM	Canny	0.42571	0.61253	0.70584
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.29768	0.44814	0.54278
ALM&ML	Canny	0.4848	0.6679	0.75143
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.3466	0.49601	0.58047
		Εύρος ζώνης (εικονοστοιχεία)		
ΠΟΙΟΤΗΤΑ		1	3	5
	Μέτρηση Εντροπίας	0.080788	0.30214	0.44894
ALM	Canny	0.32432	0.51926	0.62562
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.24523	0.40751	0.51168
ALM&ML	Canny	0.353	0.56142	0.67586
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.27499	0.44112	0.54201

Πίνακας 4.19: 8^η Εφαρμογή, αξιολόγηση ανίχνευσης ακτογραμμής με: μέτρηση εντροπίας, Canny και την υλοποιημένη μεθοδολογία, για τις δυο μεθόδους προ-επεξεργασίας.

Με βάση τον παραπάνω πίνακα, παρατηρούνται τα εξής:

- Σε επίπεδο **πληρότητας**, η ανίχνευση των ακμών με προ-επεξεργασία την ALM συνδυαστικά με την ML έχει καλύτερα αποτελέσματα από την ALM. Ωστόσο, συνδυαστικά με την εντροπία – η οποία έχει, γενικά, χειρότερα αποτελέσματα από τον Canny – **η ανίχνευση των ακμών με προ-επεξεργασία την ALM, βάσει της υλοποιημένης μεθοδολογίας, παρουσιάζει αυξημένα επίπεδα πληρότητας, υψηλότερα από τον Canny.**

- Σε επίπεδα *ορθότητας* και *ποιότητας*, η ανίχνευση των ακμών με προ-επεξεργασία την ALM συνδυαστικά με την ML έχει καλύτερα αποτελέσματα από την ALM. Ομοίως και για την υλοποιημένη μεθοδολογία, αν και **τα αποτελέσματα είναι πολύ μειωμένα, σε σχέση με την αρχική ανίχνευση, και μη αποδεκτά. Αυτό οφείλεται κυρίως στην εντροπία, η οποία δεν παρουσιάζει καλά αποτελέσματα.**
- Για εύρος ζώνης 1 εικονοστοιχείου οι δείκτες αξιολόγησης, συνολικά, δεν κυμαίνονται σε ικανοποιητικά επίπεδα (μ.ό. πληρότητας 37,4%, μ.ό ορθότητας 34%, μ.ό ποιότητας 25,6%).
- Ομοίως και για εύρος ζώνης 3 εικονοστοιχείων, κυρίως λόγω της εντροπίας, εκτός της πληρότητας (μ.ό. πληρότητας 72,9%, μ.ό ορθότητας 53,6%, μ.ό ποιότητας 44,6%).
- Ομοίως και για εύρος ζώνης 5 εικονοστοιχείων, κυρίως λόγω της εντροπίας, εκτός της πληρότητας (μ.ό. πληρότητας 83,1%, μ.ό ορθότητας 63,5%, μ.ό ποιότητας 56,1%).

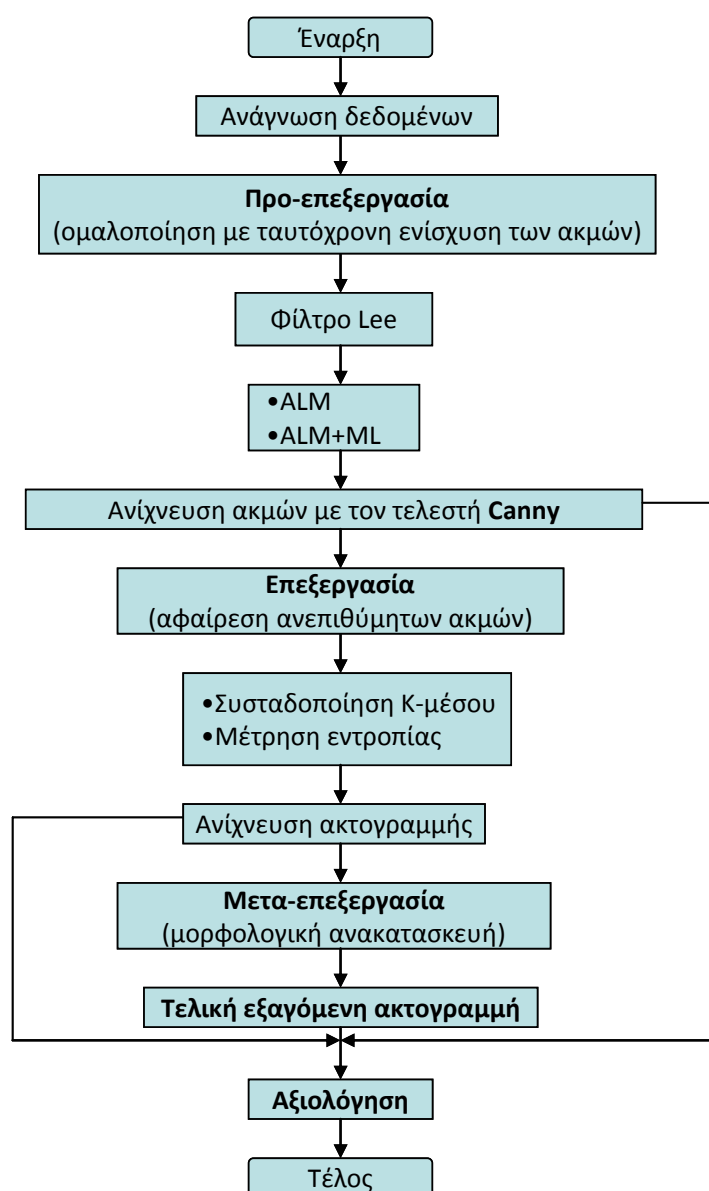
Συνοψίζοντας:

- Οι ακμές που ανιχνεύονται «υποφέρουν» από κενά και ασυνέχειες, το οποίο επηρεάζει αρνητικά την τελική εξαγωγή της ακτογραμμής. Παράλληλα, εξαρτώνται άμεσα από την ποιότητα και τη δυσκολία της απεικόνισης.
- Βάσει της αξιολόγησης, η χρήση της ALM συνδυαστικά με την ML παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με την ALM. Σε επίπεδο φωτοερμηνείας για τις δύο μεθόδους προ-επεξεργασίας, παρατηρείται ότι με την ALM οι εναπομείνουσες ακμές και οι ασυνέχειες είναι περισσότερες.
- Βάσει των κριτηρίων αξιολόγησης, η ανίχνευση των ακμών με τον Canny είχε καλά αποτελέσματα για εύρος ζώνης 3 και 5 εικονοστοιχείων. Η συσταδοποίηση K-μέσου είχε καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με την ALM (Canny και υλοποιημένη μεθοδολογία). Στην περίπτωση προ-επεξεργασίας με την ALM συνδυαστικά με ML, η συσταδοποίηση είχε παρόμοια αποτελέσματα με τον Canny, ενώ ο υλοποιημένος αλγόριθμος δεν παρουσιάζει έντονες διαφορές και για εύρος ζώνης 3 και 5 εικονοστοιχείων οι δείκτες κυμαίνονται σε ικανοποιητικά επίπεδα. Επομένως, **ο υλοποιημένος αλγόριθμος συσταδοποίησης έχει ενθαρρυντικά αποτελέσματα**, δεδομένου ότι τεχνικές που σχετίζονται με τις τιμές φωτεινότητας του γκρι στις εικόνες δεν ενδείκνυνται για SAR απεικονίσεις. **Καταλληλότερη τεχνική προ-επεξεργασίας κρίνεται η ALM 100 επαναλήψεων συνδυαστικά με 10 επαναλήψεις ML.**
- Η μέθοδος που αναπτύχθηκε βάσει της εντροπίας δεν είχε καλά αποτελέσματα – εκτός της πληρότητας. Σημειώνεται ότι η εξαγωγή της ακτογραμμής με συγχώνευση πληροφορίας (fusion) είναι πολύ πιθανό να δίνει πολύ καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με την πολυεπίπεδη κατωφλίωση.
- Η τελική εξαγωγή της ακτογραμμής εξαρτάται – εκτός από την αρχική ανίχνευση των ακμών – και από την τεχνική επεξεργασίας και τα μορφολογικά εργαλεία που επιλέγονται για την ανακατασκευή της – συμπεριλαμβανομένου και του εύρους ζώνης.
- Η αξιολόγηση της εξαγόμενης ακτογραμμής εξαρτάται άμεσα από την ορθότητα της ψηφιοποίησης των δεδομένων αναφοράς, καθώς και από τη μετατροπή

τους σε ψηφιδωτά δεδομένα. Στη συγκεκριμένη απεικόνιση, επειδή η επαναφορά της στις αρχικές της διαστάσεις έγινε από μεγαλύτερης διάστασης εικόνα, παρουσιάστηκαν κενά στην ακτογραμμή αναφοράς.

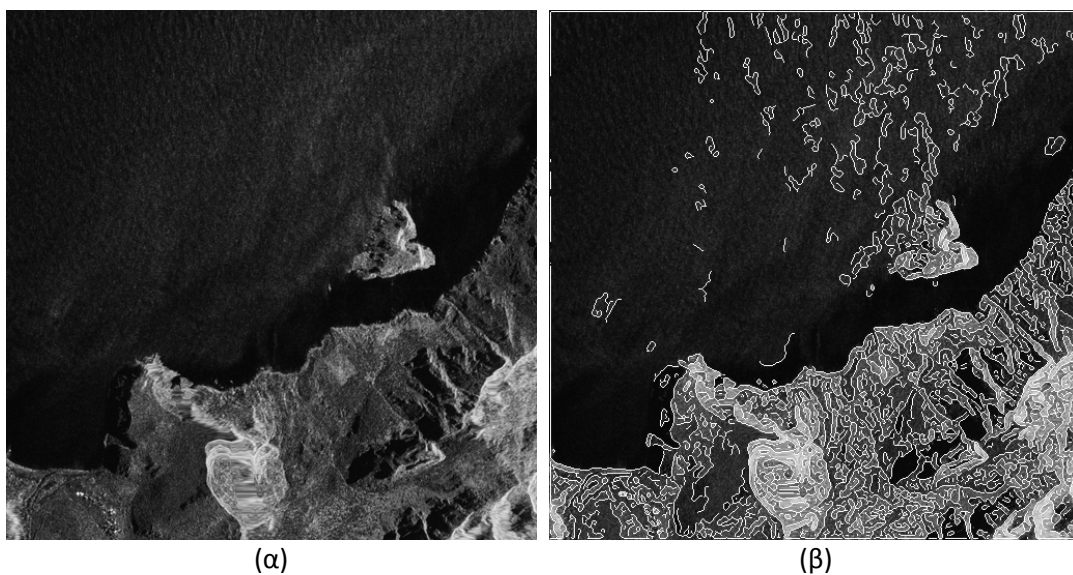
- Η υλοποιημένη μεθοδολογία – για τη συσταδοποίηση Κ-μέσου – κρίνεται ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί, με ενθαρρυντικά αποτελέσματα, σε απεικονίσεις TERRASAR-X διακριτικής ικανότητας 3 m, για χαρτογραφήσεις μέγιστης κλίμακας 1:54.000.

4.9 9^η Εφαρμογή – Περιοχή: Gibraltar (TERRASAR-X)



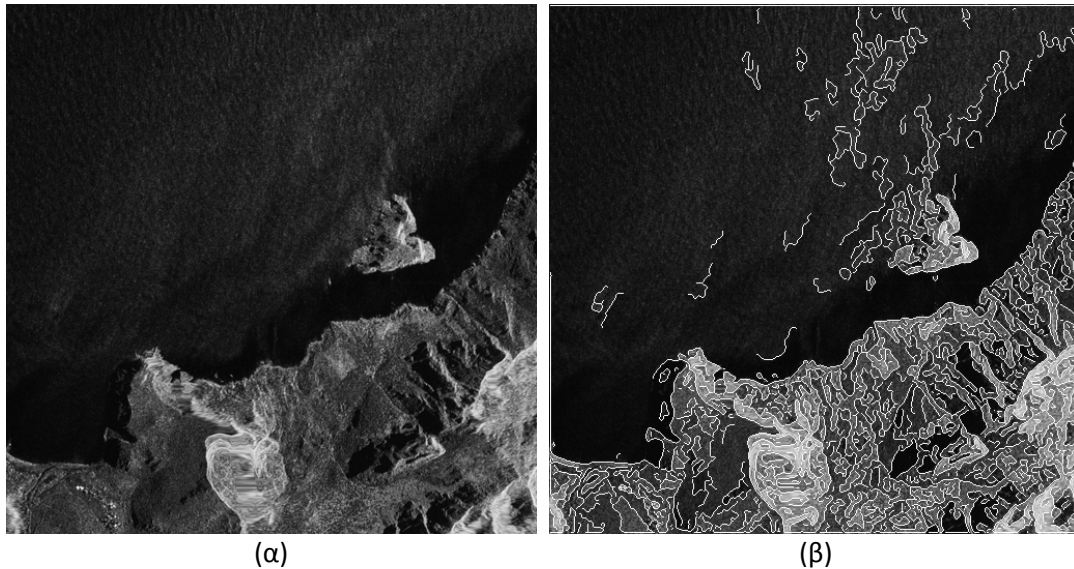
Σχήμα 4.10: 9^η Εφαρμογή, διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε, με σκοπό τη διερεύνηση ανίχνευσης ακτογραμμής με προηγμένες τεχνικές ομαλοποίησης και τον τελεστή Canny.

Όπως παρουσιάστηκε στο προηγούμενο εδάφιο, οι πιο αποτελεσματικές τεχνικές (από αυτές που εξετάστηκαν και για τις συγκεκριμένες εφαρμογές) ομαλοποίησης με ταυτόχρονη ενίσχυση των ακμών είναι η ανισοτροπική διάχυση ALM, καθώς και ο συνδυασμός της με ένα μικρό αριθμό επαναλήψεων μορφολογικής εξομάλυνσης. Κατά την εφαρμογή της ALM παρατηρήθηκε ότι τα καλύτερα αποτελέσματα δίνονται έπειτα από 300 επαναλήψεις. Η ανίχνευση των ακμών έγινε με τον βέλτιστο τελεστή Canny. Ωστόσο, όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.61(β), οι ακμές δεν είναι συνεχείς και αυτό αναδεικνύεται και στις υπόλοιπες τεχνικές, δημιουργώντας περαιτέρω προβλήματα. Της προ-επεξεργασίας των εικόνων προηγήθηκε η εφαρμογή του φίλτρου Lee για την απαλοιφή της «κηλίδωσης», καθώς η σημασία της μείωσης του θορύβου υψηλής συχνότητας είναι πολύ μεγάλη για την ερμηνεία SAR εικόνων.



Εικόνα 4.61: 9^η Εφαρμογή, (α) απεικόνιση TERRASAR-X, (β) ανισοτροπική διάχυση ALM 300 επαναλήψεων και ανίχνευση ακμών με τον Canny.

Ο δεύτερος αλγόριθμος που υλοποιήθηκε περιλαμβάνει λίγες επαναλήψεις μορφολογικής εξομάλυνσης επικουρικά στην ενίσχυση των ακμών με την ALM, επιτυγχάνοντας μεγαλύτερη ομαλοποίηση κι επομένως απαλείφοντας κάποιες ανεπιθύμητες ακμές. Στην εικόνα 4.62(β) φαίνεται ότι πράγματι η χερσαία επιφάνεια είναι πιο ομαλοποιημένη. Η περιοχή που ιδιαίτερα ενδιαφέρει είναι κοντά στην ακτογραμμή, προκειμένου να απλοποιηθεί η ανίχνευσή της. Έπειτα από πληθώρα συνδυασμών, τα καλύτερα αποτελέσματα δόθηκαν έπειτα από 300 επαναλήψεις ALM και 5 επαναλήψεις ML. Τα προβλήματα που ανέκυψαν είναι τα ίδια με αυτά που παρουσιάστηκαν για την ALM.



Εικόνα 4.62: 9^η Εφαρμογή, (α) απεικόνιση TERRASAR-X, (β) ανισοτροπική διάχυση ALM 300 επαναλήψεων, μορφολογική εξομάλυνση ML 5 επαναλήψεων και ανίχνευση ακμών με τον Canny.

Συνοψίζοντας, το βασικό πρόβλημα που αναδείχτηκε κατά την ανίχνευση ακμών ήταν η ασυνεχεία τους, η οποία οφείλεται αφενός στον τελεστή ανίχνευσης των ακμών και αφετέρου στην ίδια την απεικόνιση. Οι radar απεικονίσεις έχουν μερικά χαρακτηριστικά τα οποία είναι ριζικά διαφορετικά από αυτά των απεικονίσεων οι οποίες έχουν ληφθεί με ηλεκτρο-οπτικούς δέκτες και αεροφωτογραφίες. Οι διαφορές σ' αυτά τα χαρακτηριστικά οφείλονται στη διαφορετική τεχνική λήψης των radar απεικονίσεων και σχετίζονται είτε με την ένταση του σκεδαζόμενου, καταγραφόμενου σήματος (τόνος, κηλίδωση, υφή) είτε με τη γεωμετρία εδάφους και λήψης της απεικόνισης (B. Καραθανάση, 2001).

Οι διαφορετικοί τόνοι του γκρίζου στην απεικόνιση αντιστοιχούν σε διαφορετικό βαθμό έντασης της σκεδαζόμενης από τους στόχους ακτινοβολίας και οφείλονται σε παραμέτρους όπως η γεωμετρία του εδάφους, η υγρασία, η γωνία πρόσπτωσης της μικροκυματικής ακτινοβολίας και ο προσανατολισμός του στόχου ως προς τη γωνία όρασης του radar. Οι σκιές οι οποίες παρατηρούνται σχετίζονται με τη γωνία πρόσπτωσης της μικροκυματικής ακτινοβολίας η οποία εκπέμπεται από το radar και όχι με τις συνθήκες φωτισμού της γήινης επιφάνειας από τον ήλιο – γι' αυτό οι απεικονίσεις radar κυρίως αναδεικνύουν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά ενός στόχου σε αντίθεση με τις απεικονίσεις οι οποίες έχουν ληφθεί στο ορατό και υπέρυθρο τμήμα του φάσματος οι οποίες αναδεικνύουν το χρώμα, τη χημική σύνθεση ή τη θερμοκρασία του στόχου. **Η ανάλυση των radar απεικονίσεων απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή και ειδικές γνώσεις** (B. Καραθανάση, 2001).

Ακόμα και η φωτοερμηνεία της συγκεκριμένης απεικόνισης ήταν απαιτητική, λόγω των διαφορετικών τόνων του γκρίζου και των σκιών που παρατηρούνται στην απεικόνιση. Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν και συνδυαστικά με το γεγονός ότι η θάλασσα δεν χαρακτηρίζεται από ενιαίες τιμές φωτεινότητας, δημιουργήθηκε σύγχυση στον προσδιορισμό της αληθούς θέσης της ακτογραμμής, τόσο στην

ψηφιοποίηση όσο και στην ανίχνευσή της, ενώ συνέβαλε αρνητικά και στη συνέχεια της ακτογραμμής.

Σημειώνεται ότι αν και οι εφαρμογές 8 και 9 αποτελούν τμήματα της ίδιας απεικόνισης, ωστόσο χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές τεχνικές και παράμετροι αυτών, λόγω προγραμματιστικής δυσκολίας.

Για την αφαίρεση των ανεπιθύμητων ακμών χρησιμοποιήθηκαν: (α) συσταδοποίηση K-μέσου, και (β) μέτρηση της εντροπίας. Ωστόσο, έχει ήδη τονιστεί ότι η χρήση τεχνικών που σχετίζονται με τις τιμές φωτεινότητας του γκρι δεν είναι πάντα χρήσιμη στην επεξεργασία SAR απεικονίσεων, επειδή η θάλασσα δεν χαρακτηρίζεται γενικά από ενιαίες τιμές φωτεινότητας. Στη συνέχεια επισυνάπτονται και αναλύονται οι παράμετροι της εκάστοτε τεχνικής, καθώς και τα αποτελέσματα που προέκυψαν.

Συσταδοποίηση K-μέσου

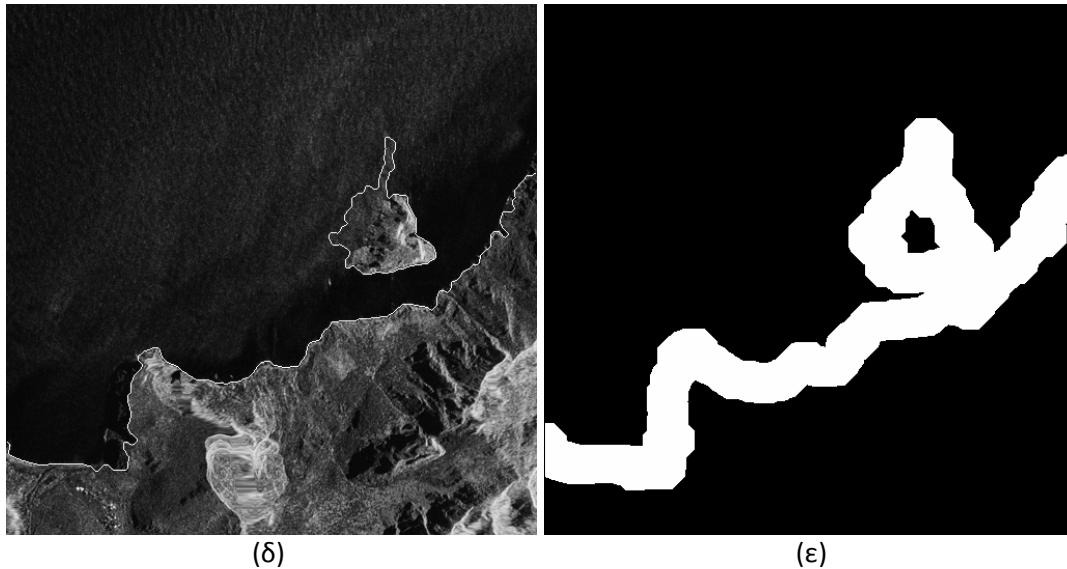
Η συγκεκριμένη απεικόνιση κατηγοριοποιήθηκε σε τρεις κλάσεις (εικόνα 4.63(α)). Έπειτα από την απαλοιφή κάποιων μικρών αντικειμένων της χερσαίας και της υδάτινης επιφάνειας, προέκυψε ο τελικός διαχωρισμός της απεικόνισης σε δύο κλάσεις (εικόνα 4.63(γ)), και η ανίχνευση της θέσης της ακτογραμμής ως το όριο των δύο επιφανειών (εικόνα 4.63(δ)).



(α)

(β)

(γ)

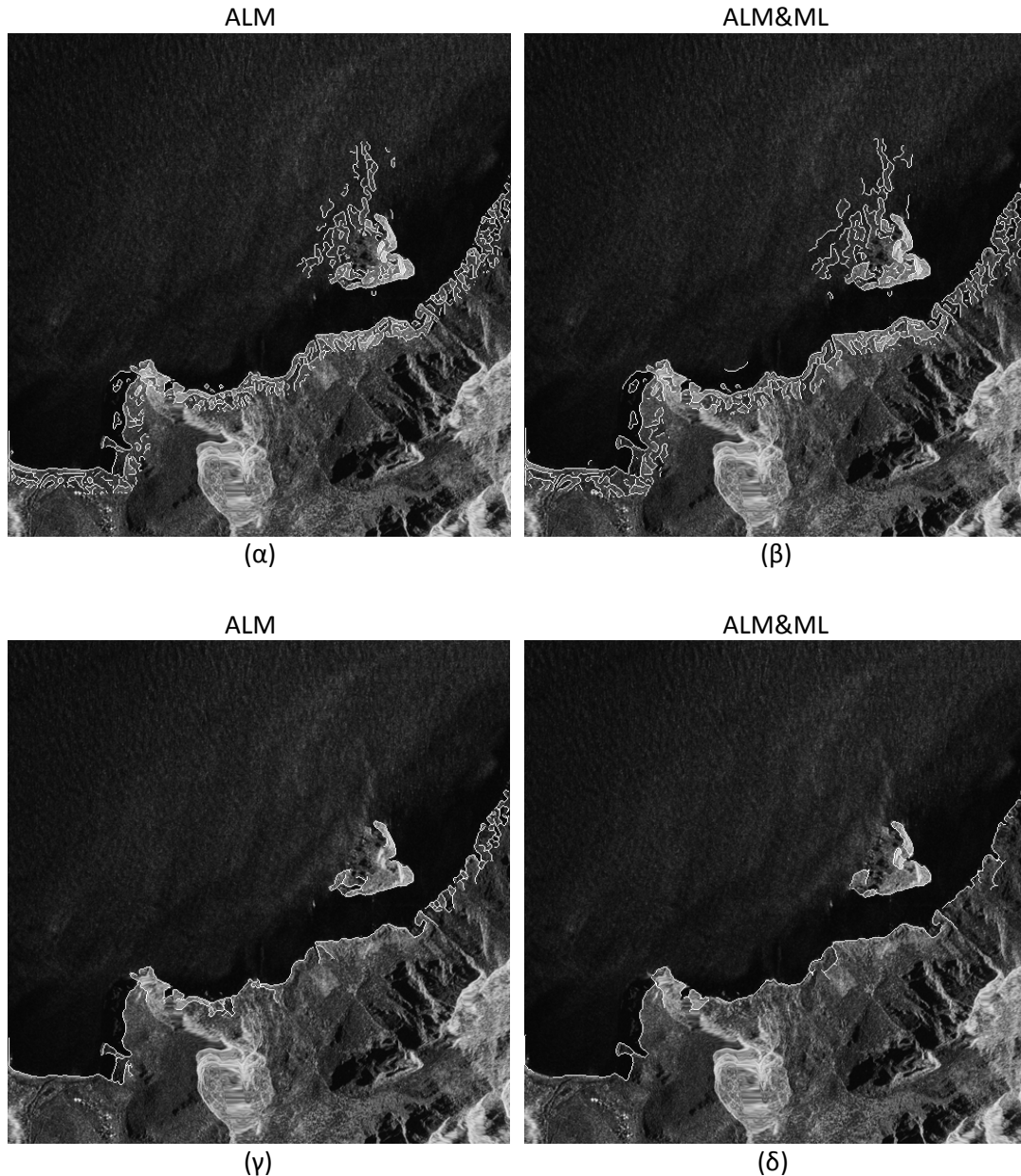


Εικόνα 4.63: 9^η Εφαρμογή, (α) συσταδοποίηση Κ-μέσου σε τρεις κλάσεις, (β) διαχωρισμός χερσαίας-υδάτινης επιφάνειας σε δύο κλάσεις, (γ) αφαίρεση μικρών αντικειμένων της χερσαίας και της υδάτινης επιφάνειας, (γ) υπέρθεση ακτογραμμής στην αρχική απεικόνιση έπειτα από συσταδοποίηση Κ-μέσου, (ε) εύρος ζώνης 19 εικονοστοιχείων στην ακτογραμμή που προκύπτει από τη συσταδοποίηση.

Όπως φαίνεται στην εικόνα 4.63(γ), φωτοερμηνευτικά η συσταδοποίηση δεν είναι επιτυχής για αρκετά εικονοστοιχεία της απεικόνισης – γι' αυτό και το εύρος ζώνης που τίθεται είναι τόσο μεγάλο. Αν και πρόκειται για SAR απεικόνιση, δεν είναι βάσιμο ότι η «αδυναμία» της ορθής συσταδοποίησης κάποιων εικονοστοιχείων οφείλεται σε αυτό, για δυο λόγους. Αφενός, σε επίπεδο φωτοερμηνείας η θέση της ακτογραμμής κρίνεται ικανοποιητική για το μεγαλύτερο τμήμα της, αφετέρου η συσταδοποίηση παρουσίασε χειρότερα αποτελέσματα σε κάποιες απεικονίσεις ηλεκτρο-οπτικών αισθητήρων. Η δημιουργία περισσότερων κλάσεων προκειμένου να αποφευχθούν οι εσφαλμένες αντιστοιχίσεις στις κλάσεις, δεν ήταν επιτυχής. Γενικότερα, σε επίπεδο φωτοερμηνείας, η θέση της ακτογραμμής κρίνεται ικανοποιητική για το μεγαλύτερο τμήμα της, γεγονός το οποίο επιβεβαιώνεται και από τους δείκτες αξιολόγησης (πίνακας 4.20).

Στην ακτογραμμή που προέκυψε ως το όριο των δύο κλάσεων τέθηκε ένα εύρος ζώνης 19 εικονοστοιχείων στην περίπτωση προ-επεξεργασίας με την ALM (εικόνα 4.63(ε)) και 22 εικονοστοιχείων στην περίπτωση προ-επεξεργασίας με την ALM συνδυαστικά με την ML, με σκοπό την αφαίρεση ανεπιθύμητων ακμών. Το εύρος ζώνης τέθηκε στις εικόνες ακμών και που είχαν αρχικά υποστεί προ-επεξεργασία με: (α) ALM 300 επαναλήψεων (εικόνα 4.61(β)), και (β) ALM 300 επαναλήψεων συνδυαστικά με ML 5 επαναλήψεων (εικόνα 4.62(β)). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στις εικόνες 4.64(α) και 4.64(β), αντίστοιχα. Στην περίπτωση προ-επεξεργασίας με ALM, η εξαγόμενη ακτογραμμή προκύπτει, τελικά, χρησιμοποιώντας τα μορφολογικά εργαλεία `bwareaopen`, `bwmorph` (`bridge`) και `imopen` (`bwareaopen` → `bwmorph` (`bridge`) → `bwareaopen` → `imopen` → `bwareaopen`), αφαιρώντας τις μικρές εναπομείνουσες ακμές (εικόνα 4.64(γ)). Στην περίπτωση προ-επεξεργασίας με ALM και ML, η εξαγόμενη ακτογραμμή προκύπτει, τελικά,

χρησιμοποιώντας τα μορφολογικά εργαλεία `bwareaopen`, `bwmorph (bridge, thin)`, `imclose` και `imopen (bwareaopen → bwmorph (bridge) → bwareaopen → imclose → bwareaopen → bwmorph(thin) → bwareaopen → imopen → bwareaopen)` (εικόνα 4.64(δ)).



Εικόνα 4.64: 9^η Εφαρμογή, υπέρθεση των ακμών εντός του εύρους ζώνης (εικόνα 4.63(ε)) στην αρχική απεικόνιση και τελική θέση ακτογραμμής, αντίστοιχα, έπειτα από προ-επεξεργασία με (α), (γ) ALM και (β), (δ) ALM συνδυαστικά με ML.

Η τελική θέση της ακτογραμμής προέκυψε από την αρχική ανίχνευση ακμών με τον τελεστή Canny. Σε επίπεδο φωτοερμηνείας για τις δύο μεθόδους προ-επεξεργασίας, παρατηρείται ότι με την ALM οι εναπομείνουσες ακμές είναι περισσότερες. Επιπλέον, όπως σημειώθηκε, παρουσιάζονται λίγες ασυνέχειες (εικόνες 4.64(γ) και 4.64(δ)). Τα κενά αυτά οφείλονται στην αρχική ανίχνευση των ακμών από τον Canny,

καθώς κάποια τμήματα της ακτογραμμής δεν είχαν ανιχνευτεί και στη μετα-επεξεργασία της απεικόνισης – για να αφαιρεθούν οι εναπομείνουσες ακμές αφαιρέθηκαν τμήματα της ακτογραμμής, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στην ανίχνευση του βράχου στο μέσον των απεικονίσεων. Στην περίπτωση απαλοιφής περισσότερων ακμών, θα αφαιρούνταν και μεγαλύτερα τμήματα ακτογραμμής – λόγω και της ασυνέχειάς της.

Στη συνέχεια παρατίθεται αξιολόγηση βάσει των κριτηρίων πληρότητας, ορθότητας και ποιότητας, για τρία προϊόντα ακτογραμμής: (α) ανίχνευση μόνο με τον Canny, (β) εξαγωγή μόνο από συσταδοποίηση K-μέσου ως το όριο των δύο κλάσεων, και (γ) εξαγωγή βάσει της μεθοδολογίας που περιγράφηκε στο διάγραμμα ροής του σχήματος 4.10, για τη συσταδοποίηση. Η σύγκριση πραγματοποιήθηκε για ζώνες εύρους 1, 3 και 5 εικονοστοιχείων, σε σχέση με την ψηφιοποιημένη ακτογραμμή αναφοράς.

		Εύρος ζώνης (εικονοστοιχεία)		
ΠΛΗΡΟΤΗΤΑ		1	3	5
	Συσταδοποίηση K-μέσου	0.4822	0.62181	0.70944
ALM	Canny	0.70858	0.88285	0.92886
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.61869	0.77714	0.83891
ALM&ML	Canny	0.68195	0.86208	0.91859
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.55032	0.72827	0.80136
		Εύρος ζώνης (εικονοστοιχεία)		
ΟΡΘΟΤΗΤΑ		1	3	5
	Συσταδοποίηση K-μέσου	0.55415	0.68399	0.73862
ALM	Canny	0.69558	0.85355	0.90384
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.45024	0.57378	0.65057
ALM&ML	Canny	0.71548	0.87009	0.91356
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.56389	0.68854	0.74585
		Εύρος ζώνης (εικονοστοιχεία)		
ΠΟΙΟΤΗΤΑ		1	3	5
	Συσταδοποίηση K-μέσου	0.34742	0.48305	0.56708
ALM	Canny	0.54085	0.76671	0.84532
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.35244	0.49271	0.57832
ALM&ML	Canny	0.53646	0.76377	0.84514
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.38602	0.5478	0.62948

Πίνακας 4.20: 9^η Εφαρμογή, αξιολόγηση ανίχνευσης ακτογραμμής με: συσταδοποίηση K-μέσου, Canny και την υλοποιημένη μεθοδολογία, για τις δυο μεθόδους προ-επεξεργασίας.

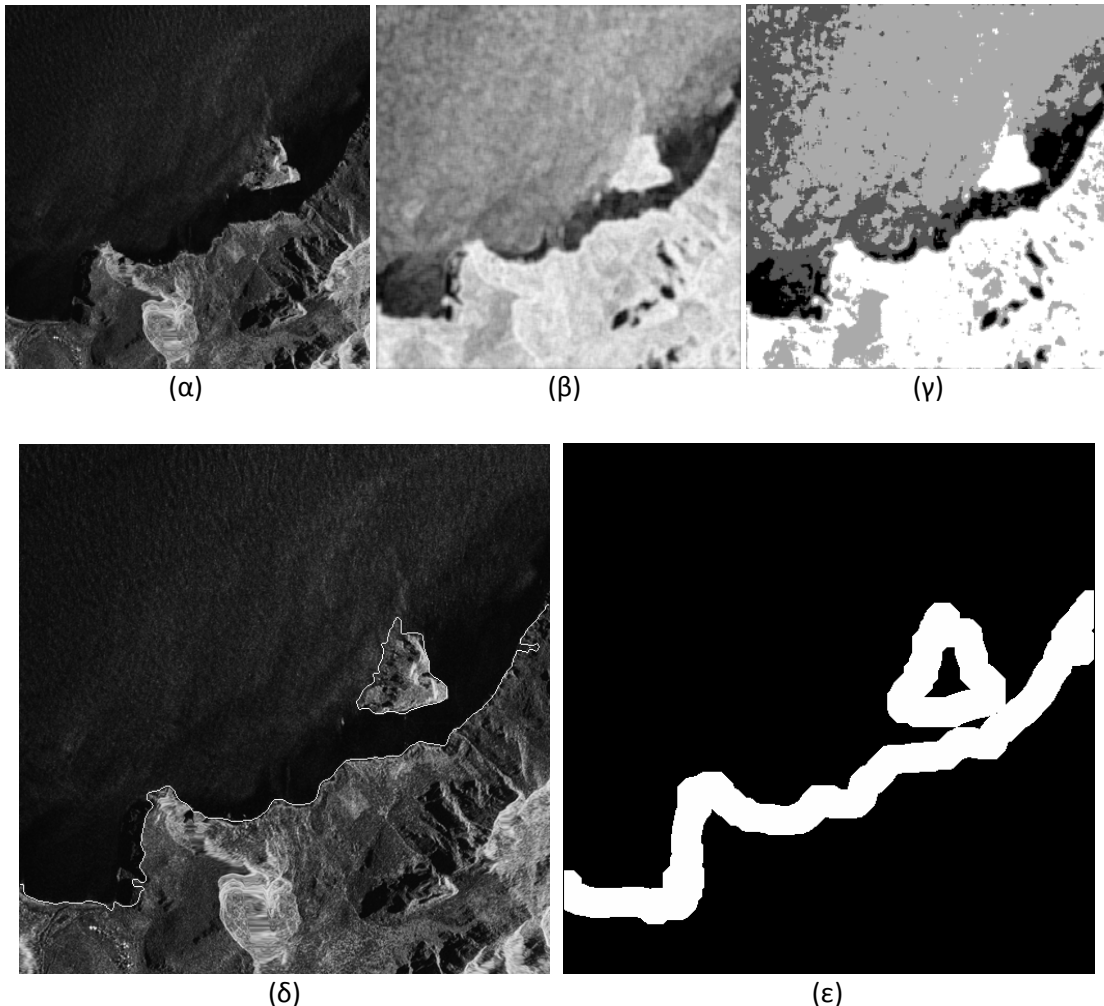
Με βάση τον παραπάνω πίνακα, παρατηρούνται τα εξής:

- Σε επίπεδο *πληρότητας*, η ανίχνευση των ακμών με προ-επεξεργασία την ALM έχει καλύτερα αποτελέσματα από την ALM συνδυαστικά με την ML. Ομοίως, συνδυαστικά με τη συσταδοποίηση – η οποία έχει, γενικά, χειρότερα αποτελέσματα από τον Canny και τον υλοποιημένο αλγόριθμο – **η ανίχνευση των ακμών με προ-επεξεργασία την ALM, βάσει της υλοποιημένης μεθοδολογίας, παρουσιάζει αυξημένα επίπεδα πληρότητας, αν και είναι πιο μειωμένα σε σχέση με τον Canny.**
- Σε επίπεδο *ορθότητας*, η ανίχνευση των ακμών με προ-επεξεργασία την ALM συνδυαστικά με την ML έχει καλύτερα αποτελέσματα από την ALM. Ομοίως, συνδυαστικά με τη συσταδοποίηση – η οποία έχει, γενικά, χειρότερα αποτελέσματα από τον Canny και τον υλοποιημένο αλγόριθμο για την ALM συνδυαστικά με την ML, και καλύτερα σε σχέση με τον υλοποιημένο αλγόριθμο για την ALM – **η ανίχνευση των ακμών με προ-επεξεργασία την ALM συνδυαστικά με την ML, βάσει της υλοποιημένης μεθοδολογίας, παρουσιάζει αυξημένα επίπεδα ορθότητας, αν και είναι πιο μειωμένα σε σχέση με τον Canny.**
- Σε επίπεδο *ποιότητας*, η ανίχνευση των ακμών με προ-επεξεργασία την ALM έχει παρόμοια αποτελέσματα με την ALM συνδυαστικά με την ML. Ωστόσο, συνδυαστικά με τη συσταδοποίηση – η οποία έχει, γενικά, χειρότερα αποτελέσματα από τον Canny και τον υλοποιημένο αλγόριθμο – **η ανίχνευση των ακμών με προ-επεξεργασία την ALM συνδυαστικά με την ML, βάσει της υλοποιημένης μεθοδολογίας, παρουσιάζει ικανοποιητικά επίπεδα ολικής ποιότητας, αν και είναι πιο μειωμένα σε σχέση με τον Canny.**
- **Για εύρος ζώνης 1 εικονοστοιχείου** οι δείκτες αξιολόγησης, συνολικά, δεν κυμαίνονται σε ικανοποιητικά επίπεδα (μ.ό. πληρότητας 60,8%, μ.ό ορθότητας 59,6%, μ.ό ποιότητας 43,3% και για την υλοποιημένη μεθοδολογία μ.ό. πληρότητας 58,5%, μ.ό ορθότητας 50,7%, μ.ό ποιότητας 36,9%). Η συγκεκριμένη απεικόνιση έχει διακριτική ικανότητα 3 m, και η δεδομένη ζώνη (3 εικονοστοιχεία $\rightarrow \pm 3m$) αντιστοιχεί σε κλίμακα χαρτογράφησης 1:18.000.
- **Για εύρος ζώνης 3 εικονοστοιχείων**, τα επίπεδα πληρότητας και ορθότητας των ακμών, συνολικά, είναι ενθαρρυντικά (μ.ό. πληρότητας 77,4%, μ.ό ορθότητας 73,4%) και μειωμένα παρατηρούνται μόνο για την ολική ποιότητα των ακμών (μ.ό ποιότητας 61,1%). Για την υλοποιημένη μεθοδολογία με τις δύο μεθόδους προ-επεξεργασίας τα αντίστοιχα ποσοστά είναι τα εξής: μ.ό. πληρότητας 75,3%, μ.ό ορθότητας 63,1% και μ.ό ποιότητας 52%. Η δεδομένη ζώνη (5 εικονοστοιχεία $\rightarrow \pm 6m$) αντιστοιχεί σε κλίμακα χαρτογράφησης 1:30.000.
- **Για εύρος ζώνης 5 εικονοστοιχείων**, τα επίπεδα αξιολόγησης των ακμών, συνολικά, είναι ενθαρρυντικά (μ.ό. πληρότητας 83,9%, μ.ό ορθότητας 79%, μ.ό ποιότητας 69,3%). Για την υλοποιημένη μεθοδολογία με τις δύο μεθόδους προ-επεξεργασίας τα αντίστοιχα ποσοστά είναι τα εξής: μ.ό. πληρότητας 82%, μ.ό ορθότητας 69,8% και μ.ό ποιότητας 60%. Η δεδομένη ζώνη (9 εικονοστοιχεία $\rightarrow \pm 12m$) αντιστοιχεί σε κλίμακα χαρτογράφησης 1:54.000.
- **Η υλοποιημένη μεθοδολογία για τη συσταδοποίηση κρίνεται ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για χαρτογραφήσεις μέγιστης κλίμακας 1:54.000.**

Σημειώνεται ότι η ακτογραμμή που ανιχνεύτηκε μόνο με τον *Canny* και χρησιμοποιείται στην αξιολόγηση, προέκυψε από τα δεδομένα αναφοράς με χρήση εύρους ζώνης 4 εικονοστοιχείων και μορφολογικών εργαλείων.

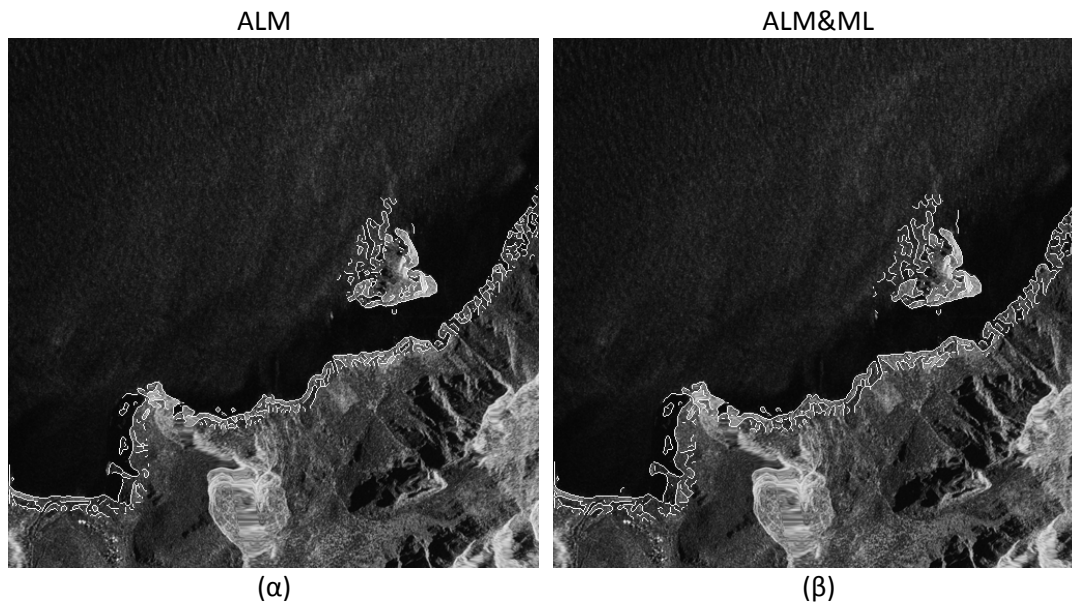
Εντροπία

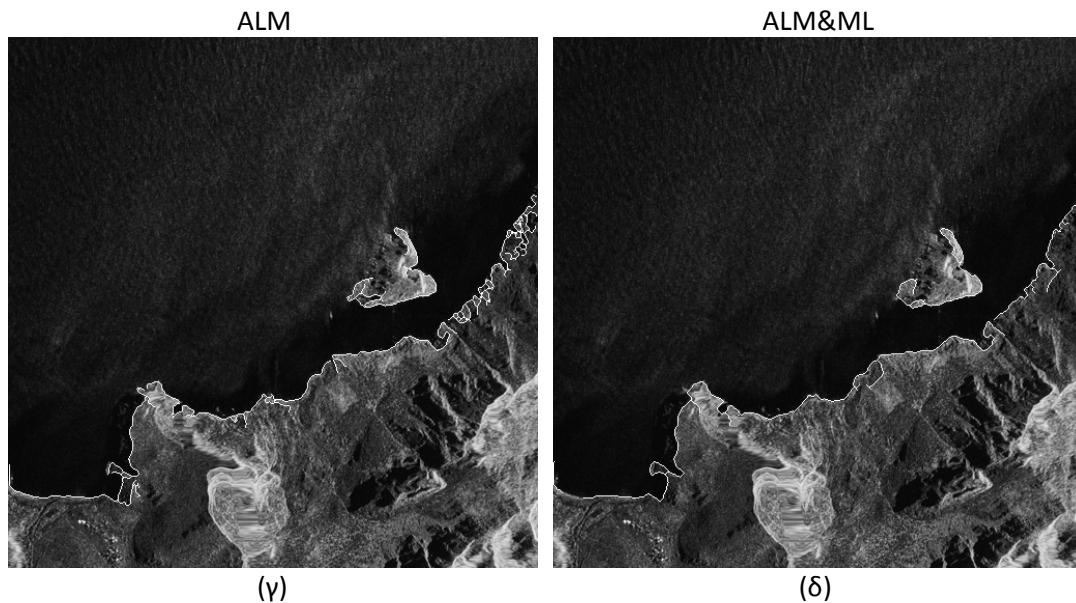
Στη συγκεκριμένη απεικόνιση η μέτρηση της εντροπίας με χρήση της πολυεπίπεδης κατωφλίωσης έχει ενθαρρυντικά αποτελέσματα. Έπειτα από τη μέτρηση της εντροπίας και αρκετές δοκιμές, η απεικόνιση κατωφλιώθηκε σε τέσσερα επίπεδα. Στις εικόνες που επισυνάπτονται παρουσιάζεται και η εξαγωγή της ακτογραμμής έπειτα από μορφολογική επεξεργασία του προϊόντος της πολυεπίπεδης κατωφλίωσης. Η ακτογραμμή παρουσιάζεται λίγο μετατοπισμένη από την αληθή της θέση, ενώ σε κάποια σημεία της απεικόνισης ο εντοπισμός της δεν είναι ορθός (π.χ. στο βράχο στο μέσον της εικόνας). Γενικότερα, σε επίπεδο φωτοερμηνείας, η θέση της ακτογραμμής κρίνεται ικανοποιητική για το μεγαλύτερο τμήμα της.



Εικόνα 4.65: 9^η Εφαρμογή, (α) απεικόνιση TERRASAR-X, (β) ανάλυση υφής με μέτρηση της εντροπίας, (γ) κατωφλίωση τεσσάρων επιπέδων στην εικόνα υφής, (δ) υπέρθεση ακτογραμμής στην αρχική απεικόνιση έπειτα από μέτρηση της εντροπίας, (ε) εύρος ζώνης 14 εικονοστοιχείων στην ακτογραμμή που προκύπτει από την εντροπία.

Στην ακτογραμμή που προέκυψε από την εντροπία τέθηκε ένα εύρος ζώνης 14 και 17 εικονοστοιχείων για την ALM (εικόνα 4.65(ε)) και την ALM συνδυαστικά με ML, αντίστοιχα, με σκοπό την αφαίρεση ανεπιθύμητων ακμών. Το εύρος ζώνης τέθηκε στις εικόνες ακμών και που είχαν αρχικά υποστεί προ-επεξεργασία με: (α) ALM 300 επαναλήψεων (εικόνα 4.61(β)), και (β) ALM 300 επαναλήψεων συνδυαστικά με ML 5 επαναλήψεων (εικόνα 4.62(β)). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στις εικόνες 4.66(α) και 4.66(β), αντίστοιχα. Στην περίπτωση προ-επεξεργασίας με ALM, η εξαγόμενη ακτογραμμή προκύπτει, τελικά, χρησιμοποιώντας τα μορφολογικά εργαλεία *bwareaopen* και *bwmorph* (*bridge*) (*bwareaopen* → *bwmorph* (*bridge*) → *bwareaopen*), αφαιρώντας τις μικρές εναπομείνουσες ακμές (εικόνα 4.66(γ)). Στην περίπτωση προ-επεξεργασίας με ALM και ML, η εξαγόμενη ακτογραμμή προκύπτει, τελικά, χρησιμοποιώντας τα μορφολογικά εργαλεία *bwareaopen*, *bwmorph* (*bridge*, *thin*), *imclose* και *imopen* (*bwareaopen* → *bwmorph* (*bridge*) → *bwareaopen* → *imclose* → *bwmorph* (*thin*) → *bwareaopen* → *imopen* → *bwareaopen* → *imclose* → *bwmorph* (*thin*)) (εικόνα 4.66(δ)).





Εικόνα 4.66: 9^η Εφαρμογή, υπέρθεση των ακμών εντός του εύρους ζώνης (εικόνα 4.65(ε)) στην αρχική απεικόνιση και τελική θέση ακτογραμμής, αντίστοιχα, έπειτα από προ-επεξεργασία με (α), (γ) ALM και (β), (δ) ALM συνδυαστικά με ML.

Η τελική θέση της ακτογραμμής προέκυψε από την αρχική ανίχνευση ακμών με τον τελεστή Canny. Σε επίπεδο φωτοερμηνείας για τις δύο μεθόδους προ-επεξεργασίας, παρατηρείται ότι με την ALM οι εναπομείνουσες ακμές είναι περισσότερες. Επιπλέον, όπως σημειώθηκε, παρουσιάζονται λίγες ασυνέχειες (εικόνες 4.66(γ) και 4.66(δ)). Τα κενά αυτά – τα οποία παρατηρούνται μεγαλύτερα για την ALM σε σχέση με το συνδυασμό της με την ML – οφείλονται στην αρχική ανίχνευση των ακμών από τον Canny, καθώς κάποια τμήματα της ακτογραμμής δεν είχαν ανιχνευτεί και στη μετα-επεξεργασία της απεικόνισης – για να αφαιρεθούν οι εναπομείνουσες ακμές αφαιρέθηκαν και κάποια μικρά τμήματα της ακτογραμμής, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στην ανίχνευση του βράχου στο μέσον των απεικονίσεων. Στην περίπτωση απαλοιφής περισσότερων ακμών, θα αφαιρούνταν και μεγαλύτερα τμήματα ακτογραμμής – λόγω και της ασυνεχειάς της.

Στη συνέχεια παρατίθεται αξιολόγηση βάσει των κριτηρίων πληρότητας, ορθότητας και ποιότητας, για τρία προϊόντα ακτογραμμής: (α) ανίχνευση μόνο με τον Canny, (β) εξαγωγή μόνο από την εντροπία, και (γ) εξαγωγή βάσει της μεθοδολογίας που περιγράφηκε στο διάγραμμα ροής του σχήματος 4.10, για την εντροπία. Η σύγκριση πραγματοποιήθηκε για ζώνες εύρους 1, 3 και 5 εικονοστοιχείων, σε σχέση με την ψηφιοποιημένη ακτογραμμή αναφοράς.

		Εύρος ζώνης (εικονοστοιχεία)		
ΠΛΗΡΟΤΗΤΑ		1	3	5
	Μέτρηση Εντροπίας	0.3895	0.60975	0.71231
ALM	Canny	0.70858	0.88285	0.92886
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.62151	0.7764	0.83743
ALM&ML	Canny	0.68195	0.86208	0.91859
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.55032	0.72727	0.79676
		Εύρος ζώνης (εικονοστοιχεία)		
ΟΡΘΟΤΗΤΑ		1	3	5
	Μέτρηση Εντροπίας	0.49528	0.73652	0.81833
ALM	Canny	0.69558	0.85355	0.90384
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.49866	0.63581	0.71197
ALM&ML	Canny	0.71548	0.87009	0.91356
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.6202	0.74936	0.80343
		Εύρος ζώνης (εικονοστοιχεία)		
ΠΟΙΟΤΗΤΑ		1	3	5
	Μέτρηση Εντροπίας	0.27883	0.50056	0.61505
ALM	Canny	0.54085	0.76671	0.84532
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.38251	0.5374	0.62551
ALM&ML	Canny	0.53646	0.76377	0.84514
	Υλοποιημένη Μεθοδολογία	0.41161	0.58498	0.66678

Πίνακας 4.21: 9^η Εφαρμογή, αξιολόγηση ανίχνευσης ακτογραμμής με: μέτρηση εντροπίας, Canny και την υλοποιημένη μεθοδολογία, για τις δυο μεθόδους προ-επεξεργασίας.

Με βάση τον παραπάνω πίνακα, οι παρατηρήσεις είναι ίδιες με τη συσταδοποίηση:

- Σε επίπεδο **πληρότητας**, η ανίχνευση των ακμών με προ-επεξεργασία την ALM έχει καλύτερα αποτελέσματα από την ALM συνδυαστικά με την ML. Ομοίως, συνδυαστικά με την εντροπία – η οποία έχει, γενικά, χειρότερα αποτελέσματα από τον Canny και τον υλοποιημένο αλγόριθμο – **η ανίχνευση των ακμών με προ-επεξεργασία την ALM, βάσει της υλοποιημένης μεθοδολογίας, παρουσιάζει αυξημένα επίπεδα πληρότητας, αν και είναι πιο μειωμένα σε σχέση με τον Canny.**
- Σε επίπεδο **ορθότητας**, η ανίχνευση των ακμών με προ-επεξεργασία την ALM συνδυαστικά με την ML έχει καλύτερα αποτελέσματα από την ALM. Ομοίως, συνδυαστικά με την εντροπία – η οποία έχει, γενικά, χειρότερα αποτελέσματα από τον Canny και τον υλοποιημένο αλγόριθμο για την ALM συνδυαστικά με την ML, και καλύτερα σε σχέση με τον υλοποιημένο αλγόριθμο για την ALM – **η ανίχνευση των ακμών με προ-επεξεργασία την ALM συνδυαστικά με την ML, βάσει της υλοποιημένης μεθοδολογίας, παρουσιάζει αυξημένα επίπεδα ορθότητας, αν και είναι πιο μειωμένα σε σχέση με τον Canny.**

- Σε επίπεδο ποιότητας, η ανίχνευση των ακμών με προ-επεξεργασία την ALM έχει παρόμοια αποτελέσματα με την ALM συνδυαστικά με την ML. Ωστόσο, συνδυαστικά με την εντροπία – η οποία έχει, γενικά, χειρότερα αποτελέσματα από τον Canny και τον υλοποιημένο αλγόριθμο – **η ανίχνευση των ακμών με προ-επεξεργασία την ALM συνδυαστικά με την ML, βάσει της υλοποιημένης μεθοδολογίας, παρουσιάζει ικανοποιητικά επίπεδα ολικής ποιότητας, αν και είναι πιο μειωμένα σε σχέση με τον Canny.**
- **Για εύρος ζώνης 1 εικονοστοιχείου** οι δείκτες αξιολόγησης, συνολικά, δεν κυμαίνονται σε ικανοποιητικά επίπεδα (μ.ό. πληρότητας 59%, μ.ό ορθότητας 60,5%, μ.ό ποιότητας 43% και για την υλοποιημένη μεθοδολογία μ.ό. πληρότητας 58,6%, μ.ό ορθότητας 55,9%, μ.ό ποιότητας 39,7%).
- **Για εύρος ζώνης 3 εικονοστοιχείων**, τα επίπεδα αξιολόγησης των ακμών, συνολικά, είναι ενθαρρυντικά (μ.ό. πληρότητας 77,2%, μ.ό ορθότητας 76,9%, μ.ό ποιότητας 63,1%). Για την υλοποιημένη μεθοδολογία με τις δύο μεθόδους προ-επεξεργασίας τα αντίστοιχα ποσοστά είναι τα εξής: μ.ό. πληρότητας 75,2%, μ.ό ορθότητας 69,3% και μ.ό ποιότητας 56,1%.
- **Για εύρος ζώνης 5 εικονοστοιχείων**, τα επίπεδα αξιολόγησης των ακμών, συνολικά, είναι πολύ καλά (μ.ό. πληρότητας 83,9%, μ.ό ορθότητας 83%, μ.ό ποιότητας 72%). Για την υλοποιημένη μεθοδολογία με τις δύο μεθόδους προ-επεξεργασίας τα αντίστοιχα ποσοστά είναι τα εξής: μ.ό. πληρότητας 81,7%, μ.ό ορθότητας 75,8% και μ.ό ποιότητας 64,6%.
- **Η υλοποιημένη μεθοδολογία για την εντροπία κρίνεται ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για χαρτογραφήσεις μέγιστης κλίμακας 1:54.000.**

Συνοψίζοντας:

- Οι ακμές που ανιχνεύονται «υποφέρουν» από κενά και ασυνέχειες, το οποίο επηρεάζει αρνητικά την τελική εξαγωγή της ακτογραμμής. Παράλληλα, εξαρτώνται άμεσα από την ποιότητα και τη δυσκολία της απεικόνισης (π.χ. σκιές), καθώς οι radar απεικονίσεις απαιτούν ειδικές γνώσεις.
- Βάσει της αξιολόγησης, η χρήση της ALM συνδυαστικά με την ML υπερέχει της ALM μόνο σε επίπεδο ορθότητας. Η ALM παρουσιάζει καλύτερα επίπεδα πληρότητας, ενώ η ολική ποιότητα των ακμών είναι παρόμοια για τις δύο τεχνικές. Σε επίπεδο φωτοερμηνείας για τις δύο μεθόδους προ-επεξεργασίας, παρατηρείται ότι με την ALM οι εναπομείνουσες ακμές είναι περισσότερες.
- Βάσει των κριτηρίων αξιολόγησης, η ανίχνευση των ακμών με τον Canny είχε πολύ καλά αποτελέσματα. Η συσταδοποίηση K-μέσου παρουσίασε μειωμένους δείκτες συγκριτικά με τον Canny και τον υλοποιημένο αλγόριθμο συσταδοποίησης, εκτός της ορθότητας για τον υλοποιημένο αλγόριθμο με χρήση της ALM. Επομένως, **ο υλοποιημένος αλγόριθμος συσταδοποίησης έχει ενθαρρυντικά αποτελέσματα – αν και μειωμένα σε σχέση με τον Canny – δεδομένου ότι τεχνικές που σχετίζονται με τις τιμές φωτεινότητας του γκρι στις εικόνες δεν ενδείκνυνται για SAR απεικονίσεις. Καταλληλότερη τεχνική προ-επεξεργασίας κρίνεται η ALM 300 επαναλήψεων συνδυαστικά με 5 επαναλήψεις ML.**
- Η μέτρηση της εντροπίας παρουσίασε μειωμένα αποτελέσματα συγκριτικά με τον Canny, τη συσταδοποίηση και τον υλοποιημένο αλγόριθμο εντροπίας, εκτός

της ορθότητας για τον υλοποιημένο αλγόριθμο με χρήση της ALM. Σε σχέση με τον υλοποιημένο αλγόριθμο συσταδοποίησης, η χρήση της εντροπίας υπερέρχει σε επίπεδα ορθότητας και ολικής ποιότητας της εξαγόμενης ακτογραμμής. Επομένως, ο υλοποιημένος αλγόριθμος εντροπίας έχει ενθαρρυντικά αποτελέσματα – αν και μειωμένα σε σχέση με τον Canny. Καταλληλότερη τεχνική προ-επεξεργασίας κρίνεται η ALM 300 επαναλήψεων συνδυαστικά με 5 επαναλήψεις ML.

- Η τελική εξαγωγή της ακτογραμμής εξαρτάται – εκτός από την αρχική ανίχνευση των ακμών – και από την τεχνική επεξεργασίας και τα μορφολογικά εργαλεία που επιλέγονται για την ανακατασκευή της – συμπεριλαμβανομένου και του εύρους ζώνης.
- Η αξιολόγηση της εξαγόμενης ακτογραμμής εξαρτάται άμεσα από την ορθότητα της ψηφιοποίησης των δεδομένων αναφοράς, καθώς και από τη μετατροπή τους σε ψηφιδωτά δεδομένα. Στη συγκεκριμένη απεικόνιση, επειδή η επαναφορά της στις αρχικές της διαστάσεις έγινε από μεγαλύτερης διάστασης εικόνα, παρουσιάστηκαν κενά στην ακτογραμμή αναφοράς.
- Η υλοποιημένη μεθοδολογία κρίνεται ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί, με ενθαρρυντικά αποτελέσματα, σε απεικονίσεις TERRASAR-X διακριτικής ικανότητας 3 m, για χαρτογραφήσεις μέγιστης κλίμακας 1:54.000.

4.10 Συμπεράσματα

Στα προηγούμενα υποκεφάλαια παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε για τηλεπισκοπικά δεδομένα, με σκοπό την **ανίχνευση ακτογραμμών με έμφαση στη χρήση προηγμένων τεχνικών ομαλοποίησης και τον τελεστή Canny**. Βασικό στόχο της εφαρμογής αποτέλεσε η ανάπτυξη μιας μεθοδολογίας κατά το δυνατόν ενιαίας για δεδομένα ιδίων χαρακτηριστικών, εν προκειμένω για απεικονίσεις υψηλής ανάλυσης. Παράλληλα, διερευνήθηκε η δυνατότητα επέκτασής της σε απεικονίσεις μεσαίας διακριτικής ικανότητας καθώς και σε απεικονίσεις SAR.

Το πεδίο εφαρμογών περιελάμβανε έξι απεικονίσεις QUICKBIRD (4) και WORLDVIEW-2 (2) υψηλής χωρικής διακριτικής ικανότητας (0,7 και 0,5 m, αντίστοιχα), μία απεικόνιση ASTER μεσαίας χωρικής διακριτικής ικανότητας (15 m) και δύο απεικονίσεις TERRASAR-X υψηλής χωρικής διακριτικής ικανότητας (3 m). Όπως σημειώθηκε, δεδομένα της ίδιας απεικόνισης αντιμετωπίστηκαν διαφορετικά, λόγω υπολογιστικού φόρτου, με την εφαρμογή διαφορετικών παραμέτρων (εφαρμογές {4^η και 5^η}, {6^η και 7^η}, {8^η και 9^η}). Συγκεκριμένα:

- Ως προς την προ-επεξεργασία, διαφοροποιήθηκε ο αριθμός των επαναλήψεων των τεχνικών ομαλοποίησης.
- Ως προς την επεξεργασία, διαφοροποιήθηκε η επιλογή του κατωφλίου (κατωφλίωση), ο αριθμός των συστάδων (συσταδοποίηση K-μέσου) και τα επίπεδα της πολυεπίπεδης κατωφλίωσης (εντροπία).
- Ως προς τη μετα-επεξεργασία, διαφοροποιήθηκε η επιλογή των εργαλείων μορφολογικής ανακατασκευής και των παραμέτρων τους.

Παρατηρήθηκε ότι το τελικό εξαγόμενο προϊόν εξαρτάται από πολλές παραμέτρους, οι οποίες είναι οι ακόλουθες:

- Ποιότητα και απαιτήσεις απεικόνισης.
- Τελεστής Canny.
- Τεχνικές προ-επεξεργασίας και παράμετροι αυτών, οι οποίες αφορούν στον αριθμό των επαναλήψεων των τεχνικών ομαλοποίησης.
- Τεχνικές επεξεργασίας και παράμετροι αυτών, οι οποίες αφορούν στην επιλογή του κατάλληλου κατωφλίου (κατωφλίωση), τον αριθμό των συστάδων (συσταδοποίηση K-μέσου) και τα επίπεδα της πολυεπίπεδης κατωφλίωσης (εντροπία).
- Εργαλεία μετα-επεξεργασίας και παράμετροι αυτών, οι οποίες αφορούν στην επιλογή των κατάλληλων εργαλείων μορφολογικής ανακατασκευής και των παραμέτρων τους.
- Ψηφιοποίηση ακτογραμμής αναφοράς και μετατροπή των διανυσματικών αρχείων σε ψηφιδωτά.

Πιο αναλυτικά, εξήχθησαν τα εξής συμπεράσματα:

- Ποιότητα και απαιτήσεις απεικόνισης: Η ποιότητα των δεδομένων που χρησιμοποιούνται σε οποιαδήποτε εργασία ή μελέτη είναι ο πιο σημαντικός

παράγοντας επιτυχίας ή αποτυχίας τους, καθώς επηρεάζει όλα τα στάδια μιας μεθόδου μέχρι το τελικό εξαγόμενο προϊόν. Στο πλαίσιο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, παρατηρήθηκε ότι η *συνέχεια των ακμών* και η *ορθότητα της τελικής εξαγόμενης ακτογραμμής* εξαρτώνται άμεσα από την ποιότητα και τη δυσκολία των απεικονίσεων, ενώ τα προβλήματα που εντοπίστηκαν ήταν: θόρυβος, βραχώδεις περιοχές, αβαθή νερά, λιμένες. Στην περίπτωση των λιμένων, το βασικό πρόβλημα ήταν ο διαχωρισμός της χερσαίας επιφάνειας από τα πλοία, κι όχι η “θάλασσα” από τη “μη θάλασσα” (η αληθής θέση της ακτογραμμής είναι το περίγραμμα μόνον του λιμένος και όχι των πλοίων). Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι σε απεικονίσεις μικρών απαιτήσεων, τεχνικές με μέτρια ή ακόμα και μη αποδεκτά αποτελέσματα – βάσει φωτοερμηνείας και των δεικτών αξιολόγησης – κατά την υλοποιημένη μεθοδολογία «οδήγησαν» στην εξαγωγή αποδεκτών προϊόντων ακτογραμμής. Αν και η συγκεκριμένη σημείωση υποδεικνύει ότι κάθε απεικόνιση χρήζει «ιδίας αντιμετώπισης», αυτό είναι εσφαλμένο για τη γενίκευση χρήσης και αποτελεσματικότητας μιας τεχνικής.

Όπως σημειώθηκε, εκτός της ανίχνευσης των ακμών, και τα στάδια της *προ-επεξεργασίας* και της *επεξεργασίας* σχετίζονται με την ποιότητα των απεικονίσεων, όσον αφορά στην ένταση του φιλτραρίσματος και την επιλογή των κατάλληλων κατωφλίων ή κλάσεων, αντίστοιχα. Παράλληλα, η ποιότητα μιας απεικόνισης επηρεάζει και την ψηφιοποίηση της *ακτογραμμής αναφοράς* – εκτός της δεινότητας του φωτοερμηνευτή. Ως εκ τούτου, επηρεάζεται και η διαδικασία αξιολόγησης.

Τέλος, στην περίπτωση των *radar* απεικονίσεων έχει ήδη τονιστεί ότι η ανάλυσή τους χρήζει ιδιαίτερης προσοχής και ειδικών γνώσεων. Οι διαφορετικοί τόνοι του γκριζου και οι σκιές των συγκεκριμένων δεδομένων δημιούργησαν σύγχυση στον προσδιορισμό της αληθούς θέσης της ακτογραμμής, τόσο στην ψηφιοποίηση όσο και στην ανίχνευσή της. Επομένως και ο τύπος των απεικονίσεων επηρεάζει το τελικό αποτέλεσμα.

- **Τελεστής Canny:** Τεχνικά, οι μέθοδοι ανίχνευσης ακμών εντοπίζουν την ουσιώδη ασυνέχεια στις τιμές φωτεινότητας χρησιμοποιώντας λειτουργίες χωρικής διαφοροποίησης ή πρότυπα ακμών. Έχει ήδη τονιστεί ότι αν και αποτελούν μια απλή διαδικασία, εν συγκρίσει για παράδειγμα με τις μεθόδους κατάτμησης, υποφέρουν από το γεγονός ότι τα εικονοστοιχεία των ακμών που παράγονται από τους τελεστές είναι αρκετά *ασυνεχή* και σπάνια χαρακτηρίζουν εντελώς μια ακτογραμμή, καθώς δεν «εκμεταλλεύονται» τις χωρικές συσχετίσεις εκάστου εικονοστοιχείου με το περιβάλλον του. Σε αυτό συμβάλλουν αρνητικά η παρουσία εναπομείναντος θορύβου και η σύνθετη υφή. Παρατηρήθηκε ότι η αποκατάσταση αυτού του προβλήματος για τη διαμόρφωση μιας συνεχούς καμπύλης είναι μια απαιτητική διαδικασία υπολογιστικά, ακόμα και σε μια χονδροειδή προσέγγιση με χρήση απλών μορφολογικών εργαλείων. Το πρόβλημα της ασυνέχειας των ακμών επηρεάζουν και η ποιότητα και οι απαιτήσεις μιας απεικόνισης. Τελικά, παρατηρήθηκε ότι οι ακμές που ανιχνεύονται «υποφέρουν» από κενά και ασυνέχειες, το οποίο επηρεάζει αρνητικά την τελική εξαγωγή της ακτογραμμής. Επιπλέον, **προτείνεται βελτίωση**

του αλγορίθμου των Van Vliet et al. (1989) για το μορφολογικό φορμαλισμό της δεύτερης παραγώγου.

Τέλος, επειδή όλοι οι τελεστές ανίχνευσης ακμών είναι ευαίσθητοι σε όλες τις εναλλαγές των τιμών φωτεινότητας στο πεδίο της εικόνας, οδηγούν και στην ανίχνευση μη επιθυμητών ή μη πραγματικών ακμών – πρόβλημα τα οποίο αντιμετωπίστηκε με κατωφλίωση, συσταδοποίηση K-μέσου και μέτρηση της εντροπίας για την εξαγωγή της ακτογραμμής.

- Τεχνικές προ-επεξεργασίας και παράμετροι αυτών: Σε προηγούμενο κεφάλαιο έχει τονιστεί η σημασία επιλογής μιας αποτελεσματικής μεθόδου προ-επεξεργασίας στο πλαίσιο ομαλοποίησης με ταυτόχρονη ενίσχυση των ακμών. Ως εκ τούτου, η τελική εξαγόμενη ακτογραμμή εξαρτάται άμεσα από την επιλεγμένη μέθοδο καθώς και από την ένταση του φιλτραρίσματος. Μεγάλη είναι και η σημασία της δεινότητας του μελετητή (όχι μόνο φωτοερμηνευτικής) για τον καθορισμό των παραπάνω. Όσον αφορά στις δύο **μεθόδους προ-επεξεργασίας**, την ALM και το συνδυασμό της με ένα μικρό αριθμό επαναλήψεων μορφολογικής εξομάλυνσης, έπειτα από την εφαρμογή τους σε εννέα απεικονίσεις διαμορφώθηκε ο παρακάτω πίνακας, σύμφωνα με τον οποίο η ALM οδηγεί σε πιο πλήρη και ποιοτική ανίχνευση των ακμών, ενώ η ALM συνδυαστικά με ένα μικρό αριθμό επαναλήψεων μορφολογικής εξομάλυνσης οδηγεί σε πιο ορθή ανίχνευση των ακμών. Τα ποσοστά που καταγράφονται είναι συγκριτικά και διαμορφώθηκαν ανάλογα με το ποια τεχνική προ-επεξεργασίας παρουσίασε τα υψηλότερα ποσοστά, και στις τρεις ζώνες αξιολόγησης, για το σύνολο των εφαρμογών.

	CANNY	
	ALM	ALM&ML
Πληρότητα	77,80%	22,20%
Ορθότητα	33,30%	66,70%
Ποιότητα	55,60%	44,40%

Πίνακας 4.22: Συγκριτικά στοιχεία ανίχνευσης ακμών για τις δυο μεθόδους προ-επεξεργασίας έπειτα από ανίχνευσή τους με τον τελεστή Canny, επί του συνόλου των εφαρμογών.

Στον ακόλουθο πίνακα επισυνάπτονται, για το σύνολο των εφαρμογών, οι μέσες, μέγιστες και ελάχιστες τιμές πληρότητας, ορθότητας και ολικής ποιότητας των ακμών έπειτα από ανίχνευσή τους με τον τελεστή Canny για τις δύο μεθόδους προ-επεξεργασίας, ανά εύρος ζώνης. Παρατηρείται ότι τα παραπάνω συμπεράσματα επαληθεύονται από τις τιμές αυτές.

ΕΥΡΟΣ ΖΩΝΗΣ 1 ΕΙΚΟΝΟΣΤΟΙΧΕΙΟ						
	ALM			ALM&ML		
	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ
Πληρότητα	0.61710	0.70858	0.47917	0.59904	0.68195	0.47633
Ορθότητα	0.57297	0.69558	0.42571	0.58376	0.71548	0.45707
Ποιότητα	0.42646	0.54085	0.29232	0.42399	0.53646	0.30783
ΕΥΡΟΣ ΖΩΝΗΣ 3 ΕΙΚΟΝΟΣΤΟΙΧΕΙΑ						
	ALM			ALM&ML		
	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ
Πληρότητα	0.83685	0.88285	0.77325	0.81940	0.86258	0.7679
Ορθότητα	0.77466	0.85355	0.61253	0.78440	0.87009	0.6679
Ποιότητα	0.67445	0.76671	0.51926	0.67078	0.76377	0.56142
ΕΥΡΟΣ ΖΩΝΗΣ 5 ΕΙΚΟΝΟΣΤΟΙΧΕΙΑ						
	ALM			ALM&ML		
	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ
Πληρότητα	0.90050	0.93873	0.84626	0.89042	0.91859	0.86242
Ορθότητα	0.84539	0.90384	0.70584	0.85612	0.91356	0.75143
Ποιότητα	0.78246	0.90314	0.62562	0.77527	0.84514	0.67586

Πίνακας 4.23: Μέσες, μέγιστες και ελάχιστες τιμές πληρότητας, ορθότητας και ολικής ποιότητας των ακμών για τις δύο μεθόδους προ-επεξεργασίας, έπειτα από ανίχνευσή τους με τον τελεστή Canpy (ανά εύρος ζώνης), επί του συνόλου των εφαρμογών.

Για την **υλοποιημένη μεθοδολογία** με χρήση των συγκεκριμένων προηγμένων τεχνικών ομαλοποίησης και ανίχνευση των ακμών με τον Canpy, τα αντίστοιχα ποσοστά αξιολόγησης της εξαγόμενης ακτογραμμής είναι τα ακόλουθα. Τα ποσοστά που καταγράφονται είναι συγκριτικά και διαμορφώθηκαν ανάλογα με το ποια τεχνική προ-επεξεργασίας παρουσίασε τα υψηλότερα ποσοστά, και στις τρεις ζώνες αξιολόγησης, για το σύνολο των εφαρμογών.

	ΚΑΤΩΦΛΙΩΣΗ		ΣΥΣΤΑΔΟΠΟΙΗΣΗ Κ-ΜΕΣΟΥ	
	ALM	ALM&ML	ALM	ALM&ML
Πληρότητα	60,00%	40,00%	66,70%	33,30%
Ορθότητα	60,00%	40,00%	33,30%	66,70%
Ποιότητα	40,00%	60,00%	11,10%	88,90%

Πίνακας 4.24: Συγκριτικά στοιχεία ανίχνευσης ακτογραμμής για τις δυο μεθόδους προ-επεξεργασίας, έπειτα από εφαρμογή των υλοποιημένων αλγορίθμων κατωφλίωσης και συσταδοποίησης Κ-μέσου, επί του συνόλου των εφαρμογών.

Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα, για την **κατωφλίωση**: η ALM οδηγεί σε πιο πλήρη και ορθή ανίχνευση της ακτογραμμής, ενώ η ALM συνδυαστικά με ένα μικρό αριθμό επαναλήψεων μορφολογικής εξομάλυνσης οδηγεί σε πιο ποιοτική

ανίχνευση της ακτογραμμής. Για τη **συσταδοποίηση K-μέσου**: η ALM οδηγεί σε πιο πλήρη ανίχνευση της ακτογραμμής, ενώ η ALM συνδυαστικά με ένα μικρό αριθμό επαναλήψεων μορφολογικής εξομάλυνσης οδηγεί σε πιο ορθή και ποιοτική ανίχνευση της ακτογραμμής. Για την **εντροπία** δεν μπορούν να εξαχθούν αξιόπιστα συμπεράσματα, καθώς η εφαρμογή της μεθόδου πραγματοποιήθηκε επιτυχώς μόνο σε 3 απεικονίσεις. Επιπροσθέτως, τονίζεται ότι η αξιολόγηση της υλοποιημένης μεθοδολογίας δεν εξαρτάται μόνον από τις μεθόδους προ-επεξεργασίας, αλλά και από την επιτυχία ή μη των τεχνικών επεξεργασίας, καθώς και από τα επιλεγμένα εργαλεία μορφολογικής ανακατασκευής. Περισσότερα στοιχεία επισυνάπτονται στη συνέχεια. Τέλος, σημειώνεται ότι κατά την υλοποιημένη μεθοδολογία δεν παρουσιάζονται γενικά έντονες διαφορές σε φωτοερμηνευτικό επίπεδο για τις δύο μεθόδους προ-επεξεργασίας, εκτός από τις δύο τελευταίες εφαρμογές στις οποίες με την ALM παρουσιάζονται περισσότερες ασυνέχειες και εναπομείνουσες ακμές.

- Τεχνικές επεξεργασίας και παράμετροι αυτών: Επειδή όλοι οι τελεστές ανίχνευσης ακμών είναι ευαίσθητοι σε όλες τις εναλλαγές των τιμών φωτεινότητας στο πεδίο της εικόνας, οδηγούν και στην ανίχνευση μη επιθυμητών ή μη πραγματικών ακμών – πρόβλημα τα οποίο αντιμετωπίστηκε με κατωφλίωση, συσταδοποίηση K-μέσου και μέτρηση της εντροπίας για την εξαγωγή της ακτογραμμής. Επομένως, η επιλογή των παραμέτρων τους – δηλαδή η επιλογή του κατάλληλου κατωφλίου (κατωφλίωση), του αριθμού των συστάδων (συσταδοποίηση K-μέσου) και των επιπέδων της πολυεπίπεδης κατωφλίωσης (εντροπία) – είναι καθοριστικής σημασίας για το τελικό εξαγόμενο προϊόν. Η βασική δυσκολία στη χρήση των τεχνικών αυτών είναι ότι δεν «εκμεταλλεύονται» τις χωρικές συσχετίσεις εκάστου εικονοστοιχείου με το περιβάλλον του.

Η ανίχνευση της ακτογραμμής με τις τεχνικές επεξεργασίας πρέπει να είναι *ορθή*, ενώ η αποτελεσματικότητά τους έγκειται στην απαλοιφή κατά το δυνατόν περισσότερων ανεπιθύμητων ακμών, με ταυτόχρονη διατήρηση των ασυνεχών (από τον Canny) τμημάτων της ακτογραμμής. Σε αρκετές περιπτώσεις αυτό δεν ήταν εφικτό, με αποτέλεσμα είτε να *απομένουν αρκετές ανεπιθύμητες ακμές* (προκειμένου να διατηρηθεί μεγαλύτερο τμήμα της ακτογραμμής) είτε να προκύπτουν μεγαλύτερα *κενά* στην ακτογραμμή (προκειμένου να μην απομείνουν πολλές ανεπιθύμητες ακμές). Σημειώνεται ότι τα προβλήματα αυτά παρουσιάζονται κατά την επιλογή του κατάλληλου εύρους ζώνης, ενώ χαρακτηριστικό παράδειγμα που τα αναδεικνύει είναι οι εφαρμογές με λιμένες. Ως εκ τούτου, η επιλογή των κατάλληλων παραμέτρων επηρεάζει και το συναπτό στάδιο της *μετα-επεξεργασίας*, όπου αποκαθίσταται η συνεκτικότητα της ακτογραμμής και αφαιρούνται οι όποιες εναπομείνουσες ακμές.

Πιο αναλυτικά, η **κατωφλίωση** στο υπέρυθρο κανάλι, αν και αποτελεί ενδεδειγμένη τεχνική, ωστόσο είναι πολύ χρονοβόρα όσον αφορά στην επιλογή του κατάλληλου κατωφλίου. Στις εφαρμογές με λιμένες παρατηρήθηκε ότι καθώς ο διαχωρισμός χερσαίας και υδάτινης επιφάνειας γίνεται σε επίπεδο “θάλασσας” και “μη θάλασσας”, η επιλογή *ενός μόνο* κατωφλίου δεν είναι ορθή

για τη διατήρηση της αληθούς θέσης της ακτογραμμής, η οποία δεν περιλαμβάνει τα πλοία.

Στον ακόλουθο πίνακα επισυνάπτονται, για το σύνολο των εφαρμογών, οι μέσες, μέγιστες και ελάχιστες τιμές πληρότητας, ορθότητας και ολικής ποιότητας των εξαγόμενων ακτογραμμών, όπως ανιχνεύονται (α) με χρήση μόνον της κατωφλίωσης, και (β) κατά την υλοποιημένη μεθοδολογία για τις δύο μεθόδους προ-επεξεργασίας, ανά εύρος ζώνης. Συγκριτικά και με τον πίνακα 4.23, αξίζει να σημειωθεί ότι γενικά η αρχική ανίχνευση της ακτογραμμής με τον Canny παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα από την κατωφλίωση. Ενθαρρυντική είναι η διαπίστωση ότι και από την υλοποιημένη μεθοδολογία προκύπτουν υψηλότερα ποσοστά αξιολόγησης σε σχέση με την κατωφλίωση, σε ποσοστό περίπου 70,4%. Η σημασία αυτού έγκειται κυρίως στην αποκατάσταση της ακτογραμμής κατά τη μετα-επεξεργασία, καθώς χρησιμοποιήθηκαν βασικά μορφολογικά εργαλεία κι όχι κάποιος προηγμένος αλγόριθμος curve fitting, παρεμβολή κ.ά.. Τα καλύτερα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην 3^η εφαρμογή (ASTER) ενώ τα χειρότερα στην 5^η εφαρμογή (QUICKBIRD) λόγω της παρουσίας του λιμένος. Επίσης, σημειώνεται ότι επειδή στην 5^η εφαρμογή δεν εφαρμόστηκε προ-επεξεργασία της απεικόνισης με ALM συνδυαστικά με ML, αλλοιώνονται τα ποσοστά της μεθόδου σε σχέση με την ALM, και παρουσιάζονται υψηλότερα. Όπως φαίνεται και στον πίνακα 4.24, τα καλύτερα ποσοστά για το σύνολο των εφαρμογών προκύπτουν έπειτα από προ-επεξεργασία με ALM ανισοτροπική διάχυση.

ΕΥΡΟΣ ΖΩΝΗΣ 1 ΕΙΚΟΝΟΣΤΟΙΧΕΙΟ									
	ΚΑΤΩΦΛΙΩΣΗ			ΥΛΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ (ALM και κατωφλίωση)			ΥΛΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ (ALM&ML και κατωφλίωση)		
	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ
Πληρότητα	0.45190	0.59687	0.17335	0.56312	0.66410	0.4517	0.56786	0.65857	0.47348
Ορθότητα	0.44197	0.6136	0.14804	0.44328	0.65447	0.17203	0.50945	0.6485	0.41425
Ποιότητα	0.29940	0.43381	0.086776	0.32927	0.4917	0.14807	0.36956	0.48532	0.28361
ΕΥΡΟΣ ΖΩΝΗΣ 3 ΕΙΚΟΝΟΣΤΟΙΧΕΙΑ									
	ΚΑΤΩΦΛΙΩΣΗ			ΥΛΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ (ALM και κατωφλίωση)			ΥΛΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ (ALM&ML και κατωφλίωση)		
	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ
Πληρότητα	0.64351	0.79925	0.29772	0.78210	0.84219	0.73618	0.78006	0.84611	0.73327
Ορθότητα	0.63350	0.83059	0.25631	0.61654	0.83987	0.28857	0.69909	0.83702	0.52634
Ποιότητα	0.49559	0.68723	0.15973	0.52303	0.72567	0.26858	0.58701	0.72643	0.44176

ΕΥΡΟΣ ΖΩΝΗΣ 5 ΕΙΚΟΝΟΣΤΟΙΧΕΙΑ									
	ΚΑΤΩΦΛΙΩΣΗ			ΥΛΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ (ALM και κατωφλίωση)			ΥΛΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ (ALM&ML και κατωφλίωση)		
	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ
Πληρότητα	0.72919	0.86283	0.40124	0.85867	0.89684	0.79602	0.85272	0.89446	0.79215
Ορθότητα	0.71270	0.89857	0.34235	0.69946	0.90235	0.38471	0.77883	0.90091	0.58984
Ποιότητα	0.59449	0.78625	0.22659	0.62441	0.81412	0.36841	0.69068	0.81434	0.51079

Πίνακας 4.25: Μέσες, μέγιστες και ελάχιστες τιμές πληρότητας, ορθότητας και ολικής ποιότητας της εξαγόμενης ακτογραμμής, όπως ανιχνεύεται (α) με χρήση μόνον κατωφλίωσης, και (β) κατά την υλοποιημένη μεθοδολογία κατωφλίωσης για τις δύο μεθόδους προ-επεξεργασίας (ανά εύρος ζώνης), επί του συνόλου των εφαρμογών.

Το πρόβλημα της παρουσίας λιμένων παρουσιάζεται και στη χρήση **συσταδοποίησης Κ-μέσου**, όπου η δημιουργία περισσότερων κλάσεων δεν ήταν επιτυχής, προκειμένου να διαχωριστεί η χερσαία επιφάνεια από τα πλοία, κι όχι η “θάλασσα” από τη “μη θάλασσα”. Στην περίπτωση που τα πλοία κατηγοριοποιούνταν σε διαφορετική κλάση από την υπόλοιπη χερσαία επιφάνεια, θα ήταν δυνατή η αφαίρεσή τους. Στην περίπτωση απαλοιφής περισσότερων ακμών, επομένως και πλοίων, θα αφαιρούνταν και μεγαλύτερα τμήματα ακτογραμμής – λόγω και της ασυνέχειάς της. Αν και τα προβλήματα που παρουσιάζονται εξαρχής από την ανίχνευση των ακμών με τον Canny αναδεικνύονται στο στάδιο της επεξεργασίας, και οι λάθος κατηγοριοποιήσεις σε συστάδες επηρεάζουν το τελικό εξαγόμενο προϊόν. Περαιτέρω απαιτήσεις της εκάστοτε απεικόνισης (π.χ. αβαθή ύδατα) είναι δυνατό να οδηγήσουν σε μη αποδεκτά αποτελέσματα, τα οποία – όπου παρουσιάστηκαν – δεν ήταν εφικτό να αντιμετωπιστούν με την επιλογή περισσότερων κλάσεων. **Η υλοποιημένη μεθοδολογία απαιτείται βελτίωσης προκειμένου να εφαρμοστεί σε δεδομένα ιδιαίτερης δυσκολίας, όπως λιμένες, ενδεχομένως με χρήση συστημάτων ανθρώπινης γνώσης ή με χρήση βαρών στη μέτρηση της απόστασης κάθε στοιχείου από το κέντρο κάθε συστάδας (αξιοποιώντας τιμές φωτεινότητας, υφή ή εικονοσυντεταγμένες)**. Αξίζει να σημειωθεί ότι στις SAR απεικονίσεις η εφαρμογή συσταδοποίησης δεν είχε χειρότερα αποτελέσματα συγκριτικά με τις απεικονίσεις ηλεκτρο-οπτικών αισθητήρων, ούτε ανέκυψαν διαφορετικά προβλήματα, αν και η χρήση τεχνικών που σχετίζονται με τις τιμές φωτεινότητας του γκρι δεν είναι πάντα χρήσιμη στην επεξεργασία SAR απεικονίσεων, επειδή η θάλασσα δεν χαρακτηρίζεται γενικά από ενιαίες τιμές φωτεινότητας.

Στον ακόλουθο πίνακα επισυνάπτονται, για το σύνολο των εφαρμογών, οι μέσες, μέγιστες και ελάχιστες τιμές πληρότητας, ορθότητας και ολικής ποιότητας των εξαγόμενων ακτογραμμών, όπως ανιχνεύονται (α) με χρήση μόνον της συσταδοποίησης, και (β) κατά την υλοποιημένη μεθοδολογία για τις δύο μεθόδους προ-επεξεργασίας, ανά εύρος ζώνης. Συγκριτικά και με τον πίνακα 4.23, αξίζει να σημειωθεί ότι γενικά η αρχική ανίχνευση της ακτογραμμής με τον Canny παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα από τη συσταδοποίηση. Ενθαρρυντική είναι η διαπίστωση ότι και από την υλοποιημένη

μεθοδολογία προκύπτουν υψηλότερα ποσοστά αξιολόγησης σε σχέση με τη συσταδοποίηση, σε ποσοστό περίπου 76,5%. Όπως σημειώθηκε και στην κατωφλίωση, η σημασία αυτού έγκειται κυρίως στην αποκατάσταση της ακτογραμμής κατά τη μετα-επεξεργασία, καθώς χρησιμοποιήθηκαν βασικά μορφολογικά εργαλεία κι όχι κάποιος προηγμένος αλγόριθμος curve fitting, παρεμβολή κ.ά.. Τα καλύτερα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην 3^η (ASTER) και στην 7^η εφαρμογή (WORLDVIEW-2), ενώ τα χειρότερα στην 5^η εφαρμογή (QUICKBIRD) λόγω της παρουσίας του λιμένος. Επίσης, σημειώνεται ότι επειδή στην 5^η εφαρμογή δεν εφαρμόστηκε προ-επεξεργασία της απεικόνισης με ALM συνδυαστικά με ML, αλλοιώνονται τα ποσοστά της μεθόδου σε σχέση με την ALM, και παρουσιάζονται υψηλότερα. Ωστόσο, όπως φαίνεται και στον πίνακα 4.24, τα καλύτερα ποσοστά για το σύνολο των εφαρμογών προκύπτουν έπειτα από προ-επεξεργασία με ALM συνδυαστικά με την ML.

ΕΥΡΟΣ ΖΩΝΗΣ 1 ΕΙΚΟΝΟΣΤΟΙΧΕΙΟ									
	ΣΥΣΤΑΔΟΠΟΙΗΣΗ Κ-ΜΕΣΟΥ			ΥΛΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ (ALM και συσταδοποίηση)			ΥΛΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ (ALM&ML και συσταδοποίηση)		
	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ
Πληρότητα	0.47122	0.65519	0.17586	0.57504	0.65519	0.45170	0.56149	0.64993	0.47254
Ορθότητα	0.45971	0.67272	0.14842	0.45999	0.65311	0.16710	0.51963	0.65806	0.40274
Ποιότητα	0.31344	0.49683	0.08754	0.34142	0.47439	0.14875	0.37194	0.48353	0.27784
ΕΥΡΟΣ ΖΩΝΗΣ 3 ΕΙΚΟΝΟΣΤΟΙΧΕΙΑ									
	ΣΥΣΤΑΔΟΠΟΙΗΣΗ Κ-ΜΕΣΟΥ			ΥΛΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ (ALM και συσταδοποίηση)			ΥΛΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ (ALM&ML και συσταδοποίηση)		
	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ
Πληρότητα	0.67492	0.84297	0.30682	0.78716	0.85558	0.73618	0.77153	0.83134	0.72827
Ορθότητα	0.65833	0.84968	0.25978	0.63668	0.83942	0.27528	0.70329	0.84059	0.52634
Ποιότητα	0.51693	0.73065	0.16370	0.53877	0.71434	0.26306	0.58411	0.71813	0.44176
ΕΥΡΟΣ ΖΩΝΗΣ 5 ΕΙΚΟΝΟΣΤΟΙΧΕΙΑ									
	ΣΥΣΤΑΔΟΠΟΙΗΣΗ Κ-ΜΕΣΟΥ			ΥΛΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ (ALM και συσταδοποίηση)			ΥΛΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ (ALM&ML και συσταδοποίηση)		
	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ
Πληρότητα	0.76420	0.89703	0.41476	0.86102	0.94887	0.79602	0.84829	0.89041	0.79215
Ορθότητα	0.74091	0.91049	0.34836	0.71846	0.90037	0.36482	0.77885	0.90199	0.58984
Ποιότητα	0.62177	0.82167	0.23356	0.63973	0.80834	0.35779	0.68598	0.81186	0.51079

Πίνακας 4.26: Μέσες, μέγιστες και ελάχιστες τιμές πληρότητας, ορθότητας και ολικής ποιότητας της εξαγόμενης ακτογραμμής, όπως ανιχνεύεται (α) με χρήση μόνον συσταδοποίησης Κ-μέσου, και (β) κατά την υλοποιημένη μεθοδολογία συσταδοποίησης για τις δύο μεθόδους προ-επεξεργασίας (ανά εύρος ζώνης), επί του συνόλου των εφαρμογών.

Συγκρίνοντας τη χρήση συσταδοποίησης K-μέσου με την κατωφλίωση για την εξαγωγή της ακτογραμμής προκύπτει ότι ως τεχνική υπερέχει η συσταδοποίηση σε ποσοστό 60%. Όσον αφορά στους δύο υλοποιημένους αλγόριθμους για τις δύο μεθόδους προ-επεξεργασίας προκύπτουν τα ακόλουθα: σε ποσοστό 26% τα αποτελέσματα της χρήσης των δύο τεχνικών είναι τα ίδια, σε ποσοστό 22% υπερέχει ο υλοποιημένος αλγόριθμος συσταδοποίησης, ενώ σε ποσοστό 52% υπερέχει ο υλοποιημένος αλγόριθμος κατωφλίωσης. Η σύγκριση πραγματοποιήθηκε μόνο για τις εφαρμογές στις οποίες εφαρμόστηκαν και οι δύο τεχνικές. Τα ποσοστά αυτά επηρεάζονται από την αποκατάσταση της ακτογραμμής κατά τη μετα-επεξεργασία, εφόσον παρατηρείται ότι ως τεχνική υπερέχει η συσταδοποίηση. Αν και λογικά θα έπρεπε η χρήση συσταδοποίησης να παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα, ωστόσο παρατηρήθηκε ότι σε πολλές περιπτώσεις, λόγω των απαιτήσεων των απεικονίσεων, παρουσιάζεται έντονη φασματική πληροφορία στο μέτωπο της ακτογραμμής (π.χ. αβαθή νερά). Αυτό επηρεάζει τη συνορεύουσα προς τη θάλασσα κλάση κι έρχεται σε αντίθεση με τη φωτοερμηνεία της απεικόνισης. Η κατωφλίωση, καθώς θέτει πιο αυστηρά κριτήρια, δεν είναι ευαίσθητη σε αυτές τις μικρές αντιθέσεις στις τιμές φωτεινότητας. Επειδή η χρήση κατωφλίωσης αποτελεί ενδεδειγμένη τεχνική για την εξαγωγή ακτογραμμών, είναι σημαντικό το γεγονός ότι οι δείκτες αξιολόγησης για της δύο μεθόδους δεν παρουσιάζουν έντονες διαφορές (μέση απόκλιση πληρότητας 0,8%, ορθότητας 1,6% και ολικής ποιότητας 1,5%). Επίσης, η εφαρμογή της συσταδοποίησης δεν περιορίζεται από την διαθεσιμότητα υπέρυθρων καναλιών, γεγονός το οποίο καθιστά τη χρήση της πιο ευρεία.

Τέλος, η υλοποιημένη μεθοδολογία με μέτρηση της **εντροπίας** εφαρμόστηκε επιτυχώς μόνο σε 3 απεικονίσεις (2^n , 7^n , 9^n), ενώ η εξαγωγή της ακτογραμμής μόνο από την υφή δεν είχε αποδεκτά αποτελέσματα στο σύνολο των εφαρμογών. Ως εκ τούτου, το μόνο ασφαλές συμπέρασμα που είναι δυνατό να εξαχθεί είναι ότι η εξαγωγή της ακτογραμμής με συγχώνευση πληροφορίας (fusion) είναι πιθανό να δίνει πολύ καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με την πολυεπίπεδη κατωφλίωση και απαιτείται περαιτέρω μελέτη.

- Εργαλεία μετα-επεξεργασίας και παράμετροι αυτών: Όπως σημειώθηκε, το προϊόν που προκύπτει έπειτα από την επεξεργασία επηρεάζει και το συναπτό στάδιο της μετα-επεξεργασίας, όπου αποκαθίσταται η συνεκτικότητα της ακτογραμμής και αφαιρούνται οι όποιες εναπομείνουσες ακμές. Σκοπός της μετα-επεξεργασίας είναι αφενός η απαλοιφή κατά το δυνατόν περισσότερων ανεπιθύμητων ακμών και αφετέρου η αποκατάσταση της συνεκτικότητας της ακτογραμμής, καθώς οι ακμές που προκύπτουν από τον Canny παρουσιάζουν κενά. Σε αρκετές περιπτώσεις αυτό δεν ήταν εφικτό, με αποτέλεσμα είτε να απομένουν αρκετές ανεπιθύμητες ακμές (προκειμένου να διατηρηθεί μεγαλύτερο τμήμα της ακτογραμμής) είτε να προκύπτουν μεγαλύτερα κενά στην ακτογραμμή (προκειμένου να μην απομείνουν πολλές ανεπιθύμητες ακμές). Η επιλογή των μορφολογικών εργαλείων και των παραμέτρων τους είναι καθοριστικοί παράγοντες για την παραγωγή πλήρους και ορθής ακτογραμμής, ενώ εξίσου σημαντική είναι και η διεργασία που έχει προηγηθεί (ανίχνευση ακμών με τον Canny, προ-επεξεργασία, επεξεργασία). Σημειώνεται ότι κατά την

υλοποιημένη μεθοδολογία δεν παρουσιάζονται γενικά έντονες διαφορές σε φωτοερμηνευτικό επίπεδο για τις δύο μεθόδους προ-επεξεργασίας, εκτός από τις δύο τελευταίες εφαρμογές στις οποίες με την ALM παρουσιάζονται περισσότερες ασυνέχειες και εναπομείνουσες ακμές. **Προτείνεται η μελέτη προηγμένων αλγορίθμων αποκατάστασης της συνεκτικότητας (π.χ. curve fitting, χρήση παρεμβολής) για τη βελτίωση των εξαγόμενων ακτογραμμών.**

- Ψηφιοποίηση ακτογραμμής αναφοράς και μετατροπή των διανυσματικών αρχείων σε ψηφιδωτά: Η αξιολόγηση της εξαγόμενης ακτογραμμής εξαρτάται άμεσα από τη *φωτοερμηνευτική δεινότητα* του μελετητή, καθώς και από τη *μετατροπή των δεδομένων αναφοράς σε ψηφιδωτά*. Είναι σαφές ότι οι ικανότητες του φωτοερμηνευτή επηρεάζουν άμεσα την ορθότητα της ψηφιοποίησης των δεδομένων αναφοράς. Στο πλαίσιο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας έγινε η παραδοχή πιθανών φωτοερμηνευτικών σφαλμάτων και ως εκ τούτου η αξιολόγηση της παραγόμενης ακτογραμμής έγινε χρησιμοποιώντας ζώνες ποικίλου εύρους. Η προσέγγιση αυτή θεωρήθηκε πιο αξιόπιστη. Τα στάδια μετατροπής των διανυσματικών αρχείων αναφοράς σε ψηφιδωτά δεδομένα τύπου '.tif' υπενθυμίζεται ότι περιλαμβάνουν τις παρακάτω διεργασίες:
 - ☞ Εξαγωγή του διανυσματικού αρχείου σε αρχείο τύπου '.tif', από το περιβάλλον του AutoCAD. Η εξαγόμενη απεικόνιση, ωστόσο, δεν βρίσκεται στις πραγματικές της διαστάσεις.
 - ☞ Μετατροπή του '.tif' από RGB σε grayscale (κλίμακα του γκρι) και τέλος σε bitmap (δυναμική μορφή), στο περιβάλλον του Adobe Photoshop.
 - ☞ Αφαίρεση του ψηφιοποιημένου πλαισίου της απεικόνισης, στο περιβάλλον του IrfanView.
 - ☞ Επαναφορά της απεικόνισης στις αρχικές της διαστάσεις, στο περιβάλλον του Adobe Photoshop.
 - ☞ Εκλέπτυνση της ακτογραμμής αναφοράς ούτως ώστε να είναι πάχους ενός εικονοστοιχείου, στο περιβάλλον του Matlab.

Η παραπάνω μετατροπή είναι απαραίτητη προκειμένου να αξιολογηθούν τα εξαγόμενα αποτελέσματα. Ωστόσο, παρουσιάστηκαν προβλήματα κατά την εκτέλεσή της. Αρχικά, η εξαγωγή του διανυσματικού αρχείου σε αρχείο τύπου '.tif' (βήμα 1) είχε ως αποτέλεσμα να χαθούν κάποιες ακμές. Επομένως, ορθά ανιχνευμένα εικονοστοιχεία μπορεί να χαρακτηρίζονται εσφαλμένα ως FP (από λάθος του αλγορίθμου έχουν ανιχνευτεί). Επιπλέον, το πάχος των ακτογραμμών ήταν μεγαλύτερο του ενός εικονοστοιχείου. Κάποιες ακμές που προκύπτουν όμως κατά την εκλέπτυνσή τους (βήμα 5) είναι ψευδείς και δεν οριοθετούν τη χερσαία επιφάνεια. Επομένως, ορθά ανιχνευμένα εικονοστοιχεία μπορεί εσφαλμένα να χαρακτηρίζονται ως FN (από λάθος του αλγορίθμου δεν έχουν ανιχνευτεί). Τέλος, κατά την επαναφορά απεικονίσεων από μεγαλύτερες σε μικρότερες διαστάσεις (βήμα 4), παρουσιάστηκαν κάποια κενά στην ακτογραμμή αναφοράς, με αποτέλεσμα και σε αυτή την περίπτωση ορθά ανιχνευμένα εικονοστοιχεία να χαρακτηρίζονται εσφαλμένα ως FP (το πρόβλημα αυτό παρουσιάστηκε στις εφαρμογές 4^η, 5^η, 8^η, 9^η).

Τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν παραπάνω – και αναλυτικότερα στο προηγούμενο εδάφιο – καθιστούν τη χρήση των υλοποιημένων αλγορίθμων κατωφλίωσης και συσταδοποίησης Κ-μέσου **επιτυχή**, έπειτα από εφαρμογή τους σε ένα εύρος απεικονίσεων ποικίλων χαρακτηριστικών και απαιτήσεων. Ένας επιπλέον παράγοντας επιτυχίας είναι η χρήση τεχνικών που δεν «εκμεταλλεύονται» τις χωρικές συσχετίσεις εκάστου εικονοστοιχείου με το περιβάλλον του, κι επομένως η όποια εργασία ή μελέτη παρουσιάζει έντονες και αντικειμενικές δυσκολίες. Τα συμπεράσματα αυτά αντικατοπτρίζονται και στις κλίμακες χαρτογραφήσεων οι οποίες καλύπτονται και παρουσιάζονται στη συνέχεια. Ο υλοποιημένος αλγόριθμος εντροπίας, ωστόσο, δεν παρουσίασε τα αντίστοιχα αποτελέσματα. Οι προτάσεις οι οποίες διαμορφώθηκαν για όλα τα στάδια της μεθοδολογίας εκτιμάται ότι θα βελτιώσουν την αποτελεσματικότητά της. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί σε απεικονίσεις που περιλαμβάνουν λιμένες, καθώς η παρουσία τους δεν είναι αναπόσπαστη των παράκτιων χαρτογραφήσεων. Σημαντικό είναι το γεγονός ότι παρουσιάζονται ενθαρρυντικά αποτελέσματα ακόμα και σε απεικονίσεις που έχουν ληφθεί από το Internet (εφαρμογές 6^η, 7^η, 8^η, 9^η).

Όσον αφορά στις **απεικονίσεις υψηλής χωρικής διακριτικής ικανότητας**, εκτιμάται ότι ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή είναι δυνατό να καλυφθούν:

(α) οι προδιαγραφές χαρτογραφήσεων μέγιστης κλίμακας 1:13.000 έως και 1:7.000, με χρήση απεικονίσεων QUICKBIRD (pan-sharpened), διακριτικής ικανότητας 0,7m. Οι ακρίβειες που επιτυγχάνονται είναι $\pm 2,8m$ έως $\pm 1,4m$, αντίστοιχα (± 4 και ± 2 εικονοστοιχεία, αντίστοιχα).

(β) οι προδιαγραφές χαρτογραφήσεων μέγιστης κλίμακας 1:9.000 έως και 1:5.000, με χρήση απεικονίσεων WORLDVIEW-2 (pan-sharpened), διακριτικής ικανότητας 0,5m. Οι ακρίβειες που επιτυγχάνονται είναι $\pm 2m$ έως $\pm 1m$, αντίστοιχα (± 4 και ± 2 εικονοστοιχεία, αντίστοιχα).

Η επίτευξη τέτοιων κλιμάκων για μια αυτοματοποιημένη μεθοδολογία είναι πολύ σημαντική, δεδομένου ότι ανάλογες χειροκίνητες εργασίες της Κτηματολόγιο Α.Ε. γίνονται για χαρτογραφικά προϊόντα μέγιστης κλίμακας 1:5.000. Τονίζεται ότι οι προδιαγραφές που είναι δυνατό να καλύπτονται εξαρτώνται άμεσα από τις εκάστοτε απαιτήσεις.

Όσον αφορά στην **ASTER** απεικόνιση, διακριτικής ικανότητας 15m, εφόσον τα αποτελέσματα της υλοποιημένης μεθοδολογίας είχαν ενθαρρυντικά αποτελέσματα, κρίνεται ότι πρέπει να ερευνηθεί περαιτέρω, τόσο αλγοριθμικά όσο και σε ευρύτερο πεδίο εφαρμογών. Από τη συγκεκριμένη εφαρμογή κρίνεται ότι είναι δυνατό να καλυφθούν οι προδιαγραφές χαρτογραφήσεων μέγιστης κλίμακας 1:150.000. Η ακρίβεια που επιτυγχάνεται είναι $\pm 30m$ (± 2 εικονοστοιχεία). Αυτό είναι ελπιδοφόρο για την ανάπτυξη μιας ενιαίας αυτόματης μεθοδολογίας για δεδομένα μεσαίας χωρικής διακριτικής ικανότητας.

Οι radar απεικονίσεις έχουν μερικά χαρακτηριστικά τα οποία είναι ριζικά διαφορετικά από αυτά των απεικονίσεων οι οποίες έχουν ληφθεί με ηλεκτροοπτικούς δέκτες και αεροφωτογραφίες. Επομένως, η ανάλυσή τους απαιτεί ειδικές γνώσεις, οι οποίες δεν ήταν δυνατόν να καλυφθούν στο πλαίσιο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας. Η μελέτη τους σε ευρύτερο πεδίο εφαρμογών κρίνεται ότι πρέπει να ερευνηθεί περαιτέρω. Από την εφαρμογή της υλοποιημένης

μεθοδολογίας σε απεικονίσεις **TERRASAR-X** διακριτικής ικανότητας 3m, κρίνεται ότι είναι δυνατό να καλυφθούν οι προδιαγραφές χαρτογραφήσεων μέγιστης κλίμακας 1:54.000. Η ακρίβεια που επιτυγχάνεται είναι $\pm 12\text{m}$ (± 4 εικονοστοιχεία). Αν και η κλίμακα που επιτυγχάνεται είναι ενθαρρυντική, δεδομένων των απαιτήσεων των SAR εικόνων, για την ανάπτυξη μιας ενιαίας αυτόματης μεθοδολογίας σε αυτά, ωστόσο απαιτείται πιο εξειδικευμένη μελέτη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

5 Συμπεράσματα – Προοπτικές

Σύμφωνα με τους ευρωπαϊκούς κανονισμούς, ως **ακτογραμμή** ορίζεται «**η γραμμή που διαχωρίζει μια χερσαία επιφάνεια από έναν ωκεανό ή μια θάλασσα**», και αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά γραμμικά χαρακτηριστικά της γήινης επιφάνειας. Αναφέρεται σε μια χωρικά **συνεχή** γραμμή επαφής μεταξύ της στεριάς και της υδάτινης επιφάνειας (Boak και Turner, 2005). Βάσει του Corine Land Cover κάθε επιφάνεια που δεν αναγνωρίζεται ως «στεριά» μπορεί να θεωρηθεί «θάλασσα ή ωκεανός».

Η χαρτογράφηση και η ανίχνευση αλλαγών στη θέση της ακτογραμμής είναι μεγάλης σημασίας για την ασφάλη ναυσιπλοΐα, την προστασία του περιβάλλοντος, την αιεφόρο ανάπτυξη και διαχείριση πόρων στο παράκτιο περιβάλλον και το σχεδιασμό αυτού. Η γνώση της θέσης της ακτογραμμής είναι η βάση για την απόδοση χερσαίων και υδάτινων πόρων, αλλά και για τη διεξαγωγή μετρήσεων σε αυτούς (Liu και Jezek, 2004). Επομένως, είναι θεμελιώδης η εργασία ανίχνευσής της σε διάφορες χρονικές περιόδους. Η αλλαγή της θέσης της ακτογραμμής εξαιτίας διαβρώσεων και εναπόθεσης υλικών είναι ένα μείζων ζήτημα της διαχείρισης παράκτιων περιοχών. Η έντονη δυναμική ορισμένων ακτογραμμών εγκυμονεί κινδύνους όσον αφορά στην ανθρώπινη χρήση και ανάπτυξη κι επομένως απαιτούνται ταχείες τεχνικές για την αναβάθμιση των χαρτών των περιοχών αυτών.

Μέχρι σήμερα έχουν, κυρίως, αναπτυχθεί χειρονακτικές τεχνικές εξαγωγής της ακτογραμμής, οι οποίες κατά κύριο λόγο βασίζονται σε μετρήσεις πεδίου με ή/ και χωρίς το συνδυασμό τεχνικών φωτοερμηνείας. Τα τελευταία κυρίως χρόνια έχουν αναπτυχθεί τεχνικές για την ημι-αυτόματη και αυτόματη ανίχνευση ακτογραμμών από εναέρια και δορυφορικά δεδομένα με σκοπό την εξαγωγή του μετώπου της ακτογραμμής τη δεδομένη στιγμή της λήψης των δεδομένων και την μέτρηση δεικτών απαραίτητων για τον προσδιορισμό της ακτογραμμής (Boak και Turner, 2005). Ωστόσο, πολλές μελέτες που αφορούν στην εξέλιξη της ακτογραμμής και που διεξήχθησαν σε διάφορες ακτές, δείχνουν ότι ο εντοπισμός της σε μια δεδομένη χρονική στιγμή δεν δίνει αξιόπιστα δεδομένα για την καθιέρωση μακροπρόθεσμων τάσεων, λόγω υψηλής μεταβλητότητας. Αυτό οφείλεται τόσο στις αλλαγές στο σχήμα της παραλίας όσο και στον εντοπισμό της επιφάνειας της θάλασσας. Ως εκ τούτου είναι σημαντική η δημιουργία μιας μεγάλης βάσης δεδομένων.

Περιοχές που χαρακτηρίζονται από ταχύτατη ανάπτυξη, καθιστούν δύσκολη την ανίχνευση των περισσότερων αλλαγών της ακτογραμμής με τις παραδοσιακές μεθόδους. Η χρήση αεροφωτογραφιών για το σκοπό αυτό είναι ασύμφορη τόσο από οικονομικής πλευράς όσο και ως προς την επεξεργασία τους. Η συλλογή, διόρθωση, ανάλυση και μεταφορά της πληροφορίας από τις αεροφωτογραφίες σε χάρτες απαιτούν χρόνο και δεν είναι οικονομικές. Επιπλέον, η χρήση ασπρόμαυρων εικόνων δημιουργεί προβλήματα, όπως το ότι η αντίθεση στο φασματικό εύρος των παγχρωματικών εικόνων ανάμεσα στο νερό – ιδιαίτερα όταν αυτό είναι θολό – και το έδαφος είναι η ελάχιστη και η ερμηνεία της ακτογραμμής είναι δύσκολη. Άλλοι

περιορισμοί είναι η έλλειψη επίκαιρων δεδομένων και γεωμετρικής ακρίβειας, εκτός αν έχει προηγηθεί ορθοαναγωγή, η επιβάρυνση του εξοπλισμού, η έλλειψη εξειδικευμένου προσωπικού. Επομένως, τα δορυφορικά συστήματα, τα οποία παρέχουν ψηφιακές εικόνες σε υπέρυθρα κανάλια όπου διαχωρίζεται καλά το έδαφος από το νερό, αλλά και οι τεχνικές επεξεργασίας εικόνας, παρέχουν μια πιθανή λύση σε κάποια από τα προβλήματα δημιουργίας και ενημέρωσης των χαρτών.

Οι δυνατότητες των τηλεπισκοπικών συστημάτων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παροχή επίκαιρων χωρικών δεδομένων για τα γεωγραφικά συστήματα αναφοράς (GIS), να διευκολύνουν την ανίχνευση και την παρακολούθηση της κίνησης της ακτογραμμής. Η Τηλεπισκόπηση παίζει σημαντικό ρόλο, από οικονομικής άποψης, για την απόκτηση χωρικών δεδομένων, εφόσον οι οπτικές εικόνες είναι απλές στην ερμηνεία τους και εύκολα διαθέσιμες. Επιπλέον, η απορρόφηση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στο υπέρυθρο μέρος του φάσματος από το νερό και η ισχυρή αντανάκλασή της από τη βλάστηση και το έδαφος, καθιστούν αυτές τις εικόνες ιδανικό συνδυασμό για τη χαρτογράφηση χερσαίων και υδάτινων σωμάτων. Τα χαρακτηριστικά αυτά του νερού, της βλάστησης και του εδάφους, καθιστούν ευρεία τη χρήση εικόνων με κανάλια στο ορατό και υπέρυθρο μέρος του φάσματος στην χαρτογράφηση της ακτογραμμής. Εικόνες μεσαίας (30 έως 5 m) και πολύ υψηλής (4 έως 1 m) ανάλυσης μπορούν να αξιοποιηθούν για να παρέχουν χωρική πληροφορία, η οποία μπορεί πολύ εύκολα να ενταχθεί στα συστήματα γεωγραφικών πληροφοριών. Οι δορυφορικές απεικονίσεις πολύ υψηλής ανάλυσης δημιουργούν μια νέα εποχή στην παρατήρηση της γήινης επιφάνειας – με σκοπό χαρτογραφήσεις, περιβαλλοντική παρακολούθηση, ανίχνευση αλλαγών και παροχή δεδομένων στις γεωεπιστήμες – και στην αυτόματη ανίχνευση της παράκτιας ζώνης.

Τα τελευταία χρόνια, η εξέλιξη των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών ενισχύει τη διαθεσιμότητα περισσότερων δεδομένων ακριβείας σε ψηφιακή μορφή. Το γεγονός αυτό επιτρέπει την ανάπτυξη των αυτοματοποιημένων συστημάτων με σκοπό την εξαγωγή στοιχείων, όπως οι ακτογραμμές. Παραδείγματα τέτοιων δεδομένων ακριβείας είναι απεικονίσεις πολύ υψηλής ανάλυσης (Ikonos, Quickbird, κ.ά), LIDAR, video και radar δεδομένα, πολύ πιο ακριβά από της μεσαίας ανάλυσης δορυφορικές εικόνες (Landsat, SPOT, κ.ά). Οι τεχνικές που έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια με εφαρμογή στα δεδομένα αυτά υπάγονται κυρίως στους τομείς της *Επεξεργασίας Εικόνας* και της *Όρασης Υπολογιστών* και δείχνουν ολοένα και περισσότερο την ανάγκη και την τάση ανάπτυξης **αυτοματισμών** στον τομέα όχι μόνο της Τηλεπισκόπησης, αλλά και της Φωτογραμμετρίας και της Χαρτογραφίας. Συγκεκριμένα, η εξαγωγή της ακτογραμμής ενυπάρχει στο πρόβλημα της ανίχνευσης ορίων των πεδίων της Όρασης Υπολογιστών και Επεξεργασίας Εικόνας. Τόσο η ανίχνευση ορίων όσο και η ανίχνευση ακμών, επεξεργασία υψής κ.ά., αποτελούν προσεγγίσεις της αυτόματης ανίχνευσης μια συνοριακής γραμμής. Η αυτόματη ανίχνευση μιας ανοιχτής συνοριακής γραμμής έχει μεγάλη σημασία στην επεξεργασία δορυφορικών εικόνων, όπως η ακτογραμμή στη χαρτογραφία, ο εντοπισμός πλοίων και η ανίχνευση του ορίζοντα στην πλοήγηση και την αυτόματη αναγνώριση στόχων.

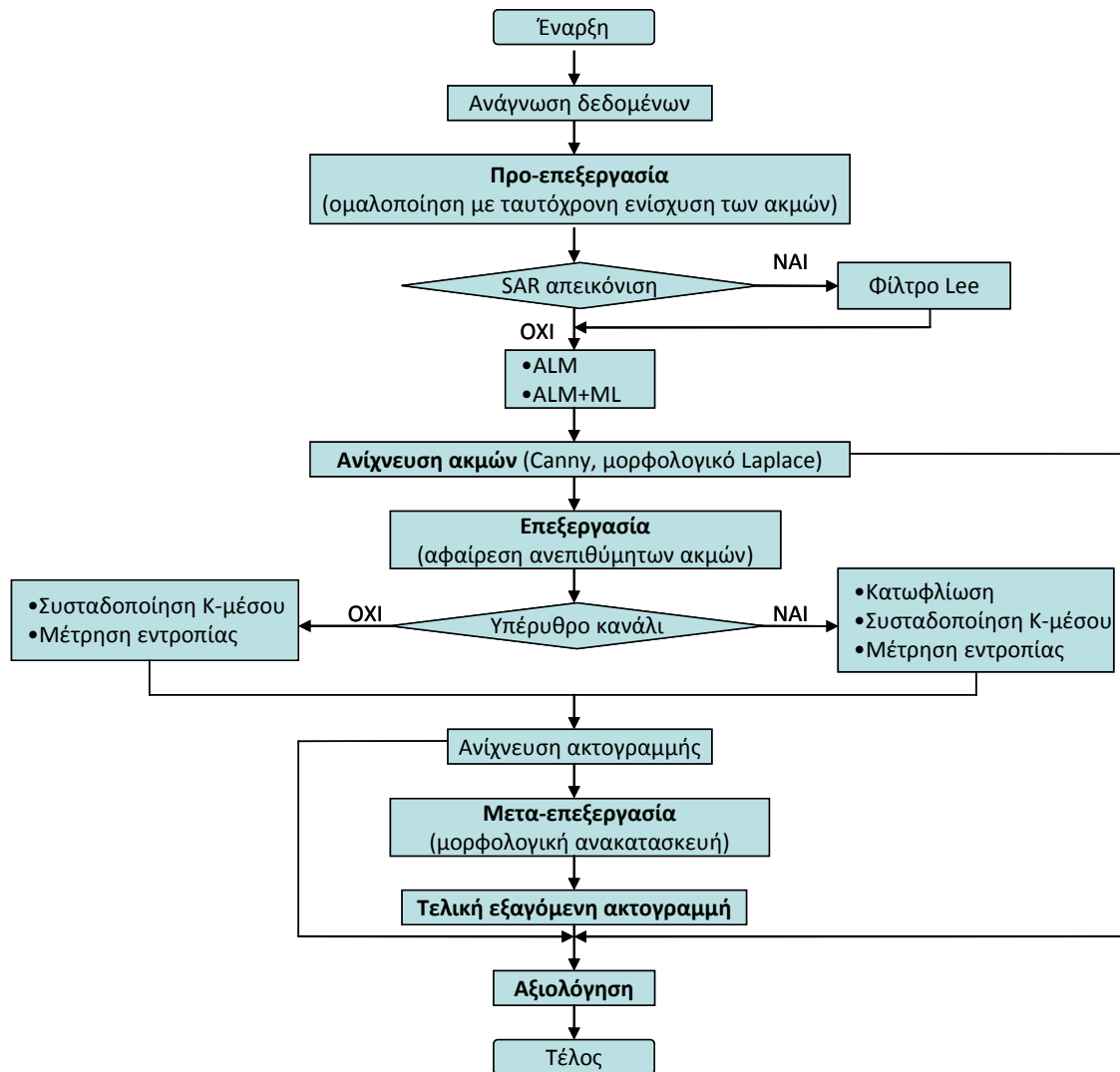
Βάσει της βιβλιογραφικής ανασκόπησης του κεφαλαίου 1, παρατηρείται σε ποσοστό περίπου 80% η χρήση ανεξάρτητων τεχνικών επεξεργασίας εικόνας βάσει αλγορίθμων για την εξαγωγή ακτογραμμών, εν αντιθέσει με τις ήδη υπάρχουσες, όπως φωτοερμηνεία και έτοιμα πακέτα λογισμικού, ποσοστό το οποίο δείχνει αφενός την ανάγκη δημιουργίας σύγχρονων μεθόδων και τεχνικών επεξεργασίας τηλεπισκοπικών δεδομένων, αφετέρου πόσο εξελίξιμο είναι το επιστημονικό πεδίο της Επιστήμης Υπολογιστών σε ό,τι αφορά την Τηλεπισκόπηση αλλά και άλλες επιστήμες, όπως η Ιατρική. Παράλληλα, παρατηρήθηκε ότι τα δορυφορικά δεδομένα ηλεκτρο-οπτικών δεκτών αποτελούν τον καλύτερο συνδυασμό αποτελεσματικότητας, διαθεσιμότητας και οικονομικότητας για την ημι-αυτόματη και αυτόματη εξαγωγή της θέσης μιας ακτογραμμής. Η χρήση δορυφορικών απεικονίσεων υψηλής διακριτικής ικανότητας για το σκοπό αυτό, αν και είναι οριακά μικρότερη από αυτά της μεσαίας ανάλυσης, τελικά εκτιμήθηκε ως η πιο έντονη, λόγω του μειονεκτημάτος τους ως προς την οικονομικότητα και του πλεονεκτήματος της καλύτερης ανάλυσης.

Οι παράμετροι από τις οποίες εξαρτάται η επιλογή των κατάλληλων τηλεπισκοπικών δεδομένων ποικίλουν. Βασικός άξονας για την επιλογή αυτή είναι οι *απαιτήσεις* της εκάστοτε εφαρμογής. Αυτές αφορούν:

- Τις απαιτούμενες ακρίβειες.
- Στον τύπο και τη λειτουργία (στην περίπτωση των SAR) των δεδομένων.
- Στο κόστος των δεδομένων.
- Στην περιοχή μελέτης, καθώς τίθενται περιορισμοί από τις ελάχιστες παραγγελίες.

Όπως τονίστηκε, λοιπόν, στην εποχή της Γεωπληροφορικής, είναι απαραίτητη η έρευνα και η υλοποίηση ημι-αυτόματων και αυτόματων διαδικασιών επεξεργασίας και εξαγωγής γεωπληροφορίας για την παρακολούθηση του παγκόσμιου περιβάλλοντος, εφόσον τεράστιος όγκος δεδομένων μπορεί πλέον να ληφθεί σε *πραγματικό χρόνο* και είναι σκόπιμο να διαχειρίζεται *συστηματικά και σε σύντομο χρονικό διάστημα*. Στο πλαίσιο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, αναπτύχθηκε μεθοδολογία με σκοπό την **ανίχνευση ακτογραμμών με έμφαση στη χρήση προηγμένων τεχνικών ομαλοποίησης και τον τελεστή Canny**. Βασικό στόχο της εφαρμογής αποτέλεσε η ανάπτυξη μιας μεθοδολογίας κατά το δυνατόν ενιαίας για δεδομένα ιδίων χαρακτηριστικών, εν προκειμένω για απεικονίσεις υψηλής ανάλυσης. Παράλληλα, *διερευνήθηκε* η δυνατότητα επέκτασής της σε απεικονίσεις μεσαίας διακριτικής ικανότητας καθώς και σε απεικονίσεις SAR.

Το πεδίο εφαρμογών περιελάμβανε έξι απεικονίσεις QUICKBIRD (4) και WORLDVIEW-2 (2) υψηλής χωρικής διακριτικής ικανότητας (0,7 και 0,5 m, αντίστοιχα), μία απεικόνιση ASTER μεσαίας χωρικής διακριτικής ικανότητας (15 m) και δύο απεικονίσεις TERRASAR-X υψηλής χωρικής διακριτικής ικανότητας (3 m). Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε περιγράφεται στο παρακάτω διάγραμμα ροής.



Σχήμα 5.1: Διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε, με σκοπό τη διερεύνηση ανίχνευσης ακτογραμμής από τηλεπισκοπικά δεδομένα με προηγμένες τεχνικές ομαλοποίησης.

Η επιλογή της συγκεκριμένης μεθοδολογίας έγκειται στο γεγονός ότι η αυτόματη εξαγωγή της ακτογραμμής από ψηφιακά δεδομένα, αφορά στο πρόβλημα της ανίχνευσης ορίων των πεδίων της Όρασης Υπολογιστών και Επεξεργασίας Εικόνας, στα οποία η ανίχνευση ακμών είναι συνήθης προσέγγιση της ανίχνευσης ορίων (άλλη προσέγγιση είναι η κατάτμηση). Ο αλγόριθμος του Canny (1986) είναι γνωστός ως ο βέλτιστος ανιχνευτής ακμών, γι' αυτό κρίθηκε σκόπιμο να μελετηθεί η εφαρμογή του.

Παρατηρήθηκε ότι το τελικό εξαγόμενο προϊόν εξαρτάται από πολλές παραμέτρους, οι οποίες είναι οι ακόλουθες:

- Ποιότητα και απαιτήσεις απεικόνισης.
- Τελεστής Canny.
- Τεχνικές προ-επεξεργασίας και παράμετροι αυτών, οι οποίες αφορούν στον αριθμό των επαναλήψεων των τεχνικών ομαλοποίησης.

- Τεχνικές επεξεργασίας και παράμετροι αυτών, οι οποίες αφορούν στην επιλογή του κατάλληλου κατωφλίου (κατωφλίωση), τον αριθμό των συστάδων (συσταδοποίηση K-μέσου) και τα επίπεδα της πολυεπίπεδης κατωφλίωσης (εντροπία).
- Εργαλεία μετα-επεξεργασίας και παράμετροι αυτών, οι οποίες αφορούν στην επιλογή των κατάλληλων εργαλείων μορφολογικής ανακατασκευής και των παραμέτρων τους.
- Ψηφιοποίηση ακτογραμμής αναφοράς και μετατροπή των διανυσματικών αρχείων σε ψηφιδωτά.

Βάσει των αποτελεσμάτων που παρουσιάστηκαν η χρήση των υλοποιημένων αλγορίθμων κατωφλίωσης και συσταδοποίησης K-μέσου κρίνεται **επιτυχής**, έπειτα από εφαρμογή της σε ένα εύρος απεικονίσεων ποικίλων χαρακτηριστικών και απαιτήσεων, δεδομένου ότι εφαρμόστηκαν τεχνικές που δεν «εκμεταλλεύονται» τις χωρικές συσχετίσεις εκάστου εικονοστοιχείου με το περιβάλλον του, κι επομένως η όποια εργασία ή μελέτη παρουσιάζει έντονες και αντικειμενικές δυσκολίες. Τα συμπεράσματα αυτά αντικατοπτρίζονται και στις κλίμακες χαρτογραφήσεων οι οποίες καλύπτονται. Σημαντικό είναι το γεγονός ότι παρουσιάζονται ενθαρρυντικά αποτελέσματα ακόμα και σε απεικονίσεις που έχουν ληφθεί από το Internet (εφαρμογές 6^η, 7^η, 8^η, 9^η). Ο υλοποιημένος αλγόριθμος εντροπίας, ωστόσο, δεν παρουσίασε τα αντίστοιχα αποτελέσματα. Τα αποτελέσματα του υλοποιημένου αλγορίθμου στις περιπτώσεις διερεύνησης της εφαρμογής του σε ASTER και SAR δεδομένα, ήταν **ενθαρρυντικά**. Για περισσότερα στοιχεία προτείνεται η ανάγνωση του υποκεφαλαίου 4.10.

Τέλος, οι προτάσεις οι οποίες διαμορφώθηκαν για όλα τα στάδια της μεθοδολογίας εκτιμάται ότι θα βελτιώσουν την αποτελεσματικότητά της. Οι προτάσεις – προοπτικές εντοπίζονται στα εξής σημεία:

- Βελτίωση του αλγορίθμου των Van Vliet et al. (1989) για το μορφολογικό φενομενισμό της δεύτερης παραγωγού.
- Βελτίωση του αλγορίθμου συσταδοποίησης για τη δημιουργία περισσότερων κλάσεων (π.χ. υπολογισμός αποστάσεων με βάρη αξιοποιώντας τιμές φωτεινότητας, υφή ή εικονοσυντεταγμένες).
- Χρήση συστημάτων ανθρώπινης γνώσης.
- Χρήση τεχνικών συγχώνευσης πληροφορίας (fusion) για την εξαγωγή της ακτογραμμής έπειτα από μέτρηση της εντροπίας.
- Μελέτη εναλλακτικών μεθόδων μέτρησης υφής (π.χ. Haralick, Gabor).
- Μελέτη προηγμένων αλγορίθμων αποκατάστασης της συνεκτικότητας (π.χ. curve fitting, χρήση παρεμβολής) για τη βελτίωση των εξαγόμενων ακτογραμμών.
- Παροχή των εξαγόμενων ακτογραμμών σε συστήματα γεωγραφικών πληροφοριών.
- Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί σε απεικονίσεις που περιλαμβάνουν λιμένες, καθώς η παρουσία τους δεν είναι αναπόσπαστη των παράκτιων χαρτογραφήσεων. Περαιτέρω μελέτη προς αυτήν την κατεύθυνση.

- Χρήση υπερφασματικών δεδομένων σε εφαρμογές ευρύτερου πεδίου και βελτίωση του αλγορίθμου όπου απαιτείται.
- Εξειδικευμένη μελέτη των SAR απεικονίσεων και βελτίωση του αλγορίθμου όπου απαιτείται. Χρήση ευρύτερου πεδίου εφαρμογών.

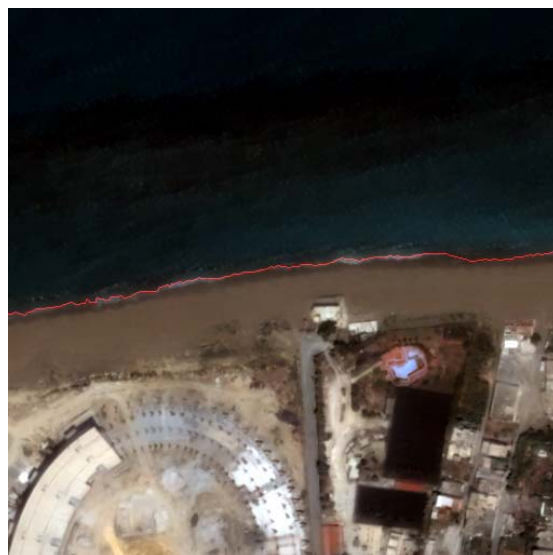
Στο Παράρτημα επισυνάπτονται τα δεδομένα αναφοράς που χρησιμοποιήθηκαν.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

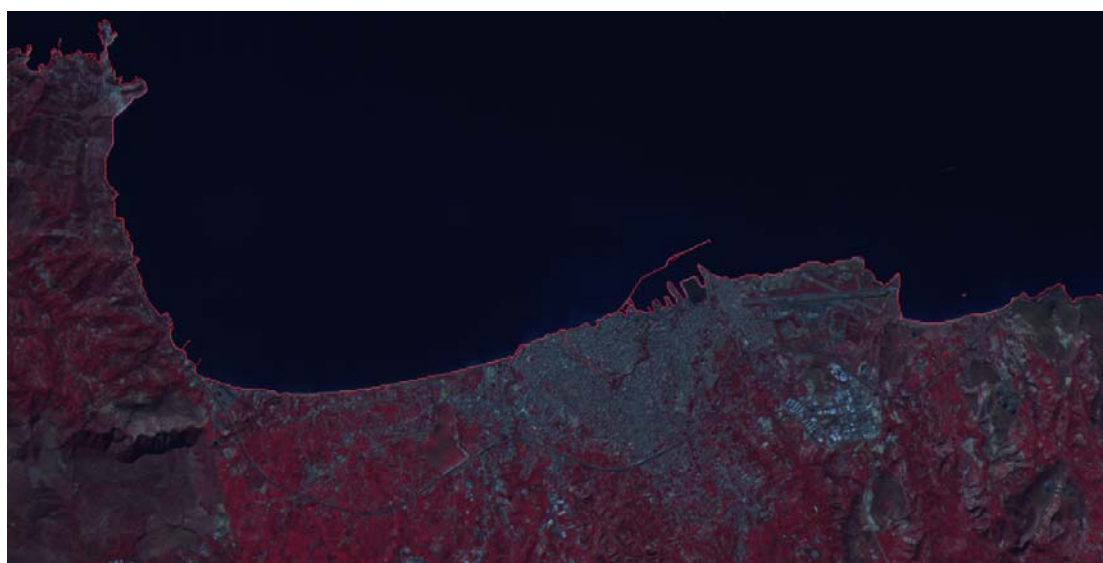
Στη συνέχεια επισυνάπτονται τα δεδομένα αναφοράς που χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση, έπειτα από χειροκίνητη ψηφιοποίηση της ακτογραμμής και μετατροπή των διανυσματικών αρχείων σε ψηφιδωτά.



Ακτογραμμή αναφοράς – Εφαρμογή 1^η



Ακτογραμμή αναφοράς – Εφαρμογή 2^η



Ακτογραμμή αναφοράς – Εφαρμογή 3^η



Ακτογραμμή αναφοράς – Εφαρμογή 4^η



Ακτογραμμή αναφοράς – Εφαρμογή 5^η



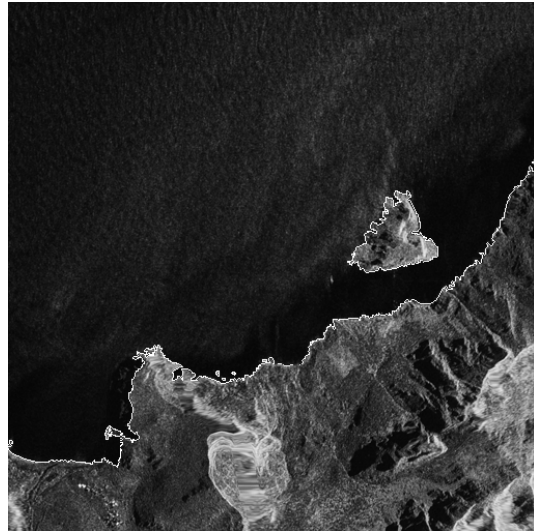
Ακτογραμμή αναφοράς – Εφαρμογή 6^η



Ακτογραμμή αναφοράς – Εφαρμογή 7^η



Ακτογραμμή αναφοράς – Εφαρμογή 8^η



Ακτογραμμή αναφοράς – Εφαρμογή 9^η

*** Ευχαριστώ θερμά το Λέκτορα Κωνσταντίνο Καράντζαλο για την ευγενική παροχή των αλγορίθμων ASF, ALM και ML, καθώς και για την καθοδήγησή του. Ιδιαίτερα, για τις υποδείξεις του στο προγραμματιστικό μέρος της Διπλωματικής μου Εργασίας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Αργιαλάς, Δ., 1998. «Ψηφιακή Τηλεπισκόπηση», Διδακτικές Σημειώσεις Σ.Α.Τ.Μ., Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- Αργιαλάς, Δ., 1999. «Φωτοερμηνεία-Τηλεπισκόπηση», Διδακτικές Σημειώσεις Σ.Α.Τ.Μ., Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- Γεωργόπουλος, Α., 1998. «Ψηφιακή Φωτογραμμετρία, Σημειώσεις», Διδακτικές Σημειώσεις Σ.Α.Τ.Μ., Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- Καραθανάση, Β., 2001. «Ραδιομετρία-Μικροκυματική Τηλεπισκόπηση», Διδακτικές Σημειώσεις Σ.Α.Τ.Μ., Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- Καράντζαλος, Κ., 2000. «Ανίχνευση ακμών σε εναέριες και δορυφορικές εικόνες», Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- Καράντζαλος, Κ., 2007. «Αυτόματη εξαγωγή χαρακτηριστικών από εναέριες και δορυφορικές εικόνες με τεχνικές υπολογιστικής όρασης», Διδακτορική Διατριβή, Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- Συκάς, Δ., 2010. «Γεωμετρικές διορθώσεις SAR και υπερφασματικών δορυφορικών τηλεπισκοπικών απεικονίσεων. Έλεγχος ακρίβειας της συμπροσαρμογής τους», Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- Χαλκίδη, Μ. και Μ. Βαζιργιάννης, 2005. «Εξόρυξη γνώσης από βάσεις δεδομένων και τον Παγκόσμιο Ιστό», Εκδόσεις Τυπωθήτω – Γιώργος Δαμιανός, Δεύτερη έκδοση.
- Addo, K.A., Walkden, M. and J.P. Mills, 2008. "Detection, measurement and prediction of shoreline recession in Accra, Ghana," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 63, pp. 543-558.
- Alesheikh, A.A., Ghorbanali, A., and N. Nouri, 2007. "Coastline change detection using remote sensing," *International Journal of Environmental Science and Technology*, 4, 1, pp. 61-66.
- Alvarez, L., Lions, P.L. and J.M. Morel, 1992. "Image selective smoothing and edge detection by nonlinear diffusion II," *SIAM J. Numer. Anal.*, 29, 3, pp. 845-866.
- Argialas, D. and C. Harlow, 1990. "Computational Image Interpretation Models: An Overview and a Perspective," *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 56, 6, pp. 871-886.
- Armenakis, C. and S. Savopol, 2004. "Image processing and GIS tools for feature and change extraction," *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, Vol. XXXV, Part B4, Com. IV, pp. 611-616.
- Bagli, S. and P. Soille, 2004. "Automatic delineation of shoreline and lake boundaries from LANDSAT satellite images," *Proc. Eco-Imagine Conf. GI and GIS for Integrated Coastal Management*, May 2004, Seville.
- Beucher, S. and C. Lantuejoul, 1979. "Use of watersheds in contour detection," *International Workshop on Image Processing*, pp. 12.
- Black, M., Sapiro, G., Marimont, D. and D. Heeger, 1998. "Robust Anisotropic Diffusion," *IEEE Trans. Image Processing*, 7, 3, pp. 421-432.

- Boak, E.H. and I.L. Turner, 2005. "Shoreline definition and detection: A review," *Journal of Coastal Research*, 21, 4, pp. 668-703.
- Bosworth, J.H. and S.T. Acton, 2003. "Morphological scale-space in image processing," *Digital Signal Processing*, 13, pp. 338-367.
- Canny, J., 1986. "A Computational Approach to Edge Detection," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 8, 6, pp. 679-698.
- Casas, J.R., 1996. "Image Compression based on Perceptual Coding Techniques," Phd Thesis, Barcelona.
- Cerimele, M.M., Cinque, L., Cossu, R. and R. Galiffa, 2009. "Coastline detection from SAR images by level set model," *Image Analysis and Processing – ICIAP 2009, Lecture Notes in Computer Science*, 5716, pp. 364-373.
- Chong, J., Ouyang, Y. and M. Zhu, 2008. "Two coastline detection methods based on improved level set algorithm in Synthetic Aperture Radar images," *International Journal of Remote Sensing*, 31, 17&18, pp. 4957-4968.
- Daugman, J.G., 1985. "Uncertainty relation for resolution in space, spatial frequency, and orientation optimization by two-dimensional visual cortical filters," *Journal of the Optical Society of America* 2, pp. 1160-1169.
- Della Rocca, M.R., Fiani, M., Fortunato, A. and P. Pistillo, 2004. "Active contour model to detect linear features in satellite images," *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 35, 3, pp. 446-450.
- Dellepiane, S., De Laurentiis, R. and F. Giordano, 2004. "Coastline extraction from SAR images and a method for the evaluation of the coastline precision," *Pattern Recognition Letters*, 25, 13, pp. 1461-1470.
- Descombes, X., Moctezuma, M., Maitre, H. and J.P. Rudant, 1996. "Coastline detection by a Markovian segmentation on SAR images," *Signal Processing*, 55, 1, pp. 123-132.
- Di, K., Ma, R. and R. Li, 2001. "Deriving 3-D shorelines from high resolution IKONOS satellite images with rational functions," *Proceedings of ASPRS Annual Convention*.
- Di, K., Wang, J., Ma, R., and R. Li, 2003. "Automatic shoreline extraction from high resolution IKONOS satellite imagery," *ASPRS Annual Conference Proceedings, May 2003, Anchorage, Alaska*.
- Gong, X., Subramanian, A. and C.L. Wyatt, 2007. "A two-stage algorithm for shoreline detection," *Eighth IEEE Workshop on Applications of Computer Vision (WACV'07)*.
- Guariglia, A., Buonamassa, A., Losurdo, A., Saladino, R., Trivigno, M.L., Zaccagnino, A. and A. Colangelo, 2006. "A multisource approach for coastline mapping and identification of shoreline changes," *Annals of Geophysics*, 49, 1, pp. 295-304.
- Heijmans, H.J.A.M., 1995. "A new class of alternating sequential filters," *IEEE Workshop on Nonlinear Signal and Image Processing*, 2, pp. 30-33.
- Heijmans, H.J.A.M., 1997. "Composing morphological filters," *IEEE Trans. Image Processing*, 6, 5, pp. 713-723.

- Heipke, C., Mayer, H., Wiedemann, C. and O. Jamet, 1997. "Evaluation of Automatic Road Extraction," *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 32, pp. 151–160.
- Huang, S.Q., Liu, D.Z., Gao, G.Q. and X.J. Guo, 2009. "A novel method for speckle noise reduction and ship target detection in SAR images," *Pattern Recognition*, 42, pp. 1533-1542.
- Jackway, P.T. and M. Deriche, 1996. "Scale-Space Properties of the Multiscale Morphological Dilation-Erosion," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 18, 1, pp. 38-51.
- J. S. Lee, 1981. "Speckle analysis and smoothing of synthetic aperture radar images," *Computer Graphics and Image Processing*, 17, pp. 24-32.
- Ju, C. and C. Moloney, 1997. "An edge-enhanced modified Lee filter for the smoothing of SAR image speckle noise," *IEEE Workshop on Nonlinear Signal and Image Processing*.
- Karantzalos, K., Argialas, D. and A. Georgopoulos, 2002. "Towards coastline detection from aerial imagery," *Proceedings IEEE International Conference of Digital Signal Processing*, 2, pp. 875-880, Santorini, Greece.
- Karantzalos, K. and D. Argialas, 2006. "Improving edge detection and watershed segmentation with anisotropic diffusion and morphological levellings," *International Journal of Remote Sensing*, 27, 24, pp. 5427-5434.
- Lee, I.C., Wu, B. and R. Li, 2009. "Shoreline extraction from the integration of LIDAR point cloud data and aerial orthophotos using mean shift segmentation," *Proceeding of the ASPRS 2009 Annual Conference Baltimore, Maryland*.
- Li, R., Di, K. and R. Ma, 2003. "3-D Shoreline extraction from IKONOS satellite imagery," *Journal of Marine Geodesy*, 26, pp. 107-115.
- Li, X.M., Zhu, L.L. and Y.D. Tang, 2009. "Boundary detection using open spline curve based on Mumford-Shah model," *Acta Automatica Sinica*, 35, 2, pp. 132-136.
- Li, X. and M.C.J. Damen, 2010. "Coastline change detection with satellite remote sensing for environmental management of the Pearl River Estuary, China," *Journal of Marine Systems*, 82, S1, pp. 54-61.
- Lipakis, M., Chrysoulakis, N. and Y. Kamarianakis, 2008. "Shoreline extraction using satellite imagery," In: Pranzini, E. and Wetzel, E. (eds): *Beach Erosion Monitoring. Results from BEACHMED/e-OpTIMAL Project (Optimization des Techniques Intégrées de Monitoring Appliquées aux Lottoraux) INTERREG IIIC South*. Nuova Grafica Fiorentina, Florence, Italy, pp. 81 – 95.
- Liu, H. and K. Jezek, 2004. "Automated extraction of coastline from satellite imagery by integrating Canny edge detector and locally adaptive thresholding method," *International Journal of Remote Sensing*, 25, 5, pp. 937-958.
- Liu, H. and K. Jezek, 2004. "A complete high-resolution coastline of Antarctica extracted from orthorectified Radarsat SAR imagery," *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 70, 5, pp. 605-616.

- Liu, H., Sherman, D. and S. Gu, 2007. "Automated extraction of shorelines from airborne LIDAR data and accuracy assessment based on Monte Carlo simulation," *Journal of Coastal Research*, 23, 6, pp. 1359-1369.
- Liu, H., Wang, L. and D. Sherman, 2007. "Object-based algorithms and software tools for extracting shoreline features from remote sensing imagery and LIDAR data," submitted to *Computers & Geosciences*.
- MacQueen, J., 1967. "Some methods for classification and analysis of multivariate observations," *Proceedings of 5-th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, Berkeley, University of California Press, 1, pp. 281-297.
- Maragos, P. and C. Vachier, 2008. "A PDE formulation for viscous morphological operators with extensions to intensity-adaptive operators," *Proc. Int'l Conference on Image Processing (ICIP-2008)*, San Diego, California, pp. 2200-2203.
- Mathematical Morphology: 40 Years On, 2005. *Proceedings of the 7th International Symposium on Mathematical Morphology*.
- Meyer, F. and P. Maragos, 1999. "Nonlinear Scale-Space Representation with Morphological Levelings," *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 11, pp. 245-265.
- Pei, S.C., Lai, C.L. and F.Y. Shih, 1997. "An efficient class of alternating sequential filters in morphology," *Graphics, Models and Image Processing*, 59, 2, 109-116.
- Perona, P. and J. Malik, 1990. "Scale space and edge detection using anisotropic diffusion," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 12, pp. 16-27.
- Puisant, A., Lefevre, S. and J. Weber, 2008. "Coastline extraction in VHR imagery using mathematical morphology with spatial and spectral knowledge," *Proceedings of The XXI Congress of International Society of Photogrammetry and Remote Sensing - ISPRS Beijing 2008, ThS 19 – Integrated Coastal Zone*, pp. 1305-1310.
- Robertson, W., Whitman, D., Zhang, K. and S.P. Leatherman, 2004. "Mapping shoreline position using airborne laser altimetry," *Journal of Coastal Research*, 20, 3, pp. 884-892.
- Ruiz, L.A., Pardo, J.E., Almonacid, J. and B. Rodriguez, 2007. "Coastline automated detection and multi-resolution evaluation using satellite images," *Proceedings of Coastal Zone 07, Portland, Oregon*.
- Salembier, P. and J. Serra, 1995. "Flat zones filtering, connected operators, and filters by reconstruction," *IEEE Transactions on Image Processing*, 4, 8, pp. 1153-1160.
- Serra, J., 1999. "Connections for sets and functions," pp. 40.
- Smit, M.W.J., Aarninkhof, S.G.J., Wijnberg, K.M., Gonzalez, M., Kingston, K.S., Southgate, H.N., Ruessink, B.G., Holman, R.A., Siegle, E., Davidson, M. and R. Medina, 2007. "The role of video imagery in predicting daily to monthly coastal evolution," *Coastal Engineering*, 54, pp. 539-553.
- Sternberg, S.R., 1986. "Grayscale Morphology," *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 35, pp. 333-355.

-
- Uunk, L., Wijnberg, K.M. and R. Morelissen, 2010. "Automated mapping of the intertidal beach bathymetry from video images," *Coastal Engineering*, 57, 4, pp. 461-469.
- Van, T.T. and T.T. Binh, 2008. "Shoreline change detection to serve sustainable management of coastal zone in Cuu Long estuary," *International Symposium of Geoinformatics for Spatial Infrastructure Development in Earth and Allied Sciences*.
- Van Vliet, L.J., Young, I.T. and G.L. Beckers, 1989. "A Nonlinear Laplace Operator as Edge Detector in Noisy Images," *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 45, pp. 167-195.
- Vincent, L., 1993. "Morphological Grayscale Reconstruction in Image Analysis: Applications and Efficient Algorithms," *IEEE Transactions on Image Processing*, 2, 2, pp. 176-201.
- White, K. and H.M. El Asmar, 1999. "Monitoring changing position of coastlines using Thematic Mapper imagery, an example from the Nile Delta," *Geomorphology*, 29, pp. 93-105.
- Wiedemann, C., Heipke, C., Mayer, H. and S. Hinz, 1998. "Automatic Extraction and Evaluation of Road Networks from MOMS-2P Imagery," *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 30, 3/1, pp. 285-291.
- Witkin, A.P., 1983. "Scale-space filtering," *Proc. 7th Int. Joint. Conf. Artificial Intelligence*, pp. 1019-1022.
- Woolard, J.W., Aslaksen, M., Longenecker, L.T.J. and A. Ryerson, 2003. "Shoreline mapping from airborne LIDAR in Shilshole Bay, Washington," *Proceedings of the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) National Ocean Service (NOS), U.S. Hydrographic Conference*.
- Yamano, H., Shimazaki, H., Matsunaga, T., Ishoda, A., McClennen, C., Yokoki, H., Fujita, K., Osawa, Y. and H. Kayanne, 2006. "Evaluation of various satellite sensors for waterline extraction in a coral reef environment: Majuro Atoll, Marshall Islands," *Geomorphology*, 82, pp. 398-411.