ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ – ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΑΣ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΑΥΤΟΜΑΤΗΣ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΠΑΡΑΘΥΡΟΥ ΕΛΑΧΙΣΤΟΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΗΣ ΣΥΝΤΑΥΤΙΣΗΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΑΝΑΓΛΥΦΟΥ ΧΩΡΙΣ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ

Σκαρλάτος Δημήτριος

ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:
Α. Γεωργόπουλος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Χ. Ιωαννίδης, Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Γ. Καρράς, Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, Ιούλιος, 2006

«Η έγκρισης διδακτορικής διατριβής υπό της Ανώτατης Σχολής Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, δεν υποδηλοί αποδοχήν των γνωμών του συγγραφέως»

(Ν. 5343/1932 άρθρο 202)

Ευχαριστίες

Είναι φανερό ότι μία μελέτη τόσων ετών δεν μπορεί να ολοκληρωθεί παρά μόνο με την συμπαράσταση και συμμετοχή πολλών ανθρώπων από το περιβάλλον του συγγραφέως.

Πέραν των ουσιαστικών ευχαριστιών στον επιβλέποντα, αλλά και συνοδοιπόρο στο ταξίδι αυτό, καθηγητή Ανδρέα Γεωργόπουλο, αισθάνομαι την ανάγκη να αναγνωρίσω την αστείρευτη διάθεση συνεργασίας του και τις υποδείξεις/κατευθύνσεις που μου δίδονταν πάντα με συμβουλευτικό χαρακτήρα.

Στους γονείς που μου έδειξαν την πόρτα και πίστεψαν ότι το ταξίδι αυτό θα είχε τέλος, οφείλω πολύ περισσότερα από ένα απλό ευχαριστώ για την αμέριστη εμπιστοσύνη, υπομονή και συμπαράστασή τους.

Ευχαριστώ το Ι.Κ.Υ. για την οικονομική του συμπαράσταση.

Επειδή στην σύγχρονη επιστήμη δεν υπάρχει παρθενογέννηση, η παρούσα εργασία ως επιστημονικό κείμενο δεν αποτελεί παρά ένα ψηφιδωτό πολλών επιμέρους προτάσεων, υποδείξεων και συζητήσεων με πολλούς συναδέλφους, βασικότεροι εκ των οποίων οι Αν. Καθ. Γιώργος Καρράς, Επ. Καθηγητής Χαράλαμπος Ιωαννίδης και Δρ. Μάνος Μπαλτσαβιάς. Συνετέλεσαν επίσης οι Λάζαρος Γραμματικόπουλος, Χάρις Παπασάικα, Γιώργος Γκότσης, Κώστας Βασιλειάδης, Σοφία Σοϊλέ, Σοφία Θεοδωρίδου και πολλοί άλλοι που ελπίζω να συγχωρέσουν την αδύνατη μνήμη μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα μελέτη διερευνά τις δυνατότητες βελτίωσης της ελαχιστοτετραγωνικής συνταύτισης με τον δυναμικό προσδιορισμό μεγέθους παραθύρου ελλειπτικού σχήματος. Παράλληλα αναπτύσει περαιτέρω τη μέθοδο του Norvelle για αυτόματο έλεγχο ΨΜΕ χωρίς χρήση δεδομένων αναφοράς.

Η ελαχιστοτετραγωνική συνταύτιση αποτελεί μια καθολικά αποδεκτή μέθοδο για αυτόματισμό πολλών διαδικασιών της φωτογραμμετρίας, όπως ο εσωτερικός και σχετικός προσανατολισμός, ο αεροτριγωνισμός, αλλά και η δημιουργία ψηφιακών μοντέλων εδάφους (ΨΜΕ). Η τελευταία αποτελεί ένα κρίσιμο στάδιο της φωτογραμμετρικής παραγωγής. Οι αναπόφευκτες αστοχίες πρέπει να εντοπισθούν και να διορθωθούν από το χειριστή. Στην περίπτωση που το τελικό προϊόν είναι σε μορφή κανάβου που έχει προκύψει με παρεμβολή, οι αστοχίες συμπαρασύρουν και γειτονικά σημεία καθιστώντας την διόρθωση ακόμα πιο δύσκολη.

Ένας από τους καθοριστικούς παράγοντες της συνταύτισης είναι το μέγεθος παραθύρου. Στην παρούσα μελέτη προτείνονται τρεις διαφορετικές μεθοδολογίες δυναμικού υπολογισμού μεγέθους παραθύρου. Ο έλεγχος τόσο των προτεινόμενων μεθοδολογιών όσο και όλων των σταθερών μεγεθών παραθύρων, γίνεται σε τεχνητά δεδομένα, και η τελική εφαρμογή σε ένα ζεύγος αεροφωτογραφιών κλίμακας 1:15000.

Το σχήμα παραθύρου συνταύτισης που χρησιμοποιείται ευρέως είναι το τετράγωνο, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι δεν θα μπορούσε να είναι και οτιδήποτε άλλο. Στην προσπάθεια να περιοριστεί ή και να εξαφανισθεί το φαινόμενο της διολίσθησης της λύσης κατά μήκος ακμών, χρησιμοποιείται ελλειπτικό σχήμα παραθύρου, σύμφωνα με τον πίνακα μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας της λύσης των ελαχίστων τετραγώνων. Με αυτό τον τρόπο, κατά την διάρκεια της επίλυσης το σχήμα είναι δυναμικό και προσαρμόζεται στις ανάγκες του προβλήματος.

Η στρατηγική συνταύτισης που χρησιμοποιήθηκε προκειμένου να ολοκληρωθεί ο αλγόριθμος συνταύτισης βασίζεται στην αντίστοιχη των Otto and Chau, σχεδιασμένη αρχικά για δορυφορικές εικόνες. Η μετατροπή έγινε με σκοπό να αντιμετωπίζονται πιο εύκολα μεγάλες επιφάνειες με ομοιόμορφους τόνους και απότομες αλλαγές κλίσης που είναι φαινόμενα πιο εντόνα σε εικόνες μεγαλύτερης κλίμακας.

Για τον έλεγχο των παραγομένων ΨΜΕ χρησιμοποιήθηκε η βασική ιδέα του Norvelle, ότι ορθοφωτογραφίες από γειτονικές αεροφωτογραφίες που έχουν παραχθεί με το ίδιο ΨΜΕ θα πρέπει να είναι γεωμετρικά πανομοιότυποες και τυχόν διαφορές οφείλονται σε προβλήματα του ΨΜΕ. Οι διαφορές αυτές μπορούν να εντοπισθούν από αλγόριθμο συνταύτισης και με κατάλληλο γεωμετρικό μοντέλο μπορούν να χρησιμοποιηθούν για διόρθωση ή έλεγχο ΨΜΕ. Το αρχικό και επαναληπτικό μοντέλο του Norvelle τροποιήθηκε ώστε να είναι ντετερμινιστικό και να υπολογίζει με ακρίβεια την θέση της διόρθωσης.

Για τον έλεγχο όλων των παραπάνω χρησιμοποιήθηκαν δύο στερεοζεύγη, ένα τεχνητό και ένα πραγματικό. Επειδή οι προτεινόμενες μεθοδολογίες είχαν μικρές σχετικά διαφορές μεταξύ τους, κρίθηκε απαραίτητη η χρήση τεχνητών δεδομένων ώστε να είναι γνωστό το ακριβές υψόμετρο σε κάθε σημείο και να μην εξαρτάται από προσανατολισμούς, την εκτίμηση του υψομέτρου από τον εκάστοτε χειριστή και την παρεμβολή του ΨΜΕ. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν επιβεβαιώθηκαν και με ένα πραγματικό στερεομοντέλο.

SUMMARY

The current study explores the possibilities of improving Least Squares Matching (LSM) using self-adapting window size and shape. It also improves the DTM checking without reference data according to the method~~,~~ proposed by Norvelle.

LSM is a widely accepted and used method for automation of many laborious tasks in photogrammetry, such as interior and relative orientations, aerial triangulation as well as generation of Digital Surface Models (DSM). The latter currently represents the bottle-neck of protogrammetric production. Unavoidable mismatches must be traced and corrected. If an interpolated grid is used for representation, local mismatches affect neighbouring grid points and correction process becomes even more tedious.

One of the most important factors in image matching is window size. Three different approaches are being investigated ~~by~~ in the current study. Application of the proposed methods as well as all possible window sizes~~,~~ and verification are carried out using artificial data for aerial images.

The window shape used almost exclusively in photogrammetry is square, although any other shape, not necessarily symmetrical, could be used. In order to diminish or even eliminate the unwanted effect of window sliding along linear features, an elliptical shape is being used instead. The exact shape in each iteration is being calculated through the covariance matrix of least squares, which "encodes" the problematic direction. Therefore, window shaping is dynamic and adapts locally and dynamically in each point.

The matching strategy adopted in this application is based on that presented by Otto and Chau, mainly for satellite imagery. The variation used here addresses the problematic areas with homogeneous tones and x-parallax discontinuities, phenomena which are more apparent in imagery of larger scales.

The DTM checking method has been based on the idea of Norvelle of using discrepancies between orthoimages created using the same DSM and neighbouring photos. The discrepancies as detected by image matching~~,~~ can be converted to DSM deviations and corrected. The new model proposed is non-iterative, unlike Norvelle's original approach.

For the verification of the proposed methods two pairs or images have been used; an artificial and a real one. The use of an artificial pair is justified by the minor differences between the proposed algorithms, and therefore the need for exact knowledge of elevation in any given point. Hence, there are no errors from aerial triangulation, manual collection and height interpolation. Finally, the conclusions from artificial data are being cross checked with the real data.

Περιεχόμενα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ..... 12
1.1. Επιλογή θέματος..... 12
1.1.1. Ο αντίκτυπος στις διαδικασίες παραγωγής..... 12
1.1.2. Εξάπλωση γραμμικών αισθητήρων..... 13
1.1.3. Αυξανόμενη ζήτηση ΨΜΕ και ορθοφωτοχαρτών..... 13
1.2. Τελική επιλογή..... 13
1.3. Η ειδικότερη εστίαση της παρούσας εργασίας..... 14
1.4. Δομή κειμένου..... 14
2. ΨΗΦΙΑΚΗ ΣΥΝΤΑΥΤΙΣΗ ΕΙΚΟΝΩΝ..... 16
2.1. Γενικά..... 16
2.2. Ιστορική διαδρομή..... 17
2.3. Βασικά προβλήματα..... 19
2.4. Δεσμεύσεις στην συνταύτιση..... 20
2.4.1. Ομοιότητα..... 20
2.4.2. Μοναδικότητα..... 20
2.4.3. Συνέχεια επιφάνειας..... 20
2.4.4. Διάταξη..... 20
2.4.5. Επιπολική γεωμετρία..... 21
2.5. Βασικά είδη συνταύτισης..... 22
2.5.1. Επιφανειακή συνταύτιση..... 22
2.5.1.1. Ελαχιστοτετραγωνική ή με συντελεστή συσχέτισης..... 22
2.5.2. Συνταύτιση χαρακτηριστικών..... 23
2.5.2.1. Συνταύτιση σημείων..... 23
2.5.2.2. Συνταύτιση ακμών..... 26
2.5.2.3. Συνταύτιση γραμμών..... 26
2.5.2.3.1. Η περιγραφή ψ-s..... 26
2.5.2.3.2. Γενικός μετασχηματισμός Hough..... 27
2.5.2.4. Συνταύτιση κλειστών πολυγώνων..... 27
2.5.3. Σχεσιακή συνταύτιση..... 28
2.5.4. Σύγκριση των παραπάνω τριών ειδών συνταύτισης..... 29
2.6. Άλλα είδη διάκρισης της ψηφιακής συνταύτισης..... 30
2.6.1. Με κριτήριο την εφαρμογή..... 30
2.6.2. Με κριτήριο την περιοχή εφαρμογής: Τοπικές, γενικές και συνδυαστικές (local, global & cooperative)..... 30
2.6.2.1. Γενικές μέθοδοι..... 30
2.6.2.2. Τοπικές μέθοδοι..... 31
2.6.2.3. Συνδυαστικές μέθοδοι..... 31
2.6.3. Με γνωστό ή άγνωστο προσανατολισμό..... 32
2.6.4. Άμεσες και έμμεσες..... 32
2.6.5. Άλλες ταξινομήσεις..... 32
2.6.5.1. Η ταξινόμηση Brown..... 32
2.6.5.2. Η ταξινόμηση των Scharstein και Szeliski..... 33
2.6.5.3. Η ταξινόμηση Oriot..... 33
2.7. Επιφανειακή συνταύτιση..... 33
2.7.1. Ραδιομετρικές διαφορές εικόνων..... 34
2.7.2. Βασικές παράμετροι της επιφανειακής συνταύτισης..... 35
2.7.2.1. Η επιλογή σημείων..... 35
2.7.2.2. Μέγεθος και σχήμα παραθύρου..... 36
2.7.2.3. Θέση του παραθύρου διερεύνησης..... 37
2.7.2.4. Κριτήρια αποδοχής..... 37
2.7.3. Συντελεστής συσχέτισης..... 38
2.7.4. Βασικό μοντέλο ελαχιστοτετραγωνικής συνταύτισης με έξι παραμέτρους..... 39
2.7.5. Με γνωστό προσανατολισμό (επιπολική γεωμετρία)..... 42
2.7.6. Μοντέλο με οκτώ παραμέτρους..... 44

2.7.7. Ελαχιστοτετραγωνική συνταύτιση με δύο αγνώστους..... 45
2.7.8. Αξιολόγηση των δύο βασικών μεθόδων επιφανειακής συνταύτισης 45
2.7.9. Χαρακτηριστικά της ελαχιστοτετρα-γωνικής συνταύτισης..... 46
2.8. Το πρόβλημα αρχικών τιμών και η αντιμετώπισή του 47
2.8.1. Η χρήση των πυραμίδων εικόνας..... 47
2.8.2. Η μέθοδος των Otto-Chau για δορυφορικές εικόνες..... 48
2.9. Ειδικές υλοποιήσεις και παραλλαγές συνταύτισης..... 49
2.9.1. Βασικές παραλλαγές του ελαχιστοτετραγωνικού μοντέλου..... 50
2.9.1.1. Ελαχιστοτετραγωνική συνταύτιση με δέσμευση X και Y..... 50
2.9.1.2. Ελαχιστοτετραγωνική συνταύτιση με δέσμευση Z..... 50
2.9.1.3. Ταυτόχρονη συνταύτιση πολλαπλών παραθύρων σε δύο εικόνες..... 50
2.9.1.4. Συνταύτιση πολλαπλών εικόνων..... 50
2.9.2. Άθροισμα των απολύτων διαφορών (L1-norm, LAD, SAD)..... 53
2.9.3. Παρακολούθηση γραμμικών στοιχείων..... 53
2.9.4. Δυναμικός προγραμματισμός..... 54
2.9.5. Τομές γραφημάτων (Graph Cuts)..... 57
2.9.6. Με χρήση κυκλώπειας γεωμετρίας (PMF)..... 58
2.9.7. Ογκομετρικές προσεγγίσεις (Voxels)..... 59
2.9.8. Νευρωνικά δίκτυα..... 60
2.9.9. Σταθεροί εκτιμητές (Robust Estimators)..... 61
2.9.10. Ύφεση (Relaxation)..... 62
2.9.11. Χρήση ασαφούς λογικής (Fuzzy logic)..... 62
2.9.12. Μεμονωμένες παραλλαγές..... 63
2.10. Εφαρμογές..... 64
2.10.1. Προσανατολισμοί..... 65
2.10.1.1. Εσωτερικός προσανατολισμός και εντοπισμός στόχων..... 65
2.10.1.2. Σχετικός προσανατολισμός..... 65
2.10.1.3. Δημιουργία ψηφιακών μοντέλων εδάφους..... 65
2.10.1.4. Μονοεικονική απόδοση..... 65
2.11. Περιθώρια βελτίωσης..... 66
3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ..... 68
3.1. Μέγεθος και σχήμα παραθύρου..... 68
3.1.1. Εφαρμογές σχετικές με το μέγεθος παραθύρου..... 69
3.1.2. Εφαρμογές σχετικά με το σχήμα παραθύρου..... 69
3.1.3. Εφαρμογές με μεταβλητό σχήμα και μέγεθος..... 70
3.1.4. Εφαρμογές με παράθυρα σε κατατετμημένες εικόνες..... 71
3.1.5. Αξιολόγηση αλγορίθμων..... 71
3.1.6. Προτεινόμενη μεθοδολογία προσδιορισμού μεγέθους παραθύρου..... 72
3.1.6.1. Στατιστική ανάλυση..... 72
3.1.6.2. Εντροπία..... 74
3.1.6.3. Τροποποίηση αλγορίθμου Förstner..... 76
3.1.6.4. Αρχική αξιολόγηση αλγορίθμων..... 76
3.1.6.4.1. Εφαρμογή σε εικόνες με διαφορετική ανάλυση..... 77
3.1.6.4.2. Εφαρμογή σε εικόνες με διαφορετικό βαθμό εξομάλυνσης..... 81
3.1.6.4.3. Εφαρμογή σε εικόνες με διαφορετικά αντικείμενα (μεγάλης κλίμακας)..... 83
3.1.6.4.4. Συμπεράσματα εφαρμογής μεθόδων υπολογισμού μεγέθους παραθύρου συνταύτισης..... 87
3.1.7. Προτεινόμενη μεθοδολογία προσδιορισμού σχήματος..... 87
3.1.7.1. Θεωρητικό υπόβαθρο..... 87
3.1.7.2. Μαθηματικό μοντέλο..... 88
3.2. Στρατηγική συνταύτισης..... 92
3.2.1. Προτεινόμενη στρατηγική συνταύτισης..... 92
3.2.1.1. Αξιολόγηση στρατηγικής συνταύτισης..... 94
3.3. Μεθοδολογίες ελέγχου ΨΜΕ..... 96
3.3.1. Χρήση ΨΜΕ αναφοράς..... 97
3.3.2. Με χρήση σημείων ελέγχου..... 98

3.3.3. Άλλοι τρόποι ελέγχου..... 99
3.4. Προτεινόμενη μεθοδολογία ελέγχου ΨΜΕ χωρίς δεδομένα αναφοράς..... 99
3.4.1. Η μέθοδος Norvelle..... 99
3.4.2. Προτεινόμενη τροποποίηση μεθόδου Norvelle για έλεγχο ΨΜΕ..... 101
3.4.2.1. Υπολογισμός οριζοντιογραφικής θέσης εφαρμογής διόρθωσης..... 101
3.4.2.2. Υπολογισμός μεγέθους διόρθωσης..... 103
3.4.3. Σχόλια σχετικά με την προτεινόμενη μέθοδο..... 104
4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ..... 107
4.1. Εισαγωγή..... 107
4.2. Αυτόματη επιλογή μεγέθους παραθύρου..... 107
4.2.1. Ακρίβεια παρατηρητή..... 108
4.2.2. Περιγραφή δημιουργίας τεχνητών δεδομένων..... 111
4.2.2.1. Δημιουργία ΨΜΕ..... 111
4.2.2.2. Δημιουργία Εικόνων με "ρεαλιστική" υφή..... 112
4.2.3. Αναμενόμενη ακρίβεια..... 114
4.2.3.1. Σύμφωνα με το εγχειρίδιο της ISM..... 114
4.2.3.2. Σύμφωνα με τον Kraus..... 115
4.2.3.3. Σύμφωνα με το Manual of Photogrammetry..... 116
4.2.3.4. Επιλογή κατωφλιού σφάλματος για την καταγραφή του ως αστοχία..... 116
4.2.4. Διαδικασία ελέγχου..... 117
4.2.4.1. Αρχικές τιμές..... 117
4.2.4.2. Ελαχιστοτετραγωνική συνταύτιση..... 118
4.2.4.3. Αξιολόγηση και περιγραφή μεγεθών ελέγχου..... 119
4.2.4.4. Ανάλυση σταθερών παραθύρων..... 121
4.2.4.5. Ανάλυση – Σύγκριση αποτελεσμάτων μεθόδων δυναμικής επιλογής μεγέθους..... 125
4.2.4.6. Συμπεράσματα..... 128
4.3. Σχήμα παραθύρου..... 129
4.3.1. Εφαρμογή έλλειψης και τετραγώνου με σταθερά παράθυρα..... 129
4.3.2. Εφαρμογή έλλειψης και τετραγώνου με τις μεθόδους δυναμικού υπολογισμού μεγέθους παραθύρων..... 130
4.3.2.1. Εξέταση ορισμένων περιπτώσεων ιδιαίτερα μικρής ακρίβειας..... 132
4.3.2.2. Ελλειπτικό παράθυρο παράλληλα ή κάθετα στην έλλειψη αβεβαιότητας;..... 134
4.3.3. Έλεγχος σχήματος παραθύρου για παραγωγή ΨΜΕ από τις τεχνητές εικόνες..... 136
4.3.4. Έλεγχος σχήματος παραθύρου για παραγωγή ΨΜΕ από πραγματικές εικόνες..... 139
4.3.4.1. Περιγραφή δεδομένων..... 139
4.3.4.2. Εφαρμογή συνταύτισης με τις τρεις προτεινόμενες μεθόδους σχήματος παραθύρου..... 140
4.3.4.3. Έλεγχος με ΨΜΕ αναφοράς..... 141
4.3.5. Έλεγχος σχετικού προσανατολισμού..... 143
4.3.5.1. Εφαρμογή στις τεχνητές αεροφωτογραφίες..... 144
4.3.5.2. Εφαρμογή στις πραγματικές φωτογραφίες..... 144
4.3.5.3. Υπολογισμός παραμέτρων σχετικού προσανατολισμού από εξωτερικό προσανατολισμό δύο εικόνων..... 145
4.3.5.4. Σύγκριση σχετικών προσανατολισμών..... 146
4.4. Χρήση προτεινόμενης μεθοδολογίας ελέγχου χωρίς ΨΜΕ αναφοράς..... 148
4.4.1. Έλεγχος προτεινόμενης μεθόδου με τεχνητά δεδομένα..... 148
4.4.2. Έλεγχος προτεινόμενης μεθοδολογίας με πραγματικά δεδομένα..... 150
4.4.3. Έλεγχος των προτεινόμενων μεθόδων σχήματος παραθύρου χωρίς ΨΜΕ αναφοράς..... 151
4.4.3.1. Εκτίμηση αναμενόμενης ακρίβειας..... 151
4.4.3.2. Αποτελέσματα ελέγχου χωρίς ΨΜΕ αναφοράς..... 151
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ..... 153
5.1. Μέγεθος παραθύρου..... 153
5.2. Σχήμα παραθύρου..... 154
5.3. Στρατηγική συσχέτισης..... 155
5.4. Μέθοδος ελέγχου χωρίς ΨΜΕ αναφοράς..... 155
5.5. Προβλήματα και περιορισμοί στην εφαρμογή της μεθόδου..... 156

5.6. Γενικά συμπεράσματα..... 156
5.7. Πιθανές εφαρμογές..... 157
5.8. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα..... 158
5.8.1. Διερεύνηση κριτηρίων τερματισμού ελαχιστοτετραγωνικής συσχέτισης..... 158
5.8.2. Συνδυασμός των τεχνικών συσχέτισης στη φωτογραμμετρία και στην μηχανική όραση..... 158
5.8.3. Επιλογή κατάλληλης κατανομής για τον έλεγχο των αποτελεσμάτων..... 158
5.8.4. Χρήση πολλαπλών φωτογραφιών..... 159
6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ..... 160

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Επιλογή θέματος

Η επιλογή αντικειμένου μίας πολυετούς ερευνητικής εργασίας σαν την παρούσα οφείλει να είναι σύμφωνη με την επιστημονική διάθεση του ερευνητή. Οφείλει επίσης να έχει πρωτοτυπία και, ενδεχομένως, πρακτική εφαρμογή. Σαν τέτοιο θέμα επιλεχθηκε η δημιουργία και ο έλεγχος ΨΜΕ με αυτόματες διαδικασίες.

Η αυτόματη ψηφιακή συνταύτιση εικόνων μαζί με την αυτόματη παραγωγή ΨΜΕ και παραγωγή ορθοφωτοχαρτών αποτελούν αντικείμενα της φωτογραμμετρικής διαδικασίας που έχουν μελετηθεί πολύ, χωρίς όμως αυτό να σημαίνει ότι δεν υπάρχουν περιθώρια βελτίωσης. Όλα τα πακέτα λογισμικού φωτογραμμετρίας έχουν κάποια μορφή αυτόματης συνταύτισης σημείων είτε στην φάση του εσωτερικού και σχετικού προσανατολισμού, είτε στον αυτόματο αεροτριγωνισμό, είτε στην αυτόματη συλλογή Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους (ΨΜΕ). Η ψηφιακή συνταύτιση αποτελεί ένα πεδίο με πλούσια βιβλιογραφία. Το γεγονός αυτό βοηθάει τουλάχιστον αρχικά στην βιβλιογραφική έρευνα του αντικειμένου. Η εφαρμογή όμως όλων αυτών, καθώς και ο εντοπισμός αδυναμιών, είναι σαφώς πιο απαιτητική εργασία.

Είναι επίσης κατανοητό ότι ερευνητικά αντικείμενα που απασχολούν τον χώρο επί δεκαετίες (όπως η ψηφιακή συνταύτιση εικόνων) είναι κυρίως αλγοριθμικά. Όταν οι υπολογιστές ήταν σε αρχικά στάδια εξέλιξης, τα προβλήματα που μπορούσαν να αντιμετωπισθούν ψηφιακά ήταν καταρχήν απλά και οι αλγόριθμοι αντίστοιχα απλοί. Σήμερα οι ερευνητές, βασισμένοι στην υπερπροσφορά υπολογιστικής ισχύος, σχεδιάζουν και εκπονούν πολυπλοκότερους αλγορίθμους προσεγγίζοντας τον χώρο της τεχνητής νοημοσύνης και ειδικότερα της τεχνητής όρασης. Οι αλγόριθμοι είναι ολοένα πολυπλοκότεροι προσπαθώντας να "μιμηθούν" την ανθρώπινη λογική.

1.1.1. Ο αντίκτυπος στις διαδικασίες παραγωγής

Την περίοδο που έγινε η ανάθεση του θέματος της διατριβής (Σεπτέμβριος 1998), εμπορικές εταιρείες όπως η Z(I (τέως Intergraph) και η Helava είχαν ήδη παρουσίασει πακέτα λογισμικού για ψηφιακή φωτογραμμετρία καλύπτοντας σχεδόν όλες τις εργασίες με αυτοματισμούς, ακόμα και τον αεροτριγωνισμό, μετατρέποντας ακόμα ένα ερευνητικό αντικείμενο σε παραγωγικό εργαλείο. Οποιαδήποτε εργασία λοιπόν σε αυτό το αντικείμενο θα έπρεπε να αντιπαρατεθεί και να συγκριθεί με αυτά.

Οι εταιρείες συμβούλων μηχανικών που αναλαμβάνουν μεγάλες χαρτογραφικές μελέτες αναγνωρίζουν σε προσωπικές συζητήσεις ότι σε επίπεδο χαρτογραφικού υποβάθρου από αεροφωτογραφίες (ή δορυφορικές εικόνες) η εργασία που καθυστερεί περισσότερο την διαδικασία παραγωγής είναι η συλλογή ΨΜΕ. Ορισμένες εταιρείες το αντιμετωπίζουν με χειρωνακτική συλλογή σημείων ευθύς εξαρχής, παρόλο που διαθέτουν λογισμικό αυτόματης συλλογής σημείων, ή αφιερώνουν πολύ χρόνο και βάρδιες για την διόρθωση των αυτόματων ΨΜΕ. Το γεγονός αυτό ανοίγει τον δρόμο για περαιτέρω έρευνα αφού το πρόβλημα, αν και έχει αντιμετωπισθεί στο παρελθόν, την παρούσα χρονική περίοδο αποτελεί ίσως το βασικότερο πρόβλημα στην αλυσίδα παραγωγής. Το γεγονός αυτό δεν αποτελεί έκπληξη αφού σε κάθε γνωστικό αντικείμενο η βελτίωση σε κάποιο τομέα αναδεικνύει μειονεκτήματα σε κάποιον άλλο. Η επί έτη ερευνητική ενασχόληση με τον αυτοματισμό του αεροτριγωνισμού, και τον αυτοματισμό στην παραγωγή ορθοφωτοχαρτών και μωσαϊκών, ανέδειξε ξανά ως μείζον πρόβλημα την ψηφιακή συνταύτιση.

Τα περισσότερα φωτογραμμετρικά πακέτα λογισμικού προσφέρουν δυνατότητα αυτόματης συλλογής ΨΜΕ, αλλά οι παράμετροι είναι αρκετές, ακόμα και σε φθηνά πακέτα, καθιστώντας έτσι τον μέσο χρήστη απλό παρατηρητή. Οι Karras (κ.ά., 1998) χρησιμοποιούν τις προεπιλεγμένες τιμές, ενώ ο Baltsavias (1996) παρατηρεί πως ακόμα και οι τεχνικοί υποστήριξης των εμπορικών αντιπροσώπων έχουν δυσκολίες στην επιλογή των παραμέτρων, καταλήγοντας μερικές φορές σε λανθασμένες επιλογές.

Ο αλγόριθμος ή ένα λογισμικό που δίνει λίγα (σχετικά) και σωστά σημεία είναι ίσως προτιμότερος από εκείνον που δίνει πολλά σημεία, τα οποία όμως χρειάζονται έλεγχο και πολύωρες διορθώσεις. Κύριο πρόβλημα είναι λοιπόν η αξιοπιστία των σημείων. Ένας χειριστής μπορεί εύκολα να συμπληρώσει με λίγα χαρακτηριστικά σημεία ή γραμμές αλλαγής κλίσεων περιοχές που στερούνται σημείων ή πληρότητας πληροφορίας.

1.1.2. Εξάπλωση γραμμικών αισθητήρων

Η ταχύτατη ανάπτυξη νέων δορυφόρων, καθώς και η χρήση γραμμικών αισθητήρων ακόμα και σε φωτομηχανές (ADS40 της Leica), καθιστά την εφαρμογή και χρήση της επιπολικής γεωμετρίας πιο δύσκολη. Κατά συνέπεια η δημιουργία ενός αλγορίθμου που, χωρίς να βασίζεται σε αυτή, εντοπίζει και μετράει ομόλογα σημεία σε δύο εικόνες θα ήταν πιο χρηστική, καθώς η εκ των υστέρων εφαρμογή του γεωμετρικού μοντέλου είναι απλούστερη.

Η επιπολική γραμμή στους γραμμικούς αισθητήρες μετατρέπεται σε καμπύλη λόγω της γεωμετρίας τους. Η κίνηση του αισθητήρα και η εξάρτηση του προσανατολισμού από τον χρόνο οδηγούν στην ανάγκη χρήσης καμπύλης αντί για γραμμή (Pateraki, Baltsavias 2004). Το ίδιο ακριβώς συμβαίνει και με τους δορυφορικούς αισθητήρες (Dare, 2004), που γνωρίζουν ολοένα μεγαλύτερη αποδοχή και αυξάνουν τις μετρητικές εφαρμογές τους. Τουλάχιστον κατά την περίοδο επιλογής ερευνητικού αντικειμένου, η χρήση επιπολικής καμπύλης και η τοπική προσέγγιση της επιπολικής γεωμετρίας στους γραμμικούς αισθητήρες είχε αβεβαιότητα 0.5-2 εικονοστοιχεία. Η υλοποίηση επιπολικής γεωμετρίας ήταν δύσκολη και η απαγκίστρωση προς έναν απλούστερο αλγόριθμο επιθυμητή.

1.1.3. Αυξανόμενη ζήτηση ΨΜΕ και ορθοφωτοχαρτών

Ένα ακόμα κριτήριο για την τελική επιλογή ήταν η διεθνώς αλλά και εγχώρια αναμενόμενα αυξανόμενη ζήτηση για ορθοφωτοχάρτες ως εναλλακτικό προϊόν των παραδοσιακών διαγραμμάτων. Η ορθοφωτογραφία έχει περισσότερη πληροφορία, δεν χρειάζεται ερμηνεία χαρακτηριστικών από τον παραγωγό παρά μόνο από τον χρήστη, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υπόβαθρο Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών και θεωρείται οικονομικότερη λύση.

Παράλληλα, οι αυξανόμενες τηλεπικοινωνιακές ανάγκες που αντικατροπτίζονται στην αύξηση των εταιρειών του χώρου, ιδιαίτερα των ασύρματων δικτύων, οδηγούν σε αύξηση της ζήτησης για ποιοτικά Ψηφιακά Μοντέλα Επιφανειών (ΨΜΕ). Η τεχνολογία των LIDAR προσαρμοσμένων σε ελικόπτερα ή αεροσκάφη αποτελεί μία σχετικά ακριβή λύση. Η φωτογραμμετρία απέναντι στα LIDAR διατηρεί σχετικά πλεονεκτήματα πέραν του κόστους (Baltsavias κ.ά., 2001).

Ταυτόχρονα, η ανάγκη για ενημέρωση των υπαρχόντων ΨΜΕ και ορθοφωτοχαρτών γίνεται επιτακτικότερη τώρα που υπάρχουν πλήρεις βάσεις σε ορισμένες χώρες, συμπεριλαμβανομένης και της δικής μας (ΨΜΕ ΓΥΣ, ΨΜΕ και ορθοφωτοχάρτες Υπ. Γεωργίας). Η ενημέρωσή τους γίνεται επιτακτική ανάγκη, οπότε η ανάπτυξη σχετικών μεθόδων και διαδικασιών θα πρέπει να είναι μέσα στους στόχους της εργασίας.

1.2. Τελική επιλογή

Για τους λόγους που προαναφέρθηκαν, σε συνδυασμό με τη χρονική στιγμή επιλογής θέματος, η έρευνα εστιάστηκε στην δημιουργία ενός αλγορίθμου που θα μπορούσε να δουλέψει χωρίς επιπολική γεωμετρία ή οποιαδήποτε άλλη γεωμετρική δέσμευση, γιατί κάτι τέτοιο δεν ισχύει (ή δεν υπολογίζεται εύκολα και ευθέως καθώς χρειάζεται επιπλέον στοιχεία INS/GPS/Stellar camera και επαναλήψεις) στους νέους εμπορικούς δορυφόρους υψηλής ανάλυσης και στην νέα ψηφιακή φωτομηχανή της LEICA/HELAVA (και γενικά στις μηχανές που στηρίζονται στην αρχή των γραμμικών σαρωτών). Η εξέλιξη και παρουσίαση νέων μοντέλων εφαρμογής επιπολικής γεωμετρίας σε γραμμικούς σαρωτές μπορεί από την μια να περιορίζει την αναγκαιότητα χρήσης ανεξάρτητης μεθόδου συνταύτισης, από την άλλη όμως η συνδυασμένη τους χρήση αναμένεται ότι θα έχει πολύ καλύτερα αποτελέσματα.

Έτσι η έρευνα εστιάστηκε στην ανάπτυξη αλγορίθμου δυναμικού υπολογισμού μεγέθους παραθύρου και στην χρήση ελλειπτικού σχήματος παραθύρου συνταύτισης, δυναμικά προσδιοριζόμενου μέσω ελαχίστων τετραγώνων. Για την δημιουργία ενός πλήρους αλγορίθμου συνταύτισης και δημιουργίας αυτόματου ΨΜΕ, χρησιμοποιήθηκε επιπλεόν και μια βελτιωμένη στρατηγική συνταύτισης βασισμένη στην αντίστοιχη των Otto and Chau, προκειμένου ο αλγόριθμος να μπορεί να λειτουργήσει πλήρως.

Για τους σκοπούς ελέγχου των αυτόματων ΨΜΕ, αναπτύχθηκε μια μεθοδολογία ελέγχου χωρίς δεδομένα αναφοράς. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί τις διαφορές ανάμεσα σε ορθοφωτογραφίες της ίδιας περιοχής, που δημιουργήθηκαν από ένα ΨΜΕ και δυο διαφορετικές εικόνες, για να ανιχνεύσει πιθανά σφάλματα στο ΨΜΕ. Βασίστηκε στην αντίστοιχη μέθοδο που παρουσιάστηκε από τον Norvelle (1992), αλλά τροποποιήθηκε ώστε να μην είναι επαναληπτική.

1.3. Η ειδικότερη εστίαση της παρούσας εργασίας

Θεωρήθηκε σκόπιμο η έρευνα να εστιαστεί στην δημιουργία ενός αλγορίθμου χωρίς χρήση επιπολικής γεωμετρίας, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για δημιουργία ΨΜΕ όσο και στην επίλυση του σχετικού προσανατολισμού δύο εικόνων. Χωρίς επιπολική γεωμετρία, δημιουργείται ένας αλγόριθμος γενικής χρήσης, που αποφεύγει

- την επαναδειγματοληψία που υποβιβάζει την ποιότητα της εικόνας (ή αυξάνει την συνθετότητα του αλγορίθμου εάν δεν γίνει επαναδειγματοληψία),
- την ανάγκη για γνώση του σχετικού προσανατολισμού.

Η χρήση του αλγορίθμου για συλλογή ΨΜΕ σημαίνει ότι θα πρέπει να συλλέγει πολλά και πυκνά σημεία στο κοινό επικαλυπτόμενο τμήμα δύο εικόνων, να είναι ευπροσάρμοστος, να αποφεύγει περιοχές με ομοιογενείς τόνους, περιοχές που εικονίζονται μόνο στην μια εκ των δύο φωτογραφιών, ενώ ταυτόχρονα να διατηρεί υψηλά επίπεδα αξιοπιστίας και ακρίβειας.

Οι απαιτήσεις πολλών σύγχρονων εφαρμογών συνταύτισης (από την πλευρά της μηχανικής όρασης) είναι η παραγωγή πυκνού ΨΜΕ ή υπολογισμός της παράλλαξης (x– disparity) σε ολόκληρο το μοντέλο, ακόμα και σε περιοχές με ομοιόμορφη ένταση ή "αόρατες" περιοχές (Scharstein and Szelinski, 2002). Κατά συνέπεια η απλή συνταύτιση χαρακτηριστικών που οδηγεί σε τυχαία και όχι ομοιόμορφη κατανομή σημείων τείνει και εκεί να εγκαταληφθεί.

1.4. Δομή κειμένου

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μία προσπάθεια κατηγοριοποίησης μεθόδων ψηφιακής συνταύτισης, αναφορά σε διαφορετικές προσεγγίσεις αλλά και σύγκρισή τους. Η ελαχιστοτετραγωνική συνταύτιση και ορισμένες παραλλαγές της αναλύονται σε βάθος γιατί αποτελούν το θεωρητικό υπόβαθρο της παρούσας εργασίας.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικά οι προτεινόμενες μεθοδολογίες και αφορούν την χρήση μεθοδολογίας δυναμικής επιλογής μεγέθους παραθύρου συνταύτισης ανάλογα με το περιεχόμενό του, την χρήση ελλειπτικών προτύπων αντί τετραγωνικών για συνταύτιση εικόνων, την χρήση στρατηγικής συνταύτισης που περιορίζει τα προβλήματα σε περιοχές με ομοιόμορφους γκρίζους τόνους ή "αόρατες" περιοχές και την χρήση μιας μεθοδολογίας για έλεγχο ΨΜΕ χωρίς την χρήση δεδομένων αναφοράς.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται εφαρμογή των προτεινόμενων μεθοδολογιών σε τεχνητές και πραγματικές εικόνες. Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται περιγραφή των μεθοδολογιών ελέγχου και σύγκρισης των προτεινόμενων μεθόδων σε σχέση με τις τρέχουσες. Τα αποτελέσματα παρατίθενται και σχολιάζονται.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται η συγκέντρωση των συμπερασμάτων και ανάλυση πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων των προτεινόμενων μεθοδολογιών. Αναφέρονται επίσης πιθανές εφαρμογές τους, ενώ προτείνονται πιθανά πεδία μελλοντικής έρευνας για περαιτέρω βελτίωση της ελαχιστοτετραγωνικής

συνταύτισης.

2. ΨΗΦΙΑΚΗ ΣΥΝΤΑΥΤΙΣΗ ΕΙΚΟΝΩΝ

2.1. Γενικά

Συνταύτιση (matching) είναι η διαδικασία εντοπισμού και μέτρησης ομόλογων οντοτήτων σε δύο ή περισσότερα σύνολα, και εν προκειμένο εικόνες. Ο ανθρώπινος εγκέφαλος χρησιμοποιεί διαρκώς αυτή την διαδικασία για να αντιληφθεί την απόσταση και να αναγνωρίσει αντικείμενα. Αποτελεί δε ένα χρήσιμο εργαλείο σε πολλές και διαφορετικές επιστημονικές ειδικότητες και αντιμετωπίζεται ιδιαίτερα από την κάθε μία για να καλύψει συγκεκριμένες ανάγκες.

Έτσι, η ψηφιακή συνταύτιση εικόνων ανήκει στο ευρύτερο γνωστικό αντικείμενο της ψηφιακής συνταύτισης ανάμεσα σε οντότητες που μπορεί να είναι:

- βάσεις δεδομένων (αναζήτηση σε βάσεις δεδομένων σύνθετων αντικειμένων που περιγράφονται από συγκεκριμένα χαρακτηριστικά τους),
- τρισδιάστατα αντικείμενα (Atkinson, 1996, Bosemann and Sinnreich, 1994, Bosemann, 1996),
- εικονιστικά πρότυπα (Tsai et al., 2002),
- γραφήματα σχέσεων (graph-schematic matching, Sonka et al., 1993),
- επιφάνειες (Malz et al., 1996),
- γραμμές, ακμές ή καμπύλες,
- εικόνες που στη γενική έκφραση σημαίνει συνταύτιση πληθώρας σημείων (ή άλλων χαρακτηριστικών) ανάμεσα σε δυο εικόνες και αποτελεί το αντικείμενο της παρούσας εργασίας.

Το γνωστικό αντικείμενο της συνταύτισης[1] εικόνων βρίσκεται στο ερευνητικό προσκήνιο πολλές δεκαετίες και ως εκ τούτου υπάρχει πληθώρα σχετικών δραστηριοτήτων. Η πληθώρα αυτή την καθιστά αντικείμενο ιδιαίτερα σύνθετο και πολύπλευρο με αποτέλεσμα η διάκριση μεθόδων και βημάτων να μην είναι πάντοτε αυτονόητη.

Η συνταύτιση εικόνων αποτελεί κοινό τόπο στην όραση μηχανής (machine vision), αφού δίνει την δυνατότητα στον υπολογιστή να αναζητεί και να ανακαλεί από βάση δεδομένων (το αντίστοιχο της ανθρώπινης εμπειρίας) αντικείμενα όμοια με αυτό που ελέγχει την εκάστοτε στιγμή με βάση κάποια κριτήρια που μπορεί να μην είναι καν σαφώς ποσοτικά προσδιορισμένα (ασαφής λογική - fuzzy logic).

Η συνταύτιση εικόνων απαντάται στην διεθνή βιβλιογραφία και με τους όρους stereo-matching, image correlation, depth estimation και correspondence problem. Τα τελευταία απαντώνται κυρίως στον χώρο της μηχανικής όρασης και της όρασης υπολογιστών (computer vision), υποκατηγορία και αυτή με την σειρά της, του ευρύτερου γνωστικού αντικειμένου της τεχνητής νοημοσύνης.

Ένα πρόβλημα είναι καλώς ορισμένο (well-posed) όταν
(α) έχει λύση,
(β) η λύση είναι μοναδική και
(γ) η λύση εξαρτάται κατά τρόπο συνεχή από τα δεδομένα.
Η συνταύτιση εικόνων δεν είναι ένα τέτοιο πρόβλημα, επειδή καταστρατηγεί τουλάχιστον ένα (αν όχι όλα) τα παραπάνω. Το μαθηματικό της μοντέλο είναι ασθενές, ο χώρος εφαρμογής κρίσιμος (επηρεάζει πολύ την λύση), δεν είναι εξασφαλισμένη η μοναδικότητα λύσης (1 προς 1) ενώ ταυτόχρονα υπάρχουν γεωμετρικές παραμορφώσεις. Λύση μπορεί να μην υπάρχει καν, πχ. στην περίπτωση της που το ομόλογο σημείο βρίσκεται σε περιοχή έλλειψης πληροφορίας[2]. Επίσης μπορεί η λύση να μην είναι μοναδική ή να μην είναι ισχυρή (Terzopoulos, 1986, 1988, Lang et al., 1995, Winter, 2000). Ειδικά στην περίπτωση της επιφανειακής συνταύτισης εικόνας (Area Based Matching – συνταύτιση έντασης) υπάρχει περίπτωση η λύση να συγκλίνει σε τοπικό ελάχιστο και όχι σε γενικό. Κατά συνέπεια η συνταύτιση πρέπει να ξεκινάει κοντά στην πραγματική λύση για να υπάρχει σύγκλιση στο αναζητούμενο σημείο. Η μέγιστη αρχική απόσταση από την οποία η λύση συγκλίνει στο σωστό ομόλογο σημείο ονομάζεται ακτίνα σύγκλισης (pull-in-range) και διαφέρει από σημείο σε σημείο καθώς εξαρτάται από την γειτονιά του και το είδος του. Εύκολα καταλαβαίνει κανείς ότι πρόκειται για ένα ιδιαίτερα σύνθετο θέμα, γεγονός που επιβεβαιώνεται

1 Επειδή η συνταύτιση οντοτήτων είναι ως επί το πλείστον ψηφιακή, είτε επειδή τα δεδομένα είναι ψηφιακά είτε επειδή πραγματοποιείται αποκλειστικά και μόνο μέσω υπολογιστών και όχι με κάποιο αναλογικό τρόπο, ο όρος ψηφιακή θα παραλείπεται στο εξής.

2 Πρόκειται για περιοχές που βρίσκονται πίσω από έντονες εξάρσεις του αναγλύφου (π.χ κτίρια) και δεν είναι ορατές από το σημείο λήψης. Οι περιοχές αυτές θα ονομάζονται από δω και πέρα 'αόρατες' περιοχές.

από την διάρκεια, ένταση και ευρύτητα της διεθνούς έρευνας στο συγκεκριμένο αντικείμενο.

Το δεδομένο ότι το πρόβλημα δεν είναι καλώς ορισμένο μπορεί να αντιμετωπισθεί μόνο με περιορισμούς και εμπειρικούς κανόνες. Τα μέτρα ομοιότητας που χρησιμοποιούνται είναι κατά συνέπεια κανόνες εν πολλοίς εμπειρικοί (Winter, 2000), οπότε δεν υπάρχει μια γενική προσέγγιση που να μπορεί να αποδώσει σε οιεσδήποτε εικόνες.

Η προσθήκη δεσμεύσεων έχει θεαματικά αποτελέσματα. Η πιο γνωστή δέσμευση είναι η επιπολική γεωμετρία, που ορίζει ότι τα ομόλογα σημεία και τα προβολικά κέντρα των δύο εικόνων πρέπει να ανήκουν στο ίδιο επίπεδο. Όπως και σε κάθε είδους δέσμευση, έτσι και εδώ παρουσιάζεται το δίλημμα της ισορροπίας ανάμεσα στη γενική ή στην ειδική λύση. Η ελαχιστοτετραγωνική συνταύτιση αποτελεί ένα πολύ καλό εργαλείο για την χρήση πολλών διαφορετικών δεσμεύσεων με βάρη. Έχουν παρουσιαστεί πολλές λύσεις μερικές εκ των οποίων είναι λύσεις προσαρμοσμένες σε συγκεκριμένες εφαρμογές, με δεσμεύσεις που όμως δεν εφαρμόζονται σε γενικές περιπτώσεις.

Κάθε είδους "πληροφορία" σχετικά με την συνταύτιση μπορεί να χρησιμοποιηθεί εκ των προτέρων ως δέσμευση, ή εκ των υστέρων ως έλεγχος. Η επιπολική γεωμετρία χρησιμοποιείται εκ των προτέρων ως δέσμευση ή εκ των υστέρων ως έλεγχος απόρριψης (πχ. απόσταση ±2 εικονοστοιχεία από την επιπολική γραμμή). Με παρόμοιο τρόπο μπορούν να χρησιμοποιηθούν όλες οι δεσμεύσεις.

Είναι προφανές ότι λύση στο πρόβλημα της αυτόματης συνταύτισης θα είχε πολλές εφαρμογές στην φωτογραμμετρία, όπως τον αυτοματισμό του εσωτερικού, σχετικού και απόλυτου προσανατολισμού, και στην αυτόματη δημιουργία ψηφιακών μοντέλων επιφανειών (ΨΜΕ). Αποτελεί όμως χρήσιμο εργαλείο και για άλλες επιστημονικές ειδικότητες, όπως εκείνη της μηχανικής όρασης, και αντιμετωπίζεται ιδιαίτερα από την κάθε μία για να καλύψει συγκεκριμένες ανάγκες.

Οι δύο κοινότητες που ασχολούνται με το πρόβλημα έχουν διαφορετική προσέγγιση στο ίδιο πρόβλημα εύρεσης ομόλογων σημείων. Επιχειρώντας ένα διαχωρισμό θα μπορούσε κανείς να πει ότι η μία ασχολείται κυρίως με αεροφωτογραφίες, δηλαδή την συνταύτιση σε μεγάλες εικόνες, μικρής κλίμακας, με παράλληλους άξονες και σταθερή βάση, με κύριο ζητούμενο την ακρίβεια υπολογισμού ύψους σε ένα αντικειμένου με μικρό σχετικά ανάγλυφο, με μικρές σε έκταση και βάθος ασυνέχειες. Η άλλη κοινότητα ασχολείται κυρίως με μικρές εικόνες από μικρή απόσταση λήψης και τυχαίο προσανατολισμό, γεγονός που οδηγεί σε μεγάλες ασυνέχειες και έντονες διαφορές αναγλύφου, με ζητούμενο την πολύ πυκνή περιγραφή της τρίτης διάστασης. Κάθε ομάδα κάνει χρήση των κατάλληλων δεσμεύσεων και χρησιμοποιεί κατάλληλες πληροφορίες για κάθε σκηνή. Επιπλέον η πρώτη ομάδα χρησιμοποιεί κυρίως τοπικές μεθόδους ενισχυμένες από συνταύτιση χαρακτηριστικών στην προσπάθεια να μοντελοποιήσει το πρόβλημα, ενώ η δεύτερη συχνά αντιμετωπίζει το πρόβλημα ως συνδυαστικό πρόβλημα βελτιστοποίησης μίας συνάρτησης. Βασικό χαρακτηριστικό για την πρώτη ομάδα είναι η ακρίβεια, ενώ για την δεύτερη η ταχύτητα. Εάν όμως αναφερθεί κανείς στην επίγεια φωτογραμμετρία (ή φωτογραμμετρία μικρών αποστάσεων), αντιλαμβάνεται ότι τα πεδία εφαρμογής, τείνουν να συμπέσουν, και επομένως οι σχετικοί αλγόριθμοι από την περιοχή της όρασης υπολογιστών προφανώς παρουσιάζουν άμεσο ενδιαφέρον και χρησιμότητα για την φωτογραμμετρία.

2.2. Ιστορική διαδρομή

Η συνταύτιση εικόνων έχει μακρά ιστορία. Οι πρώτες προσπάθειες έγιναν στην δεκαετία του '50 με πιο χαρακτηριστική εκείνη του Hobrough (1959). Ο επόμενος βασικός σταθμός ήταν η παρουσίαση από την Wild Heerbrugg ενός αυτόματου συσχετιστή (correlator) στο συνέδριο της Διεθνούς Ένωσης Φωτογραμμετρίας (International Society of Photogrammetry) το 1968. Το όργανο αυτό δεν έτυχε ευρείας αποδοχής, αφού αντιμετώπισε τον σκεπτικισμό της διεθνούς κοινότητας. Κύριοι λόγοι ήταν ότι δεν ήταν αρκετά ευέλικτο ούτε αρκετά αξιόπιστο. Από τις αρχές του '70 και μέχρι το μέσον της δεκαετίας του '80, η έρευνα εστιάστηκε στην ψηφιακή συνταύτιση εικόνων. Ο Kreiling (1976) ήταν από τους πρωτοπόρους για την δημιουργία ΨΜΕ και ορθοφωτογραφιών. Οι πρώτες προσπάθειες για την υιοθέτηση των μεθόδων σε όργανα έγινε από τους Helava (1978) και Hobrough (1978). Πληθώρα παραλλαγών είχε παρουσιαστεί μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του '80, σχετικά με την συνταύτιση πρώτης και δεύτερης παραγώγου, συνταύτιση διαγραμμάτων δομής (graph structure matching), συνταύτιση με χρήση μετασχηματισμού Hough, και συνταύτιση ακμών. Αυτές οι εφαρμογές δεν κατάφεραν να επιλύσουν με επάρκεια τα προβλήματα για τα οποία δημιουργήθηκαν (Rosenfeld 1984b).

Σταθμός στην εξέλιξη ήταν η δημοσίευση της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων του Förstner (1982)

και του Grüen (1985), στην οποία γινόταν για πρώτη φορά εφαρμογή της μεθόδου των ελάχιστων τετράγωνων στην ψηφιακή συνταύτιση εικόνων. Με την νέα αυτή μεθοδολογία έγινε δυνατός ο στατιστικός έλεγχος του αποτελέσματος, καθώς και η ταυτόχρονη χρήση πρόσθετων πληροφοριών για την ενίσχυση της ακρίβειας αλλά και της αξιοπιστίας.

Η δεκαετία του '80 ήταν ιδιαίτερα δημιουργική για την συνταύτιση εικόνων με πληθώρα ανακοινώσεων. Μερικά παραδείγματα είναι οι ανακοινώσεις των Förstner (1982), Ackermann (1984), Gruen (1984, 1985), Gruen and Baltsavias (1987, 1988), σχετικά με την ελαχιστοτετραγωνική συνταύτιση και παραλλαγές της, των Förstner (1982, 1986) και Hannah (1989) για την επιλογή σημείων κατάλληλων για συνταύτιση γκρίζων τόνων, Helava (1988) και Rosenholm (1987a, 1987b) σχετικά με σύγκριση αλγορίθμων και βελτίωση της μεθόδου, των Thurgood and Mikhail (1982) και Baltsavias (1991) με επιπολική γεωμετρία και χρήση πολλαπλών εικόνων, του Li (1991) για ταυτόχρονη συνταύτιση πολλαπλών σημείων. Η βιβλιογραφία εκείνης της περιόδου ήταν ιδιαίτερα διευρυμένη και ουσιαστικά εκείνη που έβαλε τα θεμέλια για την περαιτέρω εξέλιξη, με αποτέλεσμα να είναι υποχρεωτικές πολλές αναφορές σε εκείνη τη δεκαετία όπου μπήκαν τα θεμέλια για την έρευνα επί του αντικειμένου.

Η πιο γενική προσέγγιση για την συνταύτιση εικόνων λειτουργούσε άμεσα στο χώρο του αντικειμένου χρησιμοποιώντας πεπερασμένα στοιχεία (Wrobel, 1987, Ebner & Heipke, 1988, Helava, 1988b). Αν και αντιμετώπιζε το πρόβλημα της συνταύτισης με γενικότητα και ρεαλισμό, δεν χρησιμοποιήθηκε ευρύτερα επειδή το μοντέλο ως πολυπαραμετρικό ήταν δύσκολο στην εφαρμογή και απαιτούσε προσδιορισμό πολλών κατωφλιών. Έκτοτε χρησιμοποιήθηκε περιστασιακά και μόνο για ερευνητικούς σκοπούς (Kempa & Schlueter, 1993).

Την δεκαετία του '90 και μετά, η συνταύτιση εικόνων πέρασε στη φάση της ωριμότητας. Η φάση αυτή αναγνωρίζεται από τρία χαρακτηριστικά:

- την παρουσίαση πληθώρας ψηφιακών οργάνων φωτογραμμετρίας, που όλα ενσωμάτωναν λογισμικό αυτόματης συλλογής ψηφιακών μοντέλων, ενώ πολλά από αυτά χρησιμοποιούσαν την συνταύτιση εικόνων και για άλλες εφαρμογές, όπως εσωτερικό και σχετικό προσανατολισμό (π.χ. Z/I ImageStation, Helava Socet-Set, Zeiss Phodis, Erdas OrthoBase, InphoVirtuozo, ISM, ATLAS Photopol, Racurs Photomod).
- το γεγονός ότι οι δημοσιεύσεις που αφορούσαν την παρουσίαση νέων βασικών αλγορίθμων συνταύτισης άρχισαν να μειώνονται, ενώ οι παραλλαγές πολλαπλασιάστηκαν. Οι δημοσιεύσεις περιορίστηκαν, σε μεγάλο βαθμό, και αφορούσαν κυρίως ειδικές εφαρμογές επίγειων λήψεων, εφαρμογές με δορυφορικά δεδομένα (Toth et al., 1998, Baltsavias et al., 1993) και συγκρίσεις με LIDAR (Baltsavias, 1999, Favey et al., 2000).
- την χρήση της ως εργαλείου σε πιο πολύπλοκες εφαρμογές, όπως παρακολούθηση γραμμών (Gruen & Stallmann, 1992, Tseng & Schenk, 1992, Gruen, Agouris, 1994), ανίχνευση ανωμαλιών σε ορθοφωτογραφίες (Schenk et al. 1990, Norvelle, 1992, 1994, 1996), παρακολούθηση διαχρονικών αλλαγών (Agouris, et al., 2001, Mountrakis et al. 2002), αυτόματη εύρεση σημείων σύνδεσης για αεροτριγωνισμό (Krupnik & Schenk, 1997).

Σύμφωνα με τον Krzystek (1995), η αυτόματη διαδικασία δημιουργίας Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους (ΨΜΕ) αποτελείται από ελαχιστοτετραγωνική συνταύτιση, συνταύτιση χαρακτηριστικών, ιεραρχικές πυραμίδες, αξιόπιστα στατιστικά μέτρα και ανάπλαση της ψηφιακής επιφάνειας. Υποστηρίζει επίσης ότι η αυτόματη συλλογή μοντέλου αποτελεί λυμένο πρόβλημα, που έχει ενσωματωθεί με επιτυχία σε αρκετά εμπορικά πακέτα και λειτουργεί πολύ καλά. Οι μοναδικές περιπτώσεις όπου χρήζει βελτίωσης είναι σε αστικές περιοχές και περιοχές με χαμηλή υφή.

Οι Ackermann (et al., 1992), υποστηρίζουν ότι:

- σε ομαλά εδάφη η ακρίβεια αυτόματου ΨΜΕ είναι πολύ καλύτερη από 0.1‰ του ύψους πτήσης, ενώ σε πιο απότομα εδάφη βελτιώνεται περισσότερο
- σε ομαλά εδάφη το μέγεθος του εικονοστοιχείου (15μm-30μm) δεν παίζει σημαντικό ρόλο
- τα μέτρα εσωτερικής ακρίβειας αποτελούν ένα καλό δείκτη ακρίβειας του ΨΜΕ
- το αυτόματο ΨΜΕ καταφέρνει να περιγράψει καλά την φυσική επιφάνεια παρακάμπτοντας τα δέντρα και τα σπίτια, ενώ έχει αποδεκτά αποτελέσματα σε κατοικημένες περιοχές

Οι πρώτοι αυτοί ερευνητές, ως πρόδρομοι των ψηφιακών σταθμών, ήταν ένθερμοι υποστηρικτές τους. Κατά συνέπεια οι αισιόδοξες δημοσιεύσεις τους έγιναν στις αρχές της δεκαετίας του '90, εποχή που οι ψηφιακοί σταθμοί και οι διαδικασίες τους επιζητούσαν να πείσουν την διεθνή κοινότητα για την

αποτελεσματικότητά τους καθώς είχαν να ανταγωνιστούν τα καθιερωμένα αναλυτικά όργανα που υποστηρίζονταν από εξαιρετικές οπτικές διατάξεις και καλύτερη ακρίβεια.

Από τα μέσα της δεκαετίας όταν οι ψηφιακοί σταθμοί είχαν καθιερωθεί και η τεχνολογία τους εξαπλώνονταν όλο και περισσότερο, οι ερευνητές άρχισαν να υποστηρίζουν ότι η συνταύτιση εικόνων χρήζει βελτίωσης. Η αρχή έγινε από τον Heipke (1996) που υποστήριξε ότι η συνταύτιση εικόνων εξακολουθεί να αποτελεί ένα από τα πιο προκλητικά ερευνητικά αντικείμενα στη φωτογραμμετρία και από τον Baltsavias et al. (1996), που επισήμανε ότι οι αλγόριθμοι ψηφιακής συνταύτισης και οι παραλλαγές τους δεν έχουν επιτύχει απόλυτη αξιοπιστία στην πραγματικότητα. Τα περιθώρια βελτίωσης της μεθόδου, παρόλο που αυτή βρίσκεται αρκετά χρόνια σε εξελικτική διαδικασία, είναι ακόμα πολλά (Harvey and Mustaffar, 2000, Koch, 2003), ενώ τα εσφαλμένα σημεία κυμαίνονται ανάλογα με το αντικείμενο έως και στο 25% των ομόλογων σημείων (Guelch, 1988, Karras et al., 1998). Η συνταύτιση θεωρείται ότι εξακολουθεί να αποτελεί το πιο δύσκολο πρόβλημα της μηχανικής όρασης (Huang et al. 1997).

Κάθε αλγόριθμος εμπλέκει τα εξής στοιχεία (Brown, 1992):

- Χαρακτηριστικό (οντότητα) συνταύτισης
- Χώρος αναζήτησης
- Στρατηγική αναζήτησης
- Μέτρο ομοιότητας

Τα χαρακτηριστικά αυτά μπορούν να αποτελέσουν, από μόνα τους το καθένα, αντικείμενο μελέτης.

Το αντικείμενο της ψηφιακής συνταύτισης διευρύνθηκε πολύ από την πλευρά της μηχανική όρασης με νέες τεχνικές κατά την δεκαετία του '90. Τότε άρχισαν να εμφανίζονται εργασίες στην ψηφιακή συνταύτιση χρησιμοποιώντας συναρτήσεις ενέργειας και τρόπους ελαχιστοποίησής τους. Ειδικά μετά το μέσο της δεκαετίας αυτές κυριολεκτικά πολλαπλασιάστηκαν. Πολλοί ερευνητές, κάνοντας χρήση της υπερπροσφοράς υπολογιστικής δύναμης συνέθεταν συναρτήσεις ενέργειας (Calitz και Ruther 1996, Sakamoto et al. 2002, Muhlmann, et al. 2002) ή κόστους (Bernard, 1984, Cox, 1994, Sun, 1997) και πρότειναν τρόπους ελαχιστοποίησής τους, σε πληθώρα ειδικών εφαρμογών. Ουσιαστικά πρόκειται για λύσεις προσαρμοσμένες στις ειδικές συνθήκες της κάθε περίπτωσης ή εφαρμογές διαφορετικών στατιστικών θεωριών και μεθόδων βελτιστοποίησης στο πρόβλημα ελαχιστοποίησης της ενέργειας της παράλλαξης x στο σύνολο της εικόνας (Cox, et al. 1992, Agrawal et al., 2003, Kolmogorov et al., 2001,). Οι περισσότερες παρουσίασαν καλά αποτελέσματα, ανάλογα και με την εφαρμογή τους, αλλά λίγες έτυχαν ευρείας αποδοχής και εφαρμογής. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η αντίστοιχη εκδοχή της φωτογραμμετρίας, που από τις αρχές της δεκαετίας του '80 χρησιμοποιούσε την δική της συνάρτηση "ενέργειας" και ελαχιστοποίησης, την ελαχιστοτετραγωνική συνταύτιση, ήταν μέθοδος με ευρύτατη αποδοχή και ισχυρό μαθηματικό υπόβαθρο. Σε κάθε περίπτωση η χρήση κάποιας μεθόδου εξαρτάται κυρίως από το μέγεθος των εικόνων και το ανάγλυφο.

Την καλύτερη σύγκριση αλγορίθμων από πλευράς φωτογραμμετρίας την παρουσιάζει ο Hannah (1988, 1989) και ο Guelch (1988). Μια πολύ καλή γενική σύγκριση σχεδόν όλων των μεθόδων φωτογραμμετρίας και μηχανικής όρασης έχει παρουσιάσει η Brown (1992). Υπάρχουν πολλά κριτήρια κατάταξης των μεθόδων, μερικά εκ των οποίων είναι η ταχύτητα, αξιοπιστία, προσαρμοστικότητα σε διαφορετικές εικόνες, ακρίβεια, πυκνότητα, πολυπλοκότητα εφαρμογής, αρχικών δεδομένων κλπ.

2.3. Βασικά προβλήματα.

Τα βασικά προβλήματα στη συνταύτιση είναι (Sun et al. 2002):

- Ο θόρυβος, ψηφιακός ή φωτογραφικός
- Οι ομοιογενείς περιοχές
- Οι ασυνέχειες στη μεταβολή του βάθους
- Οι αόρατες περιοχές, δηλαδή περιοχές που είναι ορατές μόνο στην μία εικόνα. Συνήθως αποτελούν απόρροια του προηγούμενου.

Όλα αυτά αφορούν το πρόβλημα της εύρεσης ομολόγων σημείων και όχι την δημιουργία ενός ΨΜΕ χωρίς δέντρα και κτίρια, που δεν αφορά την παρούσα εργασία. Εργασίες που ξεκινούν με την ύπαρξη ενός καλού ΨΜΕ και συνεχίζουν με διάφορες τακτικές να αφαιρέσουν ανθρωπογενείς παρεμβάσεις και δέντρα (Baillard et al., 1999) μπορούν ίσως να θεωρηθούν εφαρμογές της παρούσας.

2.4. Δεσμεύσεις στην συνταύτιση

Όπως έχει αναφερθεί παραπάνω η ψηφιακή συνταύτιση δεν αποτελεί καλά ορισμένο πρόβλημα και ως εκ τούτου χρειάζεται δεσμεύσεις για να περιοριστούν πιθανά σφάλματα. Οι κυριότερες παραδοχές που χρησιμοποιούνται ως δεσμεύσεις είναι οι εξής:

2.4.1. Ομοιότητα

Οι προς συνταύτιση οντότητες (ένταση ή χαρακτηριστικά) θα πρέπει να είναι κατά το δυνατόν όμοιες στις δύο εικόνες, που σημαίνει ότι πρέπει να χρησιμοποιείται ένα μέτρο ομοιότητας. Σε πολλές περιπτώσεις ορίζονται συναρτήσεις ενέργειας ή κόστους και η μεγιστοποίηση ή ελαχιστοποίηση, αντίστοιχα, παίζει το ρόλο αυτό. Ευρύτατα διαδεδομένες περιπτώσεις των προηγουμένων είναι ο συντελεστής συσχέτισης και το άθροισμα των τετραγώνων των διαφορών, αντίστοιχα. Την τελευταία δεκαετία έχουν εμφανιστεί πλήθος πολύπλοκων συναρτήσεων, κυρίως από τον χώρο της μηχανικής όρασης (Wang και Hsiao, 1999, Agrawal, et al., 2003).

Στην περίπτωση της συνταύτισης χαρακτηριστικών, οι ιδιότητες που συνοδεύουν τα χαρακτηριστικά θα πρέπει να έχουν παρόμοιες τιμές. Η ομοιότητα των τιμών καθώς το εάν θεωρούνται όλες εξίσου σημαντικές καθορίζεται πλήρως από τη μεθοδολογία της κάθε εφαρμογής.

2.4.2. Μοναδικότητα

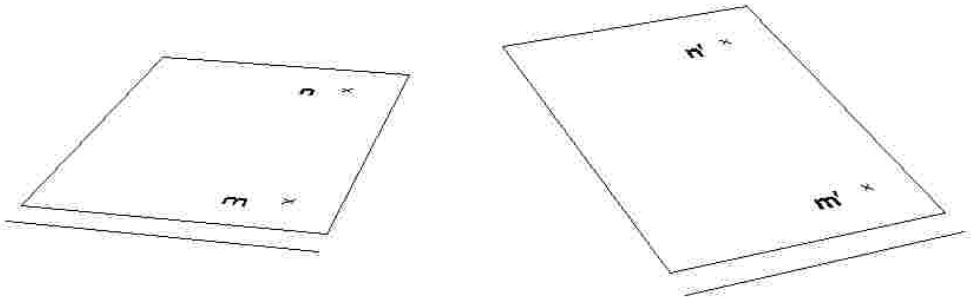
Κάθε στοιχείο έχει το πολύ ένα ομόλογο. Η δέσμευση αυτή ισχύει σε κάθε περίπτωση. Αν και η λογική επιβάλλει την "ένα προς ένα" σχέση, υπάρχει περίπτωση κάποια στοιχεία να μην φαίνονται και στις δύο (ή περισσότερες) εικόνες λόγω σχηματισμών και έντονου ανάγλυφου που μπορεί να κρύβει την περιοχή πίσω από αυτό. Επίσης υπάρχει περίπτωση. σε επαναλαμβανόμενους σχηματισμούς ο αλγόριθμος να μην μπορεί να διακρίνει το σωστό ομόλογο ανάμεσα σε πολλά ίδια και κατά συνέπεια επιστρέφει το πλησιέστερο στην αρχική τιμή, το οποίο όμως δεν είναι απαραιτήτως το σωστό.

2.4.3. Συνέχεια επιφάνειας

Η κατά x παράλλαξη των δύο εικόνων είναι συνεχής συνάρτηση που μεταβάλλεται ομαλά. Η παραδοχή αυτή ισχύει σε δορυφορικές εικόνες, γενικά σε αεροφωτογραφίες (ανάλογα με την κλίμακα), αλλά συνήθως δεν ισχύει σε επίγειες και κοντινές λήψεις όπου το αντικείμενο παρουσιάζει έντονο ανάγλυφο σε σχέση με την απόσταση λήψης δημιουργώντας απότομες μεταβολές βάθους ή ακόμα και εσοχές σε σχέση με το επιλεγμένο σύστημα αναφοράς. Χαρακτηριστικές είναι οι περιπτώσεις αντικειμένων που βρίσκονται μπροστά από άλλα αντικείμενα στην εικόνα, δημιουργώντας σημαντικές και απότομες κατά μήκος των ακμών τους διαφορές παράλλαξης. Παρόμοιες περιπτώσεις, αλλά λιγότερο έντονες είναι τα κτίρια και τα αθρωπογενή χαρακτηριστικά επί του εδάφους, σε αεροφωτογραφίες.

2.4.4. Διάταξη

Η παραδοχή αυτή εκφράζεται ως εξής: εάν τα m-m′ και n-n′ είναι ομόλογα σημεία στις δύο εικόνες, και το m είναι αριστερά από το n, τότε το m′ πρέπει να είναι αριστερά από το n′. Η παραδοχή αυτή ισχύει για γειτονικά σημεία και για την "κανονική περίπτωση" με παράλληλους άξονες λήψης, κάθετους στην βάση και κοινή στροφή γύρω από τον άξονα λήψης. Στη γενική περίπτωση κάτι τέτοιο δεν ισχύει όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1. Το ίδιο επίπεδο αντικείμενο σε δύο διαφορετικούς προβολικούς μετασχηματισμούς, που προσομοιάζουν δύο λήψεις από διαφορετικές γωνίες, όπου τα δύο ζεύγη ομόλογων σημείων δεν τηρούν την παραδοχή της διάταξης.

Άλλες υποθέσεις και παραδοχές που συνήθως γίνονται για να δεσμεύσουν την λύση, αλλά θεωρούνται προφανείς και σπάνια αναφέρονται είναι οι εξής:

- Η συλλογή των τόνων της έντασης γίνεται στο ίδιο ή παρόμοιο μήκος κύματος – δεν ισχύει πάντα στην περίπτωση δορυφορικών λήψεων
- Ο φωτισμός και οι ατμοσφαιρικές συνθήκες παραμένουν αναλλοίωτες μεταξύ των λήψεων – δεν ισχύει πάντα σε δορυφορικές λήψεις ή λήψεις εσωτερικού χώρου με φλας
- Το αντικείμενο είναι άκαμπτο και δεν κινείται
- Η επιφάνεια του αντικειμένου είναι αδιαφανής και διαχέει το φως

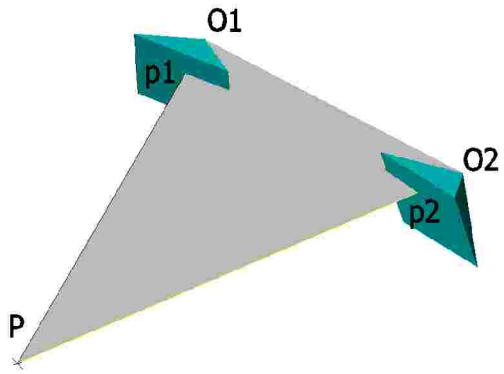
Ανάλογα με την περίπτωση μπορούν να προστεθούν κάποιες επιπλέον παραδοχές ή να μην ισχύουν κάποιες από τις παραπάνω. Η σωστή χρήση των παραπάνω δεσμεύσεων είναι εκείνη που κάνει μία μέθοδο συνταύτισης επιτυχημένη ή όχι για συγκεκριμένη εφαρμογή.

2.4.5. Επιπολική γεωμετρία

Αποτελεί, όχι άδικα, την πιο διαδεδομένη δέσμευση, που ισχύει κάτω από οποιεσδήποτε συνθήκες. Βασίζεται στο γεγονός ότι τα προβολικά κέντρα των δύο εικόνων και ένα φυσικό σημείο του χώρου που εικονίζεται επ' αυτών ορίζουν ένα επίπεδο. Οι απεικονίσεις του φυσικού σημείου επί των εικόνων οφείλουν να ανήκουν σε αυτό το επίπεδο.

Έτσι, για την απεικόνιση ενός σημείου σε μία εικόνα, τα πιθανά ομόλογα στην άλλη εικόνα βρίσκονται πάνω σε μία ευθεία, που είναι η τομή του επιπολικού επιπέδου με το επίπεδο του δέκτη της εικόνας αναζήτησης (σχήμα 2.2). Αυτή ακριβώς την ιδιότητα του ομόλογου σημείου εκμεταλεύεται η επιπολική γεωμετρία, δεσμεύοντας τον χώρο αναζήτησης πάνω σε μία ευθεία, ή πρακτικά σε μία πολύ στενή λωρίδα. Εφαρμόζεται είτε με την εκ των προτέρων μετατροπή των εικόνων σε επιπολικές είτε με την προσθήκη δεσμεύσεων κατά την διαδικασία της συνταύτισης είτε με την απόρριψη του συσχετισθέντος σημείου εφόσον αυτό αποκλίνει πέραν ενός κατωφλιού από την επιπολική γραμμή.

Βασικό πλεονέκτημα είναι ότι περιορίζει την περιοχή ελέγχου από το σύνολο της εικόνας σε μία μόνο γραμμή. Προϋποθέτει όμως την γνώση του σχετικού προσανατολισμού, οπότε οι δύο εικόνες πρέπει να είναι προσανατολισμένες.



Σχήμα 2.2. Επιπολικό επίπεδο.

2.5. Βασικά είδη συνταύτισης

Η πληθώρα και ευρύτητα των εργασιών και αλγορίθμων στο γνωστικό αντικείμενο της συνταύτισης χρήζει ταξινόμησης. Η διάκριση μπορεί να γίνει με κριτήριο την οντότητα της συνταύτισης, το σκοπό της συνταύτισης, την έκταση του χώρου έρευνας, την πληθώρα και το είδος πληροφοριών που λαμβάνονται υπόψη, την στρατηγική συνταύτισης κλπ. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι υπάρχουν πολλές παραλλαγές ανάλογα με την εφαρμογή για την οποία έχει σχεδιαστεί ο κάθε αλγόριθμος αλλά και το τελικό εξαγόμενο, με αποτέλεσμα να μην μπορεί να γίνει απευθείας αντιπαράθεσή τους.

Η επικρατέστερη διάκριση που προτείνεται από την βιβλιογραφία είναι σε επιφανειακή συνταύτιση (area based matching) συνταύτιση χαρακτηριστικών (feature based matching) και σχεσιακή συνταύτιση (relational matching) (Schenk, 1999).

Η συνταύτιση γκρίζων τόνων υιοθετεί ένα μέτρο ομοιότητας ανάμεσα σε παράθυρα των δύο εικόνων. Η συνταύτιση χαρακτηριστικών εξάγει χαρακτηριστικά και στις δύο εικόνες και χρησιμοποιεί τις ιδιότητές τους και άλλες πληροφορίες για να τα συσχετίσει. Η συνταύτιση σχέσεων είναι πολυπλοκότερη και συσχετίζει κατά βάση περιγραφικά δεδομένα δομών, ενώ είναι αργή και έχει χαμηλή ακρίβεια εντοπισμού.

Ενιαία ταξινόμηση με χρήση όλων των κριτηρίων, ακόμα και με χρήση υποκατηγοριών, δεν μπορεί να επιτευχθεί, γιατί οι παράμετροι με τις οποίες μπορεί να γίνει κατηγοριοποίηση είναι πάρα πολλές, ενώ πολλές μέθοδοι είναι συνδυαστικές, δυσχεραίνοντας περαιτέρω την διάκριση. Έτσι, στη συνέχεια επιχειρείται μία κατηγοριοποίηση με βάση βασικές παραμέτρους, ενώ ακολουθεί παράθεση κάποιων προσπαθειών που έχουν γίνει στα πλαίσια ανακοινώσεων άλλων μελετητών.

2.5.1. Επιφανειακή συνταύτιση

Η επιφανειακή συνταύτιση περιέχει περιορισμένη πληροφορία στη γειτονιά του σημείου και κατά συνέπεια έχει μειωμένη αξιοπιστία σε σχέση με την συνταύτιση χαρακτηριστικών, που στηρίζεται στον τρόπο λειτουργίας της ανθρώπινης αντίληψης και κατά συνέπεια είναι πιο αξιόπιστη. Αυτές οι δύο είναι τα βασικότερα είδη συνταύτισης και πολλές φορές αλληλοσυμπληρώνονται.

Οι περιπτώσεις όπου χρησιμοποιείται κάποιος τελεστής σημείων για επιλογή κατάλληλων προς συνταύτιση σημείων και εν συνεχεία συνταύτιση γκρίζων τόνων για ακρίβεια ταξινομούνται στην συνταύτιση γκρίζων τόνων γιατί ο τελεστής εφαρμόζεται μόνο στην μία εικόνα. Υπάρχουν όμως και περιπτώσεις πιο πολύπλοκες, όπως του Krzystek (1998), στην οποία χρησιμοποιείται ευρύτατα τελεστής σημείων και στις δύο εικόνες, σε όλα τα επίπεδα των πυραμίδων, ενώ η συνταύτιση γκρίζων τόνων γίνεται μόνο στο τελευταίο επίπεδο. Η συνταύτιση αυτή είναι δύο με τρεις φορές πιο ακριβής από τη συνταύτιση χαρακτηριστικών, αλλά ταυτόχρονα και πιο επιρρεπής σε μεγάλα σφάλματα λόγω ευαισθησίας στις αρχικές τιμές.

2.5.1.1. Ελαχιστοτετραγωνική ή με συντελεστή συσχέτισης

Αφορά αποκλειστικά και μόνο μεθόδους συνταύτισης γκρίζων τόνων. Βασική διαφορά αποτελεί η γεωμετρική διόρθωση που επιβάλλει η ελαχιστοτετραγωνική μέθοδος. Εξ ορισμού η ελαχιστοτετραγωνική μέθοδος είναι επαναληπτική μέθοδος, ενώ ο συντελεστής συσχέτισης εφαρμόζεται σε ένα βήμα.

Τελευταία διαφορά αποτελεί το μέτρο ομοιότητας που υιοθετείται από την κάθε μία. Στην μία περίπτωση χρησιμοποιειται το άθροισμα των τετραγώνων των διαφορών, που πρέπει να ελαχιστοποιηθεί, ενώ στην άλλη περίπτωση χρησιμοποιείται ο συντελεστής συσχέτισης, που πρέπει να μεγιστοποιηθεί. Σε πολλές περιπτώσεις χρησιμοποιούνται συνδυαστικά, με την ελαχιστοτετραγωνική να ακολουθεί την συνταύτιση με συντελεστή συσχέτισης, ώστε να επιτευχθεί καλύτερη ακρίβεια.

Επειδή η ελαχιστοτετραγωνική συνταύτιση είναι το αντικείμενο της παρούσας εργασίας γίνεται εκτενής αναφορά και πλήρης περιγραφή αμφότερων των μεθόδων στις παρ. 1.7.3 και 1.7.4, ενώ ακολουθεί και αναλυτική σύγκριση.

2.5.2. Συνταύτιση χαρακτηριστικών

Στην ενότητα αυτή αναλύονται τα είδη της συνταύτισης χαρακτηριστικών. Σε γενικές γραμμές η συνταύτιση χαρακτηριστικών χρησιμοποιεί διαφορετικά μέτρα ομοιότητος ανάλογα με την υλοποίηση, τα οποία εξαρτώνται από την οντότητα συνταύτισης. Επίσης έχει μεγαλύτερη ακτίνα σύγκλισης οπότε εξαρτάται λιγότερο από αρχικές τιμές, είναι πιο σταθερή και λιγότερο ευαίσθητη σε γεωμετρία, φωτισμό και αντανακλάσεις (Lang et al. 1995). Τα κυριότερα χαρακτηριστικά που συσχετίζονται είναι σημεία, ακμές, γραμμές ή επιφάνειες. Τα χαρακτηριστικά αυτά θα πρέπει να είναι διακριτά σε σχέση με το περιβάλλον τους, να μην επηρεάζονται από γεωμετρικές και ραδιομετρικές διαφορές, σταθερά σε σχέση με θόρυβο και σπάνια σε σχέση με άλλα χαρακτηριστικά. Κάθε χαρακτηριστικό συνοδεύεται από κάποιες ιδιότητες όπως το μήκος και ο προσανατολισμός, η ισχύς (gradient across edge), η καμπυλότητα όταν πρόκειται για ακμές, το πλήθος των ευθύγραμμων τμημάτων που το συνθέτουν, το εμβαδόν και η μέση ένταση στο εσωτερικό.

Σε γενικές γραμμές η συνταύτιση χαρακτηριστικών έχει τρία στάδια (Li, 1988):

1. ανεξάρτητη εύρεση χαρακτηριστικών στις δύο εικόνες και δημιουργία λίστας χαρακτηριστικών και ιδιοτήτων για κάθε ένα εξ αυτών.
2. αρχική αντιστοίχηση με περιορισμό την ακτίνα αναζήτησης και κάποιο μέτρο ομοιότητας
3. τελική συνταύτιση με χρήση κριτηρίων μοναδικότητας, διάταξης και συνέχειας-ομαλότητας επιφάνειας.

Η εύρεση χαρακτηριστικών έχει μεγάλο υπολογιστικό κόστος και απαιτεί συνήθως ορισμό κατωφλιών. Επίσης σε ορισμένες περιπτώσεις κατά τον εντοπισμό το χαρακτηριστικό μετατοπίζεται ελαφρά, γεγονός που επηρεάζει την τελική ακρίβεια κατά άγνωστη ποσότητα (Li, 1988).

Στην συνταύτιση έντασης το κριτήριο ομοιότητας είναι η διαφορά της έντασης ανάμεσα στα εικονοστοιχεία των παραθύρων. Στην περίπτωση της συνταύτισης χαρακτηριστικών το πρόβλημα είναι πολυπλοκότερο, γιατί βασίζεται στις ιδιότητες των χαρακτηριστικών. Οι περισσότερες μεθοδολογίες βασίζονται σε ομοιότητα γεωμετρίας και ιδιοτήτων που συνδυάζονται με επαγωγικές διαδικασίες για τον υπολογισμό ενός μέτρου ομοιότητας, δημιουργώντας έτσι μια συνάρτηση ενέργειας που πρέπει να μεγιστοποιηθεί ή μία συνάρτηση κόστους που πρέπει να ελαχιστοποιηθεί (cost and energy functions).

Επειδή η διάκριση με κριτήριο το είδος της συσχετιζόμενης οντότητας χρησιμοποιείται από τα περισσότερα εγχειρίδια και τους περισσότερους ερευνητές, θεωρείται η πιο βασική, ενώ η συνταύτιση σημείων αποτελεί αντικείμενο της παρούσης εργασίας, θα γίνει αναλυτική αναφορά σε αυτές τις κατηγορίες.

Συγκριτικά με την ελαχιστοτετραγωνική συνταύτιση των εικόνων, η συνταύτιση χαρακτηριστικών είναι ικανοποιητική από πλευράς αποτελεσμάτων, ταχύτερη και λιγότερο ευαίσθητη σε διαφορές τόνων και γεωμετρικές παραμορφώσεις, αλλά μπορούν να συσχετισθούν λίγα σχετικά σημεία, οπότε το τελικό αποτέλεσμα έχει μεγάλα κενά και οδηγεί κατά κανόνα σε μεγάλες περιοχές με παρεμβολές στο τελικό ΨΜΕ (Lu and Kubik, 2000).

Είναι προφανές ότι κάθε κατηγορία έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, έτσι πολύ αλγόριθμοι χρησιμοποιούν συνδυασμό δύο ή περισσοτέρων κατηγοριών προκειμένου να βελτιώσουν την απόδοσή τους.

2.5.2.1. Συνταύτιση σημείων

Η συνταύτιση σημείων αποτελεί το πιο διαδεδομένο είδος συνταύτισης. Αν και ο ορισμός του σημείου είναι σαφής από την γεωμετρία, χρειάζεται να επαναπροσδιοριστεί στην περίπτωση των ψηφιακών εικόνων που αποτελούνται από διακριτές τιμές γκρίζων τόνων (εικονοστοιχεία). Κάθε εικονοστοιχείο έχει

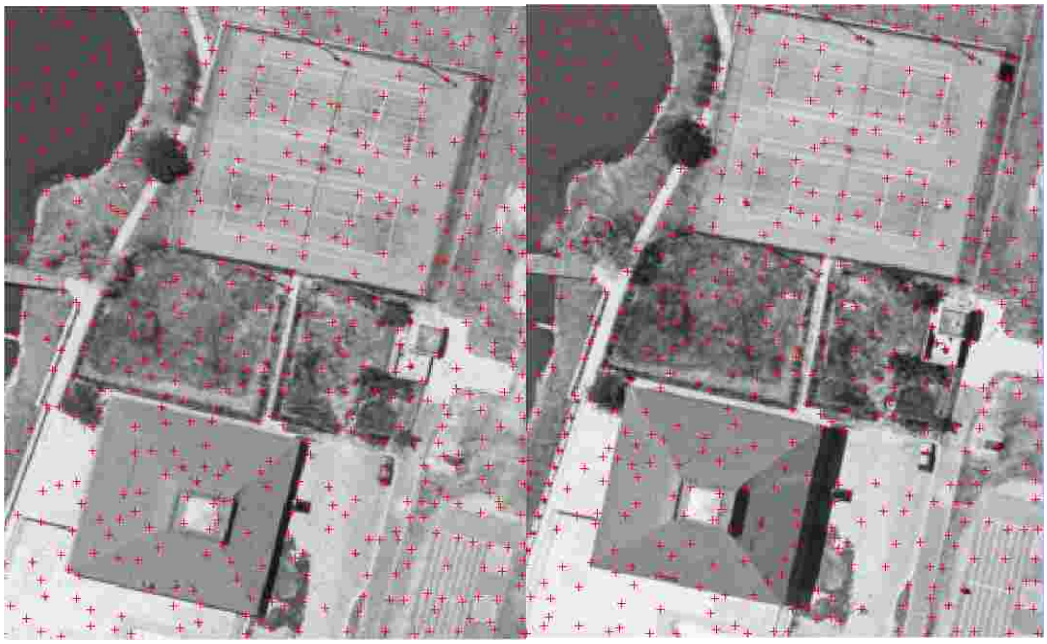
συγκεκριμένες διαστάσεις και συγκεκριμένη τιμή γκρίζου τόνου, ίδια για όλη του την επιφάνεια. Εάν το εικονοστοιχείο θεωρηθεί "σημείο" για την ψηφιακή εικόνα, τότε το ομόλογο εικονοστοιχείο θα πρέπει να έχει την ίδια ακριβώς τιμή γκρίζου τόνου. Η υπόθεση αυτή δημιουργεί δύο βασικά προβλήματα:

1.πιθανότατα υπάρχουν πάρα πολλά εικονοστοιχεία στην εικόνα αναζήτησης που να ικανοποιούν αυτή την συνθήκη και η διάκριση του σωστού είναι πολύ δύσκολη
2.το ομόλογο εικονοστοιχείο, κατά πάσα πιθανότητα, δεν θα έχει ακριβώς την ίδια τιμή γκρίζου τόνου, λόγω διαφορετικής γωνίας λήψης, γεωμετρίας, φωτισμού και πολλών ακόμα παραμέτρων, που καθιστούν πρακτικά αδύνατο να έχει την ίδια ακριβώς τιμή, στο εύρος των 8 bit που χρησιμοποιούνται ευρέως για αεροφωτογραφίες.

Κατά συνέπεια, το "σημείο" δεν μπορεί να αντιμετωπισθεί ως ένα μόνο εικονοστοιχείο, αλλά μια γειτονιά από εικονοστοιχεία, ώστε να υπάρχει αρκετή πληροφορία που να επιτρέπει την συνταύτιση με το ομόλογο "σημείο" στην άλλη εικόνα. Έχει επικρατήσει αυτές οι γειτονιές να ονομάζονται παράθυρα και να έχουν περιττό μέγεθος εικονοστοιχείων, δηλ. να έχουν διαστάσεις 3x3, 5x5, 7x7 κλπ. Ο βασικός λόγος είναι ότι τα παράθυρα αυτά έχουν σημαντική επιφάνεια, ενώ ταυτόχρονα είναι απαραίτητο να θεωρηθούν ως σημεία για ορισμένες εφαρμογές, όπως η συνθήκη της συγγραμμικότητας. Έτσι το κεντρικό εικονοστοιχείο αναλαμβάνει τον ρόλο του "σημείου", αλλά η συνταύτιση γίνεται χρησιμοποιώντας ένα παράθυρο γύρω από αυτό το σημείο.

Η εξαγωγή χαρακτηριστικών σημείων (ή σημείων ενδιαφέροντος) από εικόνες χρησιμοποιείται κυρίως για να επιλεγούν σημεία με αρκετή πληροφορία για συνταύτιση (σχήμα 2.3). Οι κυριότεροι τελεστές είναι οι Moravec (1976), Förstner (1986) (αναλυτικά στην παράγραφο 3.1.6.3) και Harris (1988). Ο Moravec χρησιμοποιεί την στατιστική διακύμανση ως μέτρο σαφήνειας (distinctness) ενός παραθύρου, το οποίο και συγκρίνει με την γειτονιά του χρησιμοποιώντας τοπικά και ολικά κατώφλια. Η ακρίβεια προσδιορισμού χαρακτηριστικών σημείων είναι ένα εικονοστοιχείο. Ο Förstner (Förstner 1986, Förstner & Gulch 1987) χρησιμοποιεί δύο κριτήρια (έντασης και κυκλικότητας) σε ένα μικρό παράθυρο (5x5 ή 7x7). Στη συνέχεια χρησιμοποιώντας κατώφλια επιστρέφει χαρακτηριστικά σημεία σε γωνίες και σημειακές εξάρσεις της έντασης των γκρίζων τόνων. Μπορεί να επιτύχει ακρίβεια καλύτερη από ένα εικονοστοιχείο.

Ο απλούστερος τρόπος συνταύτισης ενός σημείου στην αριστερή εικόνα με κάποιο σημείο από την δεξιά εικόνα είναι με συνταύτιση των γκρίζων τόνων. Έχοντας ήδη εξαγάγει χαρακτηριστικά σημεία και στις δύο εικόνες (σχήμα 2.3) και θεωρώντας ότι υπάρχει κάποιος τρόπος να περιοριστεί η περιοχή αναζήτησης στην δεξιά εικόνα, τότε μέσα σε αυτή την περιοχή υπάρχουν δεδομένα χαρακτηριστικά σημεία. Ανάμεσα στο παράθυρο γύρω από το χαρακτηριστικό-πρότυπο στην αριστερή εικόνα και στα παράθυρα γύρω από τα σημεία της δεξιάς εικόνας, εφαρμόζεται κάποιο μέτρο ομοιότητας των τιμών του γκρίζου. Το σημείο με το καλύτερο μέτρο ομοιότητας θεωρείται ομόλογο του αρχικού (Barnard, et al., 1980). Η παραπάνω περιγραφή είναι γενικευμένη, αλλά αντιπροσωπευτική για τον τρόπο με τον οποίο λειτουργούν οι εφαρμογές συνταύτισης σημείων.



Σχήμα 2.3. Χαρακτηριστικά σημεία με τον τελεστή Harris. (αεροφωτογραφίες από ZI imaging)

Το πρόβλημα στην διαδικασία αυτή είναι ότι το ομόλογο σημείο στην δεξιά εικόνα θα πρέπει να έχει εντοπιστεί ως χαρακτηριστικό σημείο από τον αλγόριθμο, κάτι το οποίο δεν ισχύει πάντα. Επίσης μπορεί μέσα στην περιοχή ελέγχου να υπάρχει κάποιο σημείο που να έχει μεγαλύτερο συντελεστή συσχέτισης από το αληθές σημείο και έτσι να γίνει αποδεκτό, γεγονός το οποίο οδηγεί σε λάθος συνταύτιση. Επίσης δεν υπάρχει καμία εγγύηση ότι τα σημεία που έχουν επιλεγεί ανεξάρτητα στις δύο εικόνες από κάποιο τελεστή σημείων και έχουν περάσει με επιτυχία τις υπόλοιπες φάσεις ανταποκρίνονται τελικά στο ίδιο φυσικό σημείο.

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται ευρέως σε εφαρμογές αυτόματου σχετικού προσανατολισμού. Σε αυτή την περίπτωση δεν έχει σημασία η συλλογή μεγάλου πλήθους σημείων, όσο η αξιοπιστία. Στην αξιοπιστία στοχεύουν τόσο η μέθοδος RANSAC (RANdom SAmpling Consesus, Fischler και Bolles, 1981) όσο και μέθοδος που παρουσιάστηκε από τους Kanazawa και Kanatani (2002). Η πρώτη είναι πιο διαδεδομένη και εφαρμόζεται πλέον και σε αεροφωτογραφίες. Αντί να χρησιμοποιεί όλο το πλήθος των διαθέσιμων ομόλογων σημείων και εξ αυτών να εντοπίζει τα χονδροειδή σφάλματα με διαδικασίες ανίχνευσης σφαλμάτων (data snooping), χρησιμοποιεί τον ελάχιστο αριθμό ομόλογων σημείων (ή ένα μικρό σχετικά αριθμό σημείων που εξαρτάται από την υλοποίηση) για να βρει μια αρχική λύση και με αυτή υπολογίζει το πλήθος των ομόλογων σημείων που συμφωνούν και δεν παρουσιάζονται ως σφάλματα. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται και για άλλες ομάδες τυχαίων σημείων. Η ομάδα σημείων που έχει το μέγιστο πλήθος λοιπών σημείων που συμφωνούν με αυτή είναι και η βέλτιστη.

Στην περίπτωση που στόχος είναι η συλλογή αυτόματου ΨΜΕ, τα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι η υποδεέστερη ακρίβεια, αλλά κυρίως η χωρική κατανομή των σημείων, που δεν καλύπτουν πάντα ομοιογενώς την επιφάνεια του στερεομοντέλου. Το δεύτερο αντικρούεται από ορισμένους (Otto και Chau, 1989, McGlone, 2004) επειδή οι περιοχές όπου δεν μπορεί ο τελεστής να ανιχνεύσει σημεία, είναι ομοιογενείς και η συνταύτιση έντασης δεν μπορεί εξορισμού να εντοπίσει ομόλογο σημείο. Σε περίπτωση δημιουργίας ΨΜΕ τέτοιες περιοχές στην πλειοψηφία τους περιγράφουν ένα επίπεδο, οπότε μερικά σημεία στην περίμετρό της αρκούν για να την περιγράψουν πλήρως.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η συνταύτιση γκρίζων τόνων μπορεί να εφαρμοστεί ανεξάρτητα, έστω και σε τυχαία σημεία κανάβου, ενώ η συνταύτιση χαρακτηριστικών σε σχεδόν όλες τις εφαρμογές της χρησιμοποιεί σε τελικό στάδιο συνταύτιση γκρίζων τόνων.

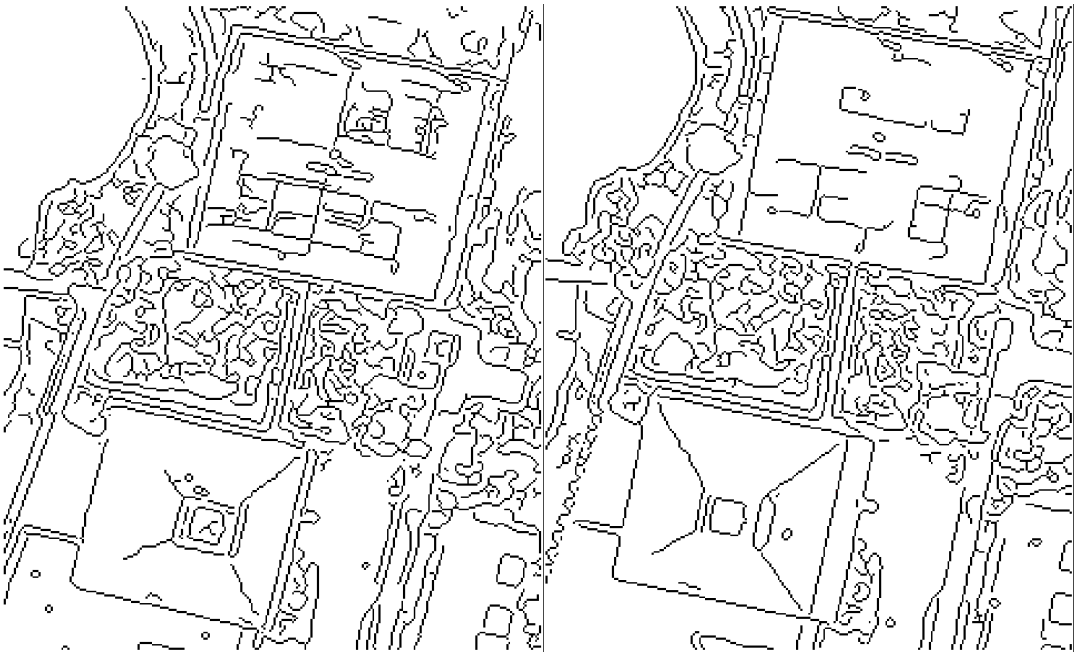
Σε ορισμένες περιπτώσεις, μετά την συνταύτιση των σημείων ενδιαφέροντος ακολουθεί πύκνωση των ομόλογων σημείων με την συνταύτιση σημείων που βρίσκονται επί της ευθείας μεταξύ ομόλογων χαρακτηριστικών σημείων. Με αυτή τη μέθοδο είναι εύκολο να υπολογισθούν αρχικές τιμές για τις θέσεις ομόλογων σημείων (ακόμα και στην περίπτωση που δεν χρησιμοποιείται επιπολική γεωμετρία), καθώς και αρχικές τιμές για τις παραμέτρους του γεωμετρικού μετασχηματισμού, μειώνοντας έτσι τον αριθμό

επαναλήψεων και αποφεύγοντας εσφαλμένες συγκλίσεις (Zhang, 1988). Άλλη εφαρμογή που ακολουθεί πύκνωση στον πραγματικό χώρο των φωτοσταθερών με συνταύτιση χαρακτηριστικών σημείων και εκ νέου πύκνωση με συνταύτιση γκρίζων τόνων είναι του Angleraud (et al., 1992).

2.5.2.2. Συνταύτιση ακμών

Η πρώτη μέθοδος συνταύτισης ακμών είναι γνωστή ως Marr-Poggio-Grimson (Grimson 1985). Η μέθοδος λειτουργεί επί επιπολικών εικόνων. Ανιχνεύει αρχικά εικονοστοιχεία στα οποία μηδενίζεται η δεύτερη παράγωγος της εικόνας και δημιουργεί ακμές (σχήμα 2.4). Έχοντας κάποια αρχική πληροφορία σχετικά με την περιοχή στην οποία αναμένεται η ομόλογη ακμή περιορίζεται η περιοχή ελέγχου. Οι πιθανές ακμές που εμπίπτουν σε αυτή την περιοχή φιλτράρονται καταρχήν με το πρόσημο της πρώτης παραγώγου, το οποίο παρέχει πληροφορία για το ποια πλευρά της ακμής είναι πιο φωτεινή. Άλλα χαρακτηριστικά μεγέθη των ακμών, όπως διεύθυνση και ένταση, χρησιμοποιούνται για να μειώσουν περαιτέρω τις πιθανότητες.

Το τελικό κριτήριο βασίζεται στην αρχή της ομαλής μεταβολής της παράλλαξης κατά μήκος των ακμών. Επειδή οι ακμές συνήθως αποτελούν γραμμές αλλαγής κλίσεως εκατέρωθεν, σπανιότατα παρουσιάζουν απότομη αλλαγή κλίσης και κατά μήκος τους. Δημιουργώντας ένα ιστόγραμμα από όλες τις πιθανές συσχετίσεις, μπορεί κανείς εύκολα να βρει την κύρια τάση της παράλλαξης και κατά συνέπεια να απορρίψει τις λάθος συσχετίσεις. Εάν και πάλι υπάρχει δυσκολία στην εύρεση της κύριας παράλλαξης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν πρόσθετες πληροφορίες που δεν είχαν χρησιμοποιηθεί σε προηγούμενο στάδιο, όπως κριτήρια έντασης και μοναδικότητας.



Σχήμα 2.4. Χαρακτηριστικές ακμές με τελεστή Canny, στις εικόνες του σχήματος 1.3.

2.5.2.3. Συνταύτιση γραμμών

Οι γραμμές δημιουργούνται από συνένωση ακμών και η συνταύτιση τους αποτελεί μια πιο αντιπροσωπευτική μορφή συνταύτισης χαρακτηριστικών από την συνταύτιση ακμών (Medioni & Nevatia 1984, Greenfeld & Schenk 1989). Η διαδικασία για την δημιουργία γραμμών από ακμές που είναι αποσπασματικές αποτελεί μια ιδιαίτερη διαδικασία που περιγράφεται από άλλες εργασίες (Sonka et al., 1993). Θεωρώντας λυμένο το πρόβλημα αυτό, δύο εικόνες στις οποίες έχουν ανιχνευθεί γραμμές μπορούν να συσχετισθούν μεταξύ τους χωρίς επιπλέον γεωμετρική πληροφορία, γεγονός που κάνει την μέθοδο χρήσιμη για επίλυση σχετικού προσανατολισμού. Η διαδικασία εύρεσης ομόλογης γραμμής στηρίζεται στα χαρακτηριστικά των γραμμών και πιο συγκεκριμένα στον τρόπο περιγραφής αυτών των χαρακτηριστικών. Υπάρχουν δύο μέθοδοι περιγραφής, η περιγραφή ψ-s και ο γενικός μετασχηματισμός Hough.

2.5.2.3.1. Η περιγραφή ψ-s.

Η καμπύλη ψ-s είναι μια διαγραμματική περιγραφή γραμμών, όπου το μήκος (s) είναι συνάρτηση της εφαπτομένης (ψ). Οι Ballard και Brown (1982) έχουν αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας μετατροπής

από την κλασική αναπαράσταση x-y της γραμμής σε ψ-s, καθώς και κάποια παραδείγματα.

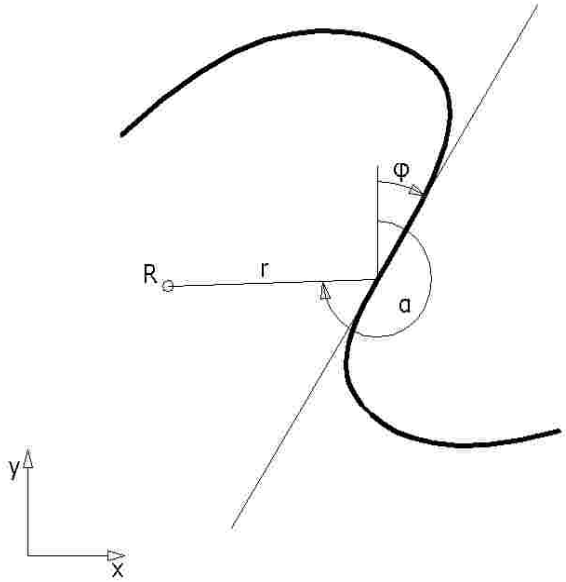
Οι ευθείες γραμμές αναπαριστώνται ως οριζόντιες ευθείες στο διάγραμμα ψ-s, αφού η πρώτη παράγωγός τους είναι σταθερή. Η ψ τιμή τους είναι ανάλογη της κλίσης τους. Οι κύκλοι αναπαριστώνται ως ευθείες γραμμές με κλίση ανάλογη με την καμπυλότητά τους. Η περιστροφή ενός σχήματος στον χώρο x,y αναπαριστάται με μια κατακόρυφη μετάθεση στο διάγραμμα ψ-s.

Μετά την μετατροπή όλων των γραμμών και των δύο εικόνων σε διάγραμμα ψ-s, ο σκοπός είναι να εντοπισθούν όμοιες γραμμές στο νέο αυτό χώρο. Οι Li και Schenk (1990) περιγράφουν ένα τρόπο συνταύτισης διαγραμμάτων ψ-s, ενώ οι Schenk (et al. 1991) παρουσιάζουν μια βελτιωμένη παραλλαγή όπου χρησιμοποιούν επιπλέον τοπικά και συνολικά κριτήρια συνοχής.

2.5.2.3.2. Γενικός μετασχηματισμός Hough.

Ο μετασχηματισμός Hough αποσκοπεί στην περιγραφή παραμετρικών σχημάτων. Ο γενικός μετασχηματισμός Hough (ΓΜΗ) αποσκοπεί στην περιγραφή γενικευμένων σχημάτων και ως εκ τούτου είναι καταλληλότερος για περιγραφή γραμμών από εικόνες. Ο ΓΜΗ έχει αναπτυχθεί από τον Ballard (1981) για την εύρεση αντικειμένων σε εικόνες.

Πρόκειται για μετασχηματισμό σε πολικές συντεταγμένες γύρω από ένα σημείο R, όπου κάθε εικονοστοιχείο του χώρου x,y περιγράφεται από τρεις τιμές φ, r, α, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.5. Έτσι κάθε εικονοστοιχείο της γραμμής αποκτά τρεις νέες τιμές μετά το μετασχηματισμό, οι οποίες μπορούν να μπουν σε έναν πίνακα. Η αντιπαραβολή αυτού του πίνακα πρότυπο με κάποιους πίνακες από πιθανές ομόλογες γραμμές, όπως περιγράφεται από τον Schenk (1999) και τον Zahran (1997), οδηγεί στην συνταύτιση γραμμών. Μετασχηματισμός Hough χρησιμοποιούνι καιοιHabib (et al., 2001) για συνταύτιση επιφανειών.



Σχήμα 2.5. Γενικευμένος μετασχηματισμός Hough.

2.5.2.4. Συνταύτιση κλειστών πολυγώνων

Όπως και στην συνταύτιση των προηγούμενων χαρακτηριστικών (σημείων, ακμών και γραμμών), το πρώτο βήμα είναι η κατάτμηση της εικόνας σε πολύγωνα. Για αυτό τον σκοπό χρησιμοποιούνται απλά κατώφλια κατάτμησης (segmentation) και ταξινόμησης (classification), διάσπαση-συγχώνευση (splitting & merging), τεχνικές που βασίζονται στην συνένωση ακμών και άλλες μέθοδοι (σχήμα 2.6). Στην συνέχεια οι επιφάνειες αυτές συσχετίζονται με βάση τα χαρακτηριστικά τους, όπως έκταση, περίμετρος, πλήθος γωνιών, προσανατολισμός κλπ.

Προφανές πλεονέκτημα είναι ότι με αυτόν τον τρόπο οι ραδιομετρικές διαφορές μεταξύ των εικόνων δεν δημιουργούν προβλήματα. Η συνταύτιση πολυγώνων αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο για την συνταύτιση (αυτόματος προσανατολισμός) ανομοιογενών δεδομένων όπως χάρτες, παγχρωματικές δορυφορικές εικόνες, εικόνες radar και αεροφωτογραφίες. Σε εφαρμογές που χρησιμοποιείται η συνταύτιση πολυγώ-

νων ως ενδιάμεσο στάδιο παρατηρούνται αρκετά σφάλματα γιατί δεν είναι μέθοδος με μεγάλη αξιοπιστία, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.6.

Σχήμα 2.6. Κατάτμηση εικόνων, στις εικόνες του σχήματος 1.3 .

2.5.3. Σχεσιακή συνταύτιση

Η σχεσιακή συνταύτιση χρησιμοποιεί δομικές περιγραφές εικόνων που συμπεριλαμβάνουν χαρακτηριστικά και σχέσεις μεταξύ τους (Shapiro et al., 1981).

Εκτός από τις τοπικές ιδιότητες του κάθε χαρακτηριστικού, οι ιδιότητες και σχέσεις μεταξύ των χαρακτηριστικών μπορούν να δημιουργήσουν συνολικές ιδιότητες. Αυτές οι ιδιότητες μπορεί να είναι γεωμετρικές, όπως η γωνία ανάμεσα σε δύο γειτονικά ευθύγραμμα τμήματα πολυγώνου ή το ελάχιστο της απόστασης ανάμεσα σε δύο ακμές, ή ραδιομετρικές όπως η διαφορά των μέσων όρων της έντασης σε δύο γειτονικά πολύγωνα ή τοπολογικές όπως η έννοια του ότι ένα χαρακτηριστικό μπορεί να εμπεριέχεται σε κάποιο άλλο. Η συνταύτιση τέτοιου είδους συνολικότερων σχέσεων χαρακτηριστικών ονομάζεται σχεσιακή συνταύτιση. Οι πληροφορίες και οι ιδιότητες αντλούνται απευθείας από τον αλγόριθμο εξαγωγής χαρακτηριστικών είτε σε αμέσως επόμενο στάδιο. Για την επίλυση χρησιμοποιούνται συνήθως δενδροειδείς δομές (tree search methods). Ο τρόπος δόμησης των προτύπων και ο τρόπος περιγραφής των σχέσεων αποτελούν αντικείμενο δημοσιεύσεων από τον χώρο της μηχανικής όρασης (Shapiro & Haralick, 1982, 1985).

Η σχεσιακή συνταύτιση χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με την συνταύτιση χαρακτηριστικών, αφού ουσιαστικά η συνταύτιση ακμών, γραμμών και επιφανειών γίνεται με περιγραφικά δεδομένα των οντοτήτων και όχι με κάποιο μεμονωμένο χαρακτηριστικό, όπως η ένταση στην περίπτωση συνταύτισης σημείων.

Το μέτρο που χρησιμοποιείται συνήθως είναι η συγγένεια (relational distance–σχεσιακή απόσταση). Στόχος του μέτρου αυτού είναι να ποσοτικοποιήσει την ποιότητα της συνταύτισης και άρα να χρησιμοποιηθεί ως κριτήριο αποδοχής, και ταυτόχρονα να αποτελέσει μέγεθος του σφάλματος. Ουσιαστικά δείχνει πόσες και πόσο καλά ικανοποιούνται οι παράμετροι ενός προκαθορισμένου μοντέλου (πρότυπο). Ακόμα και αν ικανοποιηθούν όλες οι παράμετροι ενός προτύπου, αυτό δεν σημαίνει ότι υπάρχει πλήρης συνταύτιση με τον αντίστοιχο σχηματισμό χαρακτηριστικών στην εικόνα, αφού η συνταύτιση είναι γενική και όχι γεωμετρική. Συνήθως ακολουθεί μια νέα διαδικασία που χρησιμοποιεί ως πρώτη προσέγγιση την αρχική αποδοχή του μοντέλου και η οποία προσαρμόζει τις παραμέτρους του προτύπου στον σχηματισμό χαρακτηριστικών της εικόνας.

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται ευρέως σε εφαρμογές συνταύτισης εικόνας με προϋπάρχοντα

τρισδιάστατα πρότυπα, όπως σε περιπτώσεις μοντελοποίησης πόλεων (Baillard, et al., 1993, Elakser et al., 2003). Η σχεσιακή συνταύτιση δεν συσχετίζει μόνο τις εικόνες μεταξύ τους, αλλά και "αντικείμενα" των εικόνων με αποθηκευμένα πρότυπα. Το πρόβλημα σε αυτές τις περιπτώσεις είναι η γενικότητα των μορφών, πχ. των κτιρίων, καθώς δεν είναι δυνατόν να προβλεφθούν και αποθηκευτούν ως πρότυπα όλες οι πιθανές μορφές τους.

Η βάση δεδομένων που περιέχει τα σχεσιακά πρότυπα ονομάζεται βιβλιοθήκη και μπορεί να εμπλουτιστεί ανά πάσα στιγμή. Μια τυπική βάση δεδομένων περιέχει:

Πρωτογενή αντικείμενα (primitives). Πρόκειται για απλά τρισδιάστατα αντικείμενα των οποίων η σύνθεση μπορεί να δημιουργήσει πιο σύνθετα αντικείμενα. Από αυτά τα αντικείμενα δημιουργούνται διαγράμματα σχέσεων μεταξύ γειτονικών επιφανειακών στοιχείων της εικόνας.

Απόψεις (aspects). Αποτελούν αποθηκευμένες απόψεις (δισδιάστατες) των πρωτογενών αντικειμένων. Οι απόψεις αφορούν όλα τα πρωτογενή αντικείμενα και όλα τα αντικείμενα έχουν ίδιο πλήθος απόψεων, συνήθως από προκαθορισμένες γωνίες. Προκειμένου να περιοριστεί το πλήθος των απόψεων, αφού αφορούν όλα τα αντικείμενα και διογκώνουν το μέγεθος της βιβλιοθήκης, εφαρμόζονται κάποιοι λογικοί κανόνες, ώστε να περιοριστεί ο αριθμός τους (π.χ ένα σπίτι δεν πρόκειται να εμφανίζεται σε μία αεροφωτογραφία από μία μόνο πλάγια όψη του). Στη βιβλιοθήκη αποθηκεύονται οι σχέσεις μεταξύ των επιφανειών όπως αυτές καταγράφονται στις διάφορες απόψεις. Επίσης είναι δυνατόν κάποια άποψη να είναι όμοια σε δύο πρωτογενή αντικείμενα, χωρίς αυτό όμως να σημαίνει ότι χάνει την εξάρτησή της από το πρωτογενές αντικείμενο από το οποίο προέρχεται, δημιουργώντας έτσι μια σχέση "ένα προς πολλά".

Έδρες (facets) είναι οι ανεξάρτητες επιφάνειες (κλειστά πολύγωνα) στις οποίες μπορούν να αναλυθούν οι απόψεις. Στη βιβλιοθήκη αποθηκεύονται σε σχέση με τις απόψεις στις οποίες συμμετέχουν.

Σύνορα (boundaries) είναι τα γραμμικά στοιχεία (ανοιχτά πολύγωνα) στα οποία μπορούν να αναλυθούν οι έδρες. Τέτοια στοιχεία είναι το ευθύγραμμο τμήμα, κυκλικό τόξο, δύο παράλληλες ευθείες γραμμές, δύο ευθύγραμμα τμήματα που σχηματίζουν γωνία, δύο συγκλίνουσες αλλά όχι τεμνόμενες γραμμές κλπ. Ομοίως αυτά τα στοιχεία αποθηκεύονται στην βιβλιοθήκη σε σχέση με τις έδρες στις οποίες μετέχουν.

Όλα τα παραπάνω συμμετέχουν στην δενδροειδή δομή δεδομένων από όπου παίρνουν και το όνομά τους (tree graphs).

Η διαδικασία συνταύτισης πραγματοποιείται με τα εξής βήματα (Shapiro & Haralick 1987, Grimson 1984, Schenk & Hofmann 1986, Schenk 1987, Ghaffary 1985):

1. Εξαγωγή ακμών στις εικόνες. Ιδιαίτερη σημασία πρέπει να δοθεί σε αυτό το βήμα, εφόσον η όλη διαδικασία στηρίζεται στα δεδομένα που προκύπτουν από αυτό.
2. Ανάλυση των ακμών και σύνθεσή τους μέσω της βιβλιοθήκης σε "όρια" (ανοιχτά ή κλειστά πολύγωνα)
3. Σύνθεση των συνόρων σε έδρες μέσω της βιβλιοθήκης
4. Σύνθεση των εδρών σε απόψεις μέσω της βιβλιοθήκης
5. Σύνθεση των απόψεων σε πρωτογενή αντικείμενα.
6. Γεωμετρική προσαρμογή του πρωτογενούς αντικειμένου, εφόσον είναι απαραίτητη.

Η σχεσιακή συνταύτιση έχει εφαρμογή στην δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων πόλεων από αεροφωτογραφίες ή αναγνώριση αντικειμένων σε φωτογραφίες για καταμέτρηση και ποιοτικό έλεγχο. Η σχεσιακή συνταύτιση βασίζεται στην κατάτμηση εικόνων, που σε αεροφωτογραφίες δεν έχει καλά αποτελέσματα και κατά συνέπεια η σχεσιακή συνταύτιση δεν έχει ευρεία εφαρμογή στην φωτογραμμετρία.

2.5.4. Σύγκριση των παραπάνω τριών ειδών συνταύτισης

Με την παραδοχή ότι η σχεσιακή συνταύτιση αποτελεί επέκταση και είδος της συνταύτισης χαρακτηριστικών, τα δύο βασικά είδη συνταύτισης εικόνων είναι η συνταύτιση έντασης και η συνταύτιση χαρακτηριστικών.

Η συνταύτιση τιμών γκρίζου είναι απλή στην εφαρμογή της και γρήγορη, αλλά εφόσον εξαρτάται από τις τιμές γκρίζου είναι ευαίσθητη σε αλλαγές φωτισμού και γωνίες θέασης, οπότε δεν είναι αξιόπιστη όσο η συνταύτιση χαρακτηριστικών. Είναι πολύ ευαίσθητη στο μέγεθος του παραθύρου και ως εκ τούτου απαιτεί από τον χρήστη να επιλέξει ανάμεσα στην αξιοπιστία ή στην ομαλοποίηση του τελικού μοντέλου.

Μια γενική σύγκριση των μεθόδων είναι μάλλον ανεδαφική. Όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, πολλές εφαρμογές είναι υβριδικές και χρησιμοποιούν αμφότερα τα χαρακτηριστικά και τις τιμές γκρίζου. Ως εκ τούτου η απομόνωση και σύγκριση δεν έχουν σαφή βάση. Οι Scharstein και Szeliski (2002) έκαναν μια σημαντική προσπάθεια συγκέντρωσης και σύγκρισης αλγορίθμων για πυκνή συνταύτιση σε ζεύγη εικόνων. Όπως όμως αναφέρουν και οι ίδιοι δεν κατάφεραν να συγκεντρώσουν όλες τις μεθόδους.

2.6. Άλλα είδη διάκρισης της ψηφιακής συνταύτισης

2.6.1. Με κριτήριο την εφαρμογή.

Μερικές εφαρμογές συνταύτισης εστιάζουν στην εύρεση λίγων αλλά αξιόπιστων σημείων, όπως στην περίπτωση του σχετικού προσανατολισμού, ενώ άλλες έχουν σκοπό την εύρεση όσων περισσότερων σημείων είναι εφικτό, όπως στην περίπτωση δημιουργίας ΨΜΕ. Είναι προφανές ότι αυτές οι δύο όψεις του ίδιου προβλήματος οδηγούν σε διαφορετικές προσεγγίσεις και κατά συνέπεια μπορούν να αποτελέσουν μια καταρχήν διάκριση των αλγορίθμων.

Οι Lang και Förstner (1995) διακρίνουν την συνταύτιση σε:

- **Συνταύτιση εικόνας (Image matching).** Σε αυτή την περίπτωση κάποια χαρακτηριστικά της μίας εικόνας εντοπίζονται στην άλλη. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι οι γκρίζοι τόνοι, σημεία, ακμές ή επιφάνειες. Χαρακτηριστικό αυτής της προσέγγισης είναι ότι μπορεί να λειτουργήσει χωρίς καμία πρόσθετη πληροφορία. Σε αυτή την περίπτωση ανήκει η εύρεση σημείων για αυτόματο σχετικό προσανατολισμό.
- **Εντοπισμός αντικειμένων (Object localization).** Σε αυτή την περίπτωση προϋπάρχει κάποιο πρότυπο το οποίο εντοπίζεται σε μία ή περισσότερες εικόνες. Παράδειγμα είναι ο εντοπισμός και μέτρηση εικονοσημάτων. Γενικά η περίπτωση αναφέρεται σε κάθε μορφής προσημασμένους στόχους.
- **Ανακατασκευή αντικειμένων (Object reconstruction).** Σε αυτή την περίπτωση γίνεται συνταύτιση ανάμεσα σε μία εικόνα και ένα παραμετρικό μοντέλο. Εδώ υπάγονται οι εφαρμογές μοντελοποίησης, επίσης η δημιουργία ψηφιακών μοντέλων εδάφους (Habib et al., 2001) μαζί με τον εντοπισμό γραμμών αλλαγής κλίσης, δρόμων, κτιρίων, γεφυρών, που μπορούν να αναπαρασταθούν από απλές γεωμετρικές οντότητες.

Οι δύο τελευταίες περιπτώσεις γενικά απαιτούν κάποιο είδος πρόσθετης πληροφορίας (πχ. παραμετρικά μοντέλα κτιρίων, προσανατολισμούς εικόνων κλπ.).

Από τα παραπάνω είδη ψηφιακής συνταύτισης, η διαφορά ανάμεσα στη συνταύτιση αντικειμένων και τη συνταύτιση εικόνας, μοιάζει δυσδιάκριτη. Η διαφορά αυτή αφορά τον τρόπο αντιμετώπισης του ίδιου κατά βάση προβλήματος με διαφορετικό τρόπο. Ο εντοπισμός αντικειμένων αναφέρεται κυρίως στην εύρεση ενός συγκεκριμένου προτύπου (αναγνώριση και εντοπισμός) σε κάποια εικόνα. Πρόκειται ουσιαστικά για ανίχνευση ενός μόνο αντικειμένου, που περιγράφεται από αρκετά εικονοστοιχεία (ως πρότυπο), σε μία ολόκληρη εικόνα, με διαφορετικό προσανατολισμό και διαφορετική κλίμακα από το προς ανίχνευση πρότυπο. Η συνταύτιση εικόνων αναφέρεται περισσότερο στην εύρεση ενός μεγάλου αριθμού τυχαίων κοινών σημείων σε δύο εικόνες, με ζητούμενο την κατά το δυνατόν μεγαλύτερη κάλυψη της κοινής τους περιοχής. Οι εικόνες αυτές συνήθως δεν έχουν μεγάλες διαφορές, καθώς έχουν παράλληλους άξονες λήψης και κοινή κλίμακα (αεροφωτογραφίες).

2.6.2. Με κριτήριο την περιοχή εφαρμογής: Τοπικές, γενικές και συνδυαστικές (local, global & cooperative)

2.6.2.1. Γενικές μέθοδοι

Η ταξινόμηση αυτή έχει παρουσιαστεί από τους Cox et al. (1992) και Agrawal et al. (2003) και αφορά όλες τις μεθόδους, αφού κριτήριο εδώ είναι ο συνδυασμός ή όχι της παράλλαξης κάθε σημείου με τα γειτονικά του. Στις τοπικές μεθόδους η παράλλαξη κάθε σημείου υπολογίζεται ανεξάρτητα από τα γειτονικά και δεν επηρεάζεται από αυτά, ενώ στις γενικές γίνεται βελτιστοποίηση συνδυαστικών συναρτήσεων παράλλαξης για όλο το μοντέλο. Το αποτέλεσμα είναι ομαλοποιημένο, αφού οι αληθείς απότομες αλλαγές της παράλλαξης φιλτράρονται. Στην περίπτωση των τοπικών μεθόδων η παράλλαξη μπορεί να μεταβάλλεται οσοδήποτε από σημείο σε σημείο, εξασφαλίζοντας καλύτερη απόδοση της

πραγματικότητας, αλλά οι αστοχίες δεν φιλτράρονται με αποτέλεσμα να υπάρχουν πολλά λάθη στο τελικό αποτέλεσμα.

Βασικό χαρακτηριστικό των μεθόδων αυτών είναι η προσπάθεια βελτιστοποίησης μιας συνάρτησης που αφορά το σύνολο της εικόνας και όχι κάποια υποπεριοχή της. Πρόκειται για ένα τρόπο εφαρμογής του κριτηρίου της συνέχειας με γενικό τρόπο. Η πρώτη εφαρμογή με χρήση γενικής μεθόδου παρουσιάστηκε από τον Cox et al. (1992). Πρόκειται για ελαχιστοποίηση της ενέργειας:

$$E(d) = E_{data}(d) + E_{smooth}(d) \tag{2.1}$$

όπου d η συνάρτηση του αθροίσματος της παράλλαξης όλων των ομόλογων σημείων για την οποία η παραπάνω ενέργεια ελαχιστοποιείται.

Ο πρώτος όρος $E_{data}(d)$ υπολογίζεται από το σύνολο των συσχετίσεων των ομόλογων σημείων στις δύο εικόνες και θα μπορούσε να εκφραστεί ως:

$$E_{data}(d) = \sum_{p \in I} M(p, d(p)) \tag{2.2}$$

όπου p είναι τα εικονοστοιχεία της αρχικής εικόνας και M(p,d(p)) η συνάρτηση συνταύτισης.

Ο δεύτερος όρος εκφράζει την συνέχεια της επιφάνειας και ουσιαστικά επιβαρύνει τις περιπτώσεις όπου υπάρχουν μεγάλες διαφορές παράλλαξης μεταξύ γειτονικών σημείων. Εκφράζεται δε ως:

$$E_{smooth}(d) = \sum_{\{p,q\} \in N} V_{\{p,q\}}(d(p), d(q)) \tag{2.3}$$

όπου p, q είναι ζεύγη ομολόγων σημείων,

N τα ζεύγη γειτονικών ομόλογων σημείων

$V_{\{p,q\}}(d(p), d(q))$, μέτρο ανομοιότητας γειτονικών παραλλάξεων.

Συνήθως τα ελάχιστα σε τέτοιου είδους συναρτήσεις ενέργειας υπολογίζονται με δυναμικό προγραμματισμό.

2.6.2.2. Τοπικές μέθοδοι

Οι τοπικές μέθοδοι βασίζονται αποκλειστικά στην πληροφορία γύρω από το προς συνταύτιση χαρακτηριστικό. Κατά συνέπεια δεν μπορεί να εφαρμοστεί το κριτήριο της συνέχειας της επιφάνειας, αφού κάθε στοιχείο αντιμετωπίζεται ανεξάρτητα. Η εφαρμογή του κριτηρίου της συνέχειας εφαρμόζεται ανεξάρτητα σε επόμενο στάδιο. Οι μέθοδοι χρησιμοποιούν ένα μόνο μέτρο ομοιότητας και βασίζονται στο κριτήριο της μοναδικότητας χρησιμοποιώντας την τακτική "ο νικητής τα παίρνει όλα" (Winner-takes-all WTA) (Okutomi et al., 1993, Szeliski et al., 2002). Η συνταύτιση γκρίζων τόνων στην απλή τους μορφή αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα των συγκεκριμένων μεθόδων. Μειονέκτημα των μεθόδων είναι ότι δεν έχουν την αξιοπιστία των γενικών, ενώ πλεονέκτημά τους είναι η ταχύτητα.

Πρακτικά οι δύο παραπάνω μέθοδοι δεν αντιμετωπίζονται ανεξάρτητα, αφού οι γενικές μέθοδοι χρησιμοποιούν μέσα στην συνάρτηση ενέργειας κάποιο μέτρο ομοιότητας (συνταύτισης έντασης) και οι τοπικές από μόνες τους δεν έχουν καλά αποτελέσματα. Κατά συνέπεια η ταξινόμησή γίνεται με το "που κυρίως ανήκουν". Οι συνδυαστικές είναι εκείνες που καταφανώς παντρεύουν αμφότερες τις μεθόδους.

2.6.2.3. Συνδυαστικές μέθοδοι

Οι συνδυαστικές μέθοδοι στηρίζονται σε μοντελοποίηση της ανθρώπινης όρασης. Επαναληπτικές μη-γραμμικές διαδικασίες υπολογισμού τοπικών μέτρων χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό ενός συνολικού μέτρου, παρόμοιου με αυτά που χρησιμοποιούνται στις συνολικές μεθόδους. Ως εκ τούτου χαρακτηρίζονται ως συνδυαστικές.

Οι Kanade et al. (2000) χρησιμοποιούν μία δομή δεδομένων (x,y,d), όπου κάθε εικονοστοιχείο της εικόνας (x,y) έχει μία παράλλαξη d. Σε αυτή τη δομή στηρίζονται δύο επιφάνειες, η υποστηρικτική (support area) και η απαγορευτική (inhibition area). Η πρώτη εκφράζει την συνέχεια της επιφάνειας και η δεύτερη το κριτήριο της μοναδικότητας. Οι επαναλήψεις αρχίζουν αφού έχει υπολογισθεί μία αρχική επιφάνεια χρησιμοποιώντας συνταύτιση των εντάσεων. Σε κάθε επανάληψη η υποστηρικτική επιφάνεια ανανεώνεται με βάση την απαγορευτική και ουσιαστικά εξαλείφονται τα πολλαπλά ομόλογα σημεία. Η μέθοδος προβλέπει και ένα κατώτερο κατώφλι ομοιότητας, κάτω από το οποίο η περιοχή χαρακτηρίζεται ως "αόρατη". Τα αποτελέσματα της μεθόδου δεν ήταν ικανοποιητικά.

Εξέλιξη της προηγούμενης είναι η εργασία των Zhang et al. (2002) που πρόσθεσε τρία ακόμα στοιχεία. Εξασφαλίζει ότι τα ομόλογα σημεία θα πρέπει να έχουν υψηλά μέτρα ομοιότητας, χρησιμοποιεί φωτοσταθερά (ground truth) και η υποστηρικική επιφάνεια υφίσταται κατάτμηση ώστε να μην εφαρμοστεί συνταύτιση στα άκρα της, ενώ τα σημεία εντός της θα πρέπει να παρουσιάζουν ομαλή μεταβολή της παράλλαξης. Τα αποτελέσματα ήταν βελτιωμένα, αλλά εξακολουθεί να υπάρχει η αβεβαιότητα της κατάτμησης, πάνω στην οποία βασίζεται η μέθοδος.

Συνδυαστική θεωρείται και η μέθοδος των Agrawal et al. (2003) που χρησιμοποιεί τομές γραφημάτων (graph cuts).

2.6.3. Με γνωστό ή άγνωστο προσανατολισμό

Η διάκριση σε αυτή την περίπτωση γίνεται με κριτήριο την γνώση του προσανατολισμού, εστιάζοντας ουσιαστικά στην χρήση ή όχι επιπολικής γεωμετρίας. Αυτή η διάκριση αφορά όλες τις μεθόδους.

Ορισμένοι αλγόριθμοι, αν και ξεκινούν χωρίς προσανατολισμό, επιχειρούν να λύσουν τον σχετικό προσανατολισμό, ώστε να χρησιμοποιήσουν επιπολική γεωμετρία στην συνέχεια. Μάλιστα υπάρχει και διάκριση του τρόπου προσδιορισμού σχετικού προσανατολισμού, με μικρή ή μεγάλη βάση (short and long base). Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι εικόνες video που έχουν συνέχεια, μεγάλη επικάλυψη και κατά συνέπεια μικρές διαφορές μεταξύ τους (Pollefeys, et al., 1999), ενώ στην δεύτερη περίπτωση ανήκουν εικόνες που έχουν σημαντικές διαφορές μεταξύ τους επειδή η βάση είναι μεγάλη και υπάρχουν σημαντικές στροφές (Strecha et al., 2003).

2.6.4. Άμεσες και έμμεσες

Στην περίπτωση αυτή, η διάκριση γίνεται με κριτήριο εάν η συνταύτιση των οντοτήτων γίνεται απευθείας ή εάν προηγείται κάποια μετατροπή ή μετασχηματισμός τους. Στην δεύτερη περίπτωση ανήκουν σχεδόν όλες οι εφαρμογές συνταύτισης ακμών, αφού οι ακμές μετασχηματίζονται (Hough, Fourier, Hadamard) ή μετατρέπονται (ψ-s περιγραφή) πριν συσχετιστούν. Το μέτρο ομοιότητας αφορά τους μετασχηματισμούς τους ή την νέα τους περιγραφή.

Στη συνταύτιση γκρίζων τόνων, το μέτρο ομοιότητας αφορά τους γκρίζους τόνους, οπότε το συγκεκριμένο είδος συνταύτισης είναι άμεσο.

2.6.5. Άλλες ταξινομήσεις

2.6.5.1. Η ταξινόμηση Brown

Η πιο αντιπροσωπευτική προσπάθεια ταξινόμησης χρησιμοποιεί παραδειγματικά εφαρμογές για να τις κατατάξει σύμφωνα με την οντότητα συνταύτισης, την στρατηγική συνταύτισης και το μέτρο ομοιότητας (Brown, 1992). Έτσι δεν ταξινομεί μόνο κάποιους αλγορίθμους παραδειγματικά, αλλά προτείνει ουσιαστικά κριτήρια για την ταξινόμηση και οποιουδήποτε νέου, και κατατάσσει τους αλγορίθμους

ανάλογα με την οντότητα συνταύτισης:

- τιμές γκρίζου
- χαρακτηριστικά γενικώς
- χαρακτηριστικά ενδιαφέροντος (σημεία τελεστών, κέντρα βάρους πολυγώνων, γωνίες, τομές γραμμών κλπ)
- χαρακτηριστικά στατιστικά μέτρα
- χαρακτηριστικά ανώτερης δομής (γραφήματα υφής, σχηματικά δίκτυα κ.λπ.)
- συνταύτιση με προϋπάρχοντα μοντέλα

ανάλογα με το μέτρο ομοιότητας:

- κανονικοποιημένος συντελεστής συσχέτισης
- στατιστική συνταύτιση και φίλτρα συνταύτισης
- συνταύτιση φάσης
- άθροισμα των απόλυτων διαφορών των τιμών γκίζου
- άθροισμα των απόλυτων διαφορών περιγραμμάτων
- διαφορές περιγραμμάτων ή επιφανειών

- μέτρα ανώτερου επιπέδου (συνταύτιση δομών, συνταύτιση δενδροειδών διαγραμμάτων κ.λπ.)

ανάλογα με την στρατηγική συνταύτισης:

- σειριακές αποφάσεις
- ύφεση (relaxation)
- δυναμικός προγραμματισμός
- γραμμικός προγραμματισμός
- γενικός μετασχηματισμός Hough
- ιεραρχικές τεχνικές
- δενδροειδείς δομές γραφημάτων.

2.6.5.2. Η ταξινόμηση των Scharstein και Szeliski

Η ενδιαφέρουσα εργασία των Scharstein and Szeliski (2001) προσπαθεί να ταξινομήσει και να συγκρίνει 34 διαφορετικούς αλγορίθμους πυκνής συνταύτισης (συνταύτιση σε κάθε εικονοστοιχείο των εικόνων) σε δύο εικόνες, με σκοπό την δημιουργία ΨΜΕ. Οι αλγόριθμοι που συγκρίνονται είναι γενικά πολύπλοκοι, αφού συνδυάζουν πολλά χαρακτηριστικά. Η ταξινόμησή γίνεται σύμφωνα με:

- το μέτρο ομοιότητας
- υπολογισμό και βελτιστοποίηση παράλλαξης x (τοπικά, γενικά, με δυναμικό προγραμματισμό, ανά επιπολική γραμμή, με χρήση τομών σε γράφημα, και υβριδικές)
- βελτιστοποίηση και φίλτρο για εντοπισμό και απόρριψη χονδροειδών σφαλμάτων

2.6.5.3. Η ταξινόμηση Oriot

Μία άλλη ταξινόμηση (Oriot et al., 1998) κατατάσσει τις μεθόδους αποκλειστικά και μόνο βάσει της οντότητας συνταύτισης, υπερπηδώντας τον κλασικό διαχωρισμό σε συνταύτιση χαρακτηριστικών ή συνταύτιση έντασης. Έτσι χρησιμοποιεί τις κατηγορίες:

1. Συνταύτιση τιμών γκρίζου
2. Συνταύτιση χαρακτηριστικών που χρησιμοποιείται ανεξάρτητα ή σε συνδυασμό με το προηγούμενο
3. Συνταύτιση πολυγώνων, που χρησιμοποιείται κυρίως σε εικόνες με χαμηλή υφή (ρομποτικές εφαρμογές σε εσωτερικούς χώρους – indoor robotics applications).

2.7. Επιφανειακή συνταύτιση

Στην επιφανειακή συταύτιση, στόχος είναι η εύρεση ομοιότητας ανάμεσα σε δύο σήματα δύο διαστάσεων (εικόνες). Οντότητα συνταύτισης είναι οι τιμές γκρίζου των εικονοστοιχείων. Για την εφαρμογή της επιλέγεται ένα παράθυρο στην μία εικόνα που χρησιμοποιείται ως πρότυπο και ανιχνεύεται στις υπόλοιπες. Οι δύο βασικές μέθοδοι είναι του συντελεστή συσχέτισης και της ελαχιστοτετραγωνικής συνταύτισης. Η τελευταία θεωρείται ως η ακριβέστερη γενικά μέθοδος συνταύτισης. Η ακρίβειά της κυμαίνεται από 1/10 για τυχαία σημεία αυτομάτως συσχετισθέντα (Schenk, 1999), 1/25 του εικονοστοιχείου (Gruen, 1996), 1/50 (Trinder et al., 1995) ή ακόμα και 1/50 με 1/100 (Zhizhuo, 1990, McGlone, 2004). Ο Trinder έχει κάνει εκτενή έρευνα (1992, 1995) σχετικά με την ακρίβεια της συνταύτισης έντασης σε προσημασμένους στόχους, συναρτήσει μεγέθους, αρχικών τιμών, στροφών, κλίμακας και βάθους χρώματος (quantisation 2, 8, 32 bit κλπ). Στη γενική περίπτωση η ακρίβεια εντοπισμού εξαρτάται από την πληροφορία του παραθύρου.

Τα μέτρα ομοιότητας των οποίων το ελάχιστο ή μέγιστο πρέπει να υπολογισθεί είναι διάφορα στατιστικά μεγέθη, όπως (Lang et al., 1995, Kostkova, 2002):

- άθροισμα γινομένων (mixed 2nd moments)

- άθροισμα γινομένων ανηγμένων στον μέσο όρο (covariance)
- άθροισμα των τετραγώνων των διαφορών (least squares, L_2-norm)
- άθροισμα των απόλυτων διαφορών (L_1-norm, LAD)
- κανονικοποιημένος συντελεστής συσχέτισης (cross correlation).

2.7.1. Ραδιομετρικές διαφορές εικόνων

Δύο εικόνες είναι αδύνατο πρακτικά να είναι ίδιες. Ακόμα και φωτογραφίες του ίδιου σταθερού και στερεού αντικειμένου, ακόμα εάν η λήψη έχει γίνει διαδοχικά από το ίδιο ακριβώς σημείο, θα είναι διαφορετικές, λόγω θορύβου (φιλμ και σάρωσης εάν χρησιμοποιείται αναλογική φωτογραφική μηχανή ή ηλεκτρονικού εάν χρησιμοποιείται ψηφιακή). Στην περίπτωση που οι φωτογραφίες έχουν διαφορετικό σημείο λήψης, όπως στην φωτογραμμετρία, τότε οι ραδιομετρικές διαφορές δύο εικόνων οφείλονται στα ακόλουθα:

1. θέση λήψης, οπότε το ομόλογο σημείο εμφανίζεται σε διαφορετική θέση εντός του πλαισίου της εικόνας
2. στροφές ω, φ και κ που δημιουργούν γεωμετρικές διαφορές
3. γεωμετρία του αντικειμένου (κλίσεις, βάθος)
4. διαφορετική κλίμακα ανάμεσα τις δύο φωτογραφίες
5. θόρυβο
6. αποκρύψεις

Είναι προφανές ότι χρησιμοποιείται συνήθως ένα τετράγωνο παράθυρο (5x5, 7x7 κλπ) γύρω από το εικονοστοιχείο ενδιαφέροντος ως οντότητα συνταύτισης.

Για την εξομάλυνση των ραδιομετρικών διαφορών, εφαρμόζονται διορθώσεις είτε πριν είτε κατά την διάρκεια της συνταύτισης. Στην περίπτωση που οι ραδιομετρικές διορθώσεις εφαρμόζονται πριν την συνταύτιση των εικόνων, μπορεί να είναι συνολικές (εφαρμογή σε όλη την εικόνα) ή τοπικές (χρησιμοποιώντας τοπικά κριτήρια). Οι περισσότερες διορθώσεις αφορούν την ισοστάθμιση ιστογράμματος (histogram equalization), τον γραμμικό μετασχηματισμό και την χρήση άνω και κάτω κατωφλίων για την επέκταση (stretching) του ιστογράμματος. Στην περίπτωση που η εξομάλυνση λαμβάνει χώρα ταυτόχρονα με την συνταύτιση, στο γεωμετρικό μοντέλο των έξι αγνώστων, προστίθενται δύο ακόμα ως γραμμικός μετασχηματισμός της κλίμακας των τιμών του γκρί.

Η προσθήκη δύο επιπλέον αγνώστων στην ελαχιστοτετραγωνική συνταύτιση μοιάζει η καταλληλότερη επιλογή επειδή προσαρμόζεται τοπικά και επαναληπτικά μαζί με τις γεωμετρικές παραμέτρους. Βασικό μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι για μικρά παράθυρα, οι δύο ραδιομετρικές παράμετροι μπορούν να επηρεάσουν πολύ έντονα το περιεχόμενο και να εξαναγκάσουν την σύγκλιση οδηγώντας σε λάθος αποτελέσματα, ειδικά σε περιοχές με χαμηλή πληροφορία και ομογενείς τόνους. Επίσης έχει δύο ευνόητα μειονεκτήματα: την επιβράδυνση της ταχύτητας και το γεγονός ότι δεν μπορεί να εφαρμοστεί αυτούσια στην περίπτωση του συντελεστή συσχέτισης. Αναλυτικά παρουσιάζεται στην παράγραφο 2.7.5. Γενικά προτείνεται η αντιμετώπιση των ραδιομετρικών διαφορών πριν την συνταύτιση των εικόνων (Baltsavias, 1991, Kraus, 1997).

Είναι πάντως ευρέως αποδεκτό ότι οι ραδιομετρικές διαφορές επηρεάζουν πάρα πολύ την συνταύτιση (Baltsavias, 1991, Trinder et al. 1995). Αναφέρεται συγκεκριμένα ότι είναι άσκοπο κανείς να προσπαθεί να βελτιώσει τον αλγόριθμο συνταύτισης εάν δεν έχει προηγουμένως εξαλείψει τις ραδιομετρικές διαφορές των δύο εικόνων.

Η συνταύτιση γκρίζων τόνων βασίζεται στο γεγονός ότι υπάρχει αρκετή πληροφορία στο παράθυρο ελέγχου, ώστε με διαδοχικές προσεγγίσεις να ταυτιστούν τα δύο παράθυρα. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει υφή στην εικόνα. Σε επίγειες λήψεις είναι συχνό το φαινόμενο να υπάρχουν μεγάλες περιοχές χωρίς υφή. Σε αυτές τις περιπτώσεις είναι δυνατόν να προβληθούν τυχαία ή διατεταγμένα πρότυπα ώστε να δημιουργηθεί τεχνητά η απαραίτητη υφή. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις όμως, όπως σε αεροφωτογραφίες, σε δορυφορικές εικόνες, σε εικόνες μικροσκοπίου, ακτινογραφίες κλπ, η ύπαρξη αρκετής υφής δεν είναι

εξασφαλισμένη, ούτε είναι δυνατόν να γίνει κάτι εκ των προτέρων.

Σε αυτές τις περιπτώσεις μπορεί να ενισχυθεί η αδύναμη υφή, ώστε να είναι εφικτή η συνταύτιση. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν η συνάρτηση μεταφοράς (transfer function) (Kraus, 1997) και το φίλτρο Wallis. Αμφότερες εξαναγκάζουν τοπικά τις τιμές των γκρίζων τόνων να προσεγγίσουν δεδομένες τιμές μέσου όρου και διασποράς, ενισχύοντας τοπικά τις διαφορές. Αν και δεν υπάρχουν πολλές αναφορές για τον συγκεκριμένο τρόπο ενίσχυσης εικόνων για συνταύτιση, συνήθως χρησιμοποιείται φίλτρο Wallis (Wallis 1976, Baltsavias 1991).

2.7.2. Βασικές παράμετροι της επιφανειακής συνταύτισης

Στη συνταύτιση γκρίζων τόνων υπάρχουν τα παρακάτω επιμέρους προβλήματα (Lang et al., 1995):

1. **μέτρο ομοιότητας (similarity measure).** Το μέτρο ομοιότητας εξαρτάται από την αβεβαιότητα των προς προσδιορισμό χαρακτηριστικών και το είδος τους. Σε κάθε περίπτωση όμως είναι μία συνάρτηση της οποίας το μέγιστο ή το ελάχιστο πρέπει να υπολογισθεί.
2. **τυποποίηση (regularization).** Ανεξάρτητα από το μέτρο ομοιότητας που επιλέγεται, γίνεται και κάποια απλοποίηση του φυσικού μοντέλου, που γενικευμένα ονομάζεται τυποποίηση. Είναι μία σειρά υποθέσεων απαραίτητων για την προσέγγιση ενός φυσικού φαινομένου με μαθηματικό μοντέλο.
3. **αλγοριθμική πολυπλοκότητα (algorithmic complexity).** Η εξέλιξη των υπολογιστών έδωσε την δυνατότητα για πολλές παραλλαγές των βασικών αλγορίθμων συνταύτισης. Κοινή τάση ήταν η δημιουργία ολοένα και πιο πολύπλοκων μεθόδων με σκοπό να λαμβάνουν υπόψη όσο γίνεται περισσότερα στοιχεία. Έτσι δημιουργήθηκαν μέθοδοι οι οποίες ουσιαστικά προσομοίαζαν την ανθρώπινη νόηση (multi point matching, συνδυασμός Area Based Matching (ABM) και Feature Based Matching (FBM)) (Ruther et al., 1996, Shao et al., 1998, Wolff et al., 2000, Thurgood et al., 2004, Zhu et al., 2005). Η επιλογή του κατάλληλου αλγορίθμου εξαρτάται και αντικατοπτρίζει την προϋπάρχουσα γνώση για το περιεχόμενο των εικόνων είτε γεωμετρικά (επιπολική γεωμετρία), είτε ραδιομετρικά (εύρεση εικονοσημάτων ή παρόμοιων εικονοσχηματισμών) και γενικά η υλοποίηση εξαρτάται άμεσα από την εφαρμογή (ad-hoc).
4. **αρχικές τιμές (approximate values).** Επειδή η συνταύτιση αποτελεί ένα πρόβλημα με πολλές λύσεις και πολλά τοπικά ελάχιστα, πρέπει να υπάρχει αρχική προσέγγιση της σωστής λύσης (Lang et al., 1995). Αυτό γίνεται είτε περιορίζοντας την περιοχή ελέγχου είτε με τεχνικές που προσδιορίζουν με σχετική ακρίβεια το αρχικό σημείο. Η πιο διαδεδομένες λύσεις είναι η επιπολική γεωμετρία, η χρήση πυραμίδων και η μέθοδος κατά Otto & Chau (1989).

Στην περίπτωση δημιουργίας ψηφιακού μοντέλου εδάφους, η γενικευμένη μεθοδολογία της ψηφιακής (αυτόματης) συνταύτισης είναι η εξής:

1. επιλογή μίας οντότητας συνταύτισης (πχ. σημείο) στην μία εικόνα
2. εύρεση της αντίστοιχης οντότητας στην άλλη (άλλες) εικόνες
3. υπολογισμός μέτρου ακρίβειας
4. υπολογισμός του ύψους της οντότητας στον τρισδιάστατο χώρο

Προσπαθώντας κανείς να υλοποιήσει την παραπάνω απλουστευμένη και γενικευμένη μεθοδολογία για την περίπτωση της συνταύτισης, αντιμετωπίζει μερικά ακόμη σημαντικά ερωτήματα στρατηγικής.

2.7.2.1. Η επιλογή σημείων

Η επιλογή της θέσης των σημείων καθώς και η πυκνότητά τους αποτελούν βασικά στοιχεία της στρατηγικής συνταύτισης. Πρωτότυπες εφαρμογές και πακέτα λογισμικού χρησιμοποιούν διαφορετικές μεθόδους (Baltsavias, 1991):

1. Σταθερή δειγματοληψία, όπου τα σημεία συνταύτισης επιλέγονται επάνω σε διατεταγμένο κάναβο

προσανατολισμένο είτε με το γεωδαιτικό (πραγματικό) σύστημα συντεταγμένων είτε με τα εικονοστοιχεία της εικόνας (Otto & Chau, 1989, Muller 1992).

2. Προοδευτική δειγματοληψία, που αποτελεί παραλλαγή της προηγούμενης. Σε αυτή την περίπτωση η δειγματοληψία πυκνώνει (συνήθως με συντελεστή 2) όταν το αντικείμενο αποκλίνει από το επίπεδο. Κριτήριο για την πύκνωση αποτελούν τα γειτονικά σημεία, γεγονός που υποδηλώνει την ύπαρξη επιπέδων ΨΜΕ με διαφορετικές πυκνότητες. Η λογική αυτή είναι εντελώς αντίστοιχη με εκείνη των πυραμίδων των εικόνων και συνήθως οι δύο αυτές μέθοδοι συνδυάζονται.
3. Συνδυαστική δειγματοληψία, που έχει δύο στάδια. Το πρώτο στάδιο είναι συνήθως σταθερή ή προοδευτική δειγματοληψία και το δεύτερο η εξαγωγή χαρακτηριστικών ακμών και σημείων.
4. Τυχαία σημεία, όπου η συνταύτιση γίνεται μόνο σε κατάλληλα σημεία, δηλαδή σημεία με πληροφορία, που εξάγονται από κάποιο τελεστή σημείων (Krzystek, 1998).

Όλες οι εφαρμογές χρησιμοποιούν μία από τις προαναφερθείσες μεθόδους με κάποιες παραλλαγές ή κάποιο συνδυασμό τους. Οι τρεις πρώτες έχουν το πλεονέκτημα της κάλυψης όλου του μοντέλου με σταθερή ή "κατάλληλη" πυκνότητα, ενώ η τέταρτη επιλέγει τα σημεία με κριτήριο την περιεχόμενη πληροφορία. Έτσι πλεονεκτεί στο είδος των σημείων, με τις θετικές συνέπειες που αυτό έχει στον εντοπισμό ομόλογου και στην ακρίβειά του. Συνήθως οι μέθοδοι που χρησιμοποιούν τυχαία διάταξη σημείων χρησιμοποιούν σε τελικό στάδιο διατεταγμένα σημεία των οποίων τα ύψη υπολογίζονται με παρεμβολή στα αρχικά (Krzystek, 1998). Εφαρμογές που δεν κάνουν παρεμβολή αλλά επιστρέφουν τα τυχαία σημεία αυτούσια παρουσιάζουν κενά και ανισομερή κατανομή.

Οι παράγοντες που χαρακτηρίζουν τα απορριπτέα σημεία είναι:

1. ο λόγος σήμα προς θόρυβο (SNR), όπου οι μικρές τιμές θα πρέπει να αποφεύγονται
2. τα επαναληπτικά πρότυπα που παρουσιάζουν πολλά τοπικά ελάχιστα
3. οι περιοχές με έλλειψη πληροφορίας σε μία εκ των δύο εικόνων
4. συλλογή σημείων επί γραμμών αλλαγής κλίσης, όπου δεν ισχύει η παραδοχή του αφινικού μετασχηματισμού.

2.7.2.2. Μέγεθος και σχήμα παραθύρου

Επειδή το παράθυρο που χρησιμοποιείται ως οντότητα συνταύτισης δεν είναι σημειακό αλλά καλύπτει μια επιφάνεια επί του αντικειμένου, η "εικόνα" αυτής της επιφάνειας στις δύο εικόνες δεν μπορεί να είναι ακριβώς η ίδια, για τους προαναφερθέντες λόγους. Στην περίπτωση που το αντικείμενο είναι επίπεδο, τότε η γεωμετρική του σχέση με την εικόνα είναι ένας προβολικός μετασχηματισμός. Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται ένα σημείο και η γειτονιά του, τότε μπορεί να θεωρηθεί με σχετική ασφάλεια ότι η επιφάνεια αυτή είναι πολύ μικρή σε σχέση με όλη την εικόνα και κατά συνέπεια η δέσμη ακτίνων που περιγράφουν αυτή την μικρή επιφάνεια είναι πολύ στενή και οι ακτίνες μπορούν να θεωρηθούν παράλληλες. Έτσι ο προβολικός μετασχηματισμός των 8 παραμέτρων μπορεί να αντικατασταθεί από έναν αφινικό 6 παραμέτρων. Οι Mustaffar & Mitchell (2001) υποθέτουν ότι η επιφάνεια που εικονίζεται στο παράθυρο συνταύτισης δεν μπορεί να μοντελοποιηθεί από αφινικό μετασχηματισμό (και λόγω έντονων στροφών στην επίγεια φωτογραμμετρία) οπότε χρησιμοποιούν επιφάνειες παραγώγων πρώτου και δευτέρου βαθμού για την προσέγγισή της.

Στην ελαχιστοτετραγωνική συνταύτιση χρησιμοποιείται ευρύτατα ο αφινικός μετασχηματισμός, με την παραδοχή ότι τα παράθυρα πρέπει να είναι μικρά. Το γεγονός αυτό έρχεται σε αντίθεση με την αναγκαία περίσσεια μετρήσεων που χρειάζεται για να είναι ισχυρή η ελαχιστοτετραγωνική λύση και να έχει ακρίβεια. Μεγαλύτερο μέγεθος αυξάνει την μοναδικότητα και κατά συνέπεια βελτιώνει την πιθανότητα εντοπισμού, από την άλλη όμως δημιουργεί γεωμετρικά προβλήματα που δεν αντιμετωπίζονται από τον αφινικό μετασχηματισμό. Έτσι το μέγεθος του παραθύρου αποτελεί μία από τις κρισιμότερες παραμέτρους της συνταύτισης. Θα πρέπει δε να επιλέγεται με βάση το σήμα (πληροφορία) που περιέχει το κάθε παράθυρο ξεχωριστά και όχι ενιαίο για ολόκληρο το μοντέλο.

Στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν αναφορές σε μεθόδους αυτόματης προσαρμογής μεγέθους

παραθύρου συνταύτισης, χωρίς όμως κάποια από αυτές να έχει γίνει ευρέως αποδεκτή (Rosenholm, 1987c, Kanade, 1994, Veksler, 2003). Εμπορικά λογισμικά έχουν σχετική επιλογή αυτόματης προσαρμογής μεγέθους, αλλά δεν υπάρχει ανάλογη ανακοίνωση που να περιγράφει αναλυτικά τον αλγόριθμο.

Το σχήμα του παραθύρου που χρησιμοποιείται αποκλειστικά είναι το τετράγωνο, προφανώς για λόγους ταχύτητας και εύκολης εφαρμογής στις εικόνες, που αποθηκεύονται με την μορφή πίνακα. Επίσης στην συντριπτική πλειοψηφία χρησιμοποιείται ως βασικό σημείο το κεντρικό σημείο του τετραγώνου, πλην λίγων περιπτώσεων όπου εφαρμόζονται μεταθετά παράθυρα (Geiger et al., 1995, Bobick et al., 1999, Okutomi et al., 2001). Στην πραγματικότητα όμως δεν υπάρχει κανένας περιορισμός σχετικά με το σχήμα του παραθύρου ή τη θέση του σημείου συνταύτισης μέσα σε αυτό, ακόμα και εάν ανήκει ή όχι στο σχήμα. Έτσι το σχήμα μπορεί να είναι κύκλος, έλλειψη, δακτύλιος (το σημείο συνταύτισης δεν ανήκει στα συγκρινόμενα εικονοστοιχεία), αστέρι ή ορθογώνιο κ.λπ. (Mitchell et al., 2000). Επίσης οι ίδιοι παρουσιάζουν μία μέθοδο για χρήση παραμετρικών μοντέλων επιφανείας και μάλιστα προτείνουν και δυναμική προσαρμογή στην επιλογή γεωμετρικού μοντέλου (αντί του αφινικού), ανάλογα με την τοπική μορφή της επιφάνειας συνδυάζοντας και τα δύο σε ενιαία λύση.

2.7.2.3. Θέση του παραθύρου διερεύνησης

Οι αρχικές τιμές αποτελούν ακόμα μία βασική παράμετρο της συνταύτισης γκρίζων τόνων. Κατά συνέπεια ο τρόπος προσδιορισμού τους είναι σημαντικό στοιχείο ενός αλγορίθμου συνταύτισης. Η στρατηγική για την εύρεση της προσέγγισης (αρχικών τιμών) και η ακρίβειά της καθορίζει τα όρια της περιοχής αναζήτησης. Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται συντελεστής συσχέτισης και επιπολική γεωμετρία, συνήθως ορίζεται και ένα όριο για την παράλλαξη x, που ουσιαστικά ερμηνεύει το μέγεθος των αναμενόμενων υψομετρικών διαφορών στην περιοχή. Επίσης χρησιμοποιείται και ένα μικρότερο όριο για την αναμενόμενη παράλλαξη y, που υπό κανονικές συνθήκες αναμένεται μηδενική. Έτσι ορίζεται ένα παραλληλόγραμμο αναζήτησης, με την μεγάλη του πλευρά παράλληλη στην επιπολική γραμμή.

Στην περίπτωση της ελαχιστοτετραγωνικής συνταύτισης, η απόσταση από την επιπολική γραμμή συμπεριλαμβάνεται ως άγνωστος στα ελάχιστα τετράγωνα και κατά συνέπεια δεσμεύει την λύση. Σε αυτή την περίπτωση δεν υπάρχει αυστηρά καθορισμένη περιοχή ελέγχου, αλλά εξακολουθεί να υπάρχει η αναγκαιότητα για πολύ καλές προσεγγίσεις.

2.7.2.4. Κριτήρια αποδοχής

Τα κριτήρια αποδοχής αφορούν το μέτρο ομοιότητας που έχει επιλεγεί και στις περισσότερες εφαρμογές αποτελούνται από ένα κατώφλι. Ιδεατά, τα κριτήρια αποδοχής θα έπρεπε να εξαρτώνται από την περιεχόμενη πληροφορία στο παράθυρο. Στην απλή περίπτωση του συντελεστή συσχέτισης, η εφαρμογή ενός κατωφλιού αποτελεί ουσιαστικά ένα συμβιβασμό όμοιο με τις στατιστικές υποθέσεις H1 και H0, δηλαδή πόσα σωστά σημεία θα απορριφθούν και πόσα λανθασμένα θα θεωρηθούν σωστά. Στην περίπτωση της ελαχιστοτετραγωνικής συνταύτισης, ορίζονται κατώφλια για όλους τους αγνώστους καθώς και για τον μέγιστο αριθμό επαναλήψεων. Σε ορισμένες περιπτώσεις είναι δυνατόν να μπουν κατώφλια μόνο στις δύο παραμέτρους θέσης και όχι στις παραμέτρους σχήματος και στροφών, ή και σε οποιονδήποτε συνδυασμό των παραπάνω. Για να γίνει αυτό χρειάζεται πληροφορία σχετικά με τους τοπικούς γεωμετρικούς σχηματισμούς (σχ. 2.9) (Baltsavias, 1991).

Είναι φανερό ότι η επιλογή κατωφλιών για όλες τις παραπάνω παραμέτρους προϋποθέτει εμπειρία από μέρους του ερευνητή ή του χρήστη σε περίπτωση που αναφερόμαστε σε εμπορικό πακέτο. Η τελευταία περίπτωση αφορά ένα από τα βασικά προβλήματα χρήσης λογισμικού αυτόματης συλλογής ΨΜΕ, αφού οι χρήστες στην γενική περίπτωση δεν είναι σε θέση να καθορίσουν σωστά τις παραμέτρους (Baltsavias, 1999). Οποιοσδήποτε αυτοματισμός προς αυτή την κατεύθυνση διευκολύνει πολύ την εφαρμογή αυτόματης συνταύτισης σε μεγάλες μελέτες. Η προσέγγιση του Borlin (2002) παρουσιάζει ενδιαφέρον, γιατί χρησιμοποιεί διαφορετικά κριτήρια για τον τερματισμό των επαναλήψεων, τροποποιώντας την μέθοδο Gauss-Newton σε γραμμικό έλεγχο βασιζόμενος σε γωνίες πολύ-διανυσματικού χώρου.

2.7.3. Συντελεστής συσχέτισης

Ο κανονικοποιημένος[1] συντελεστής συσχέτισης ρ ορίζεται ως:

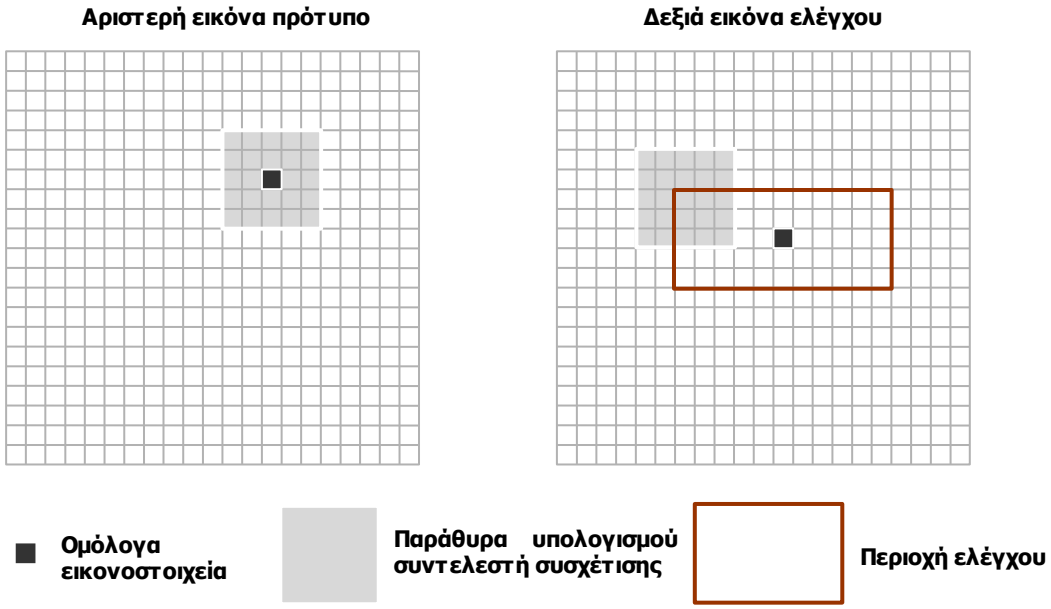
$$\rho = \frac{\sum_{r=1}^{R}\sum_{c=1}^{C}\left(g_1(r,c)-m_1\right)\left(g_2(r,c)-m_2\right)}{\sqrt{\sum_{r=1}^{R}\sum_{c=1}^{C}\left(g_1(r,c)-m_1\right)^2\sum_{r=1}^{R}\sum_{c=1}^{C}\left(g_2(r,c)-m_2\right)^2}} \tag{2.4}$$

όπου

R, C το πλήθος των γραμμών και στηλών του παραθύρου συνταύτισης
m_1, m_2, οι μέσοι όροι του τόνου των δύο παραθύρων σε αριστερή και δεξιά εικόνα αντίστοιχα
$g_1(r,c)$ οι τόνοι έντασης στην αριστερή εικόνα
$g_2(r,c)$ οι τόνοι έντασης στην δεξιά εικόνα

Οι τιμές που παίρνει ο συντελεστής συσχέτισης είναι στο διάστημα [-1,1], με 1 όταν τα δύο παράθυρα είναι ίδια και -1 όταν είναι ακριβώς αντίθετα, δηλαδή πρόκειται για την σχέση μεταξύ θετικού και αρνητικού.

Για την εφαρμογή του συντελεστή συσχέτισης επιλέγεται από την εικόνα αναφοράς[2] ένα παράθυρο γύρω από το εικονοστοιχείο του οποίου το ομόλογο αναζητείται. Στην εικόνα αναζήτησης[3] επιλέγεται μία περιοχή αναζήτησης και για κάθε εικονοστοιχείο αυτής της περιοχής υπολογίζεται ο συντελεστής συσχέτισης μεταξύ του παραθύρου αναφοράς και ενός ίσου παραθύρου γύρω από το τρέχον εικονοστοιχείο αναζήτησης (σχ. 2.7).



Σχήμα 2.7. Εφαρμογή συντελεστή συσχέτισης. Είναι φανερό ότι πρέπει να υπάρχει αρχική πληροφορία σχετικά με τη θέση και το μέγεθος της περιοχής αναζήτησης ώστε να περιορίζεται και να μην γίνεται έλεγχος σε όλη την δεξιά εικόνα.

Το κεντρικό εικονοστοιχείο του παραθύρου που παρουσιάζει τον μεγαλύτερο συντελεστή συσχέτισης με το πρότυπο και έχει τιμή μεγαλύτερη από το κατώφλι που έχει ορίσει ο χρήστης είναι το ομόλογο. Τα κατώφλια που χρησιμοποιούνται ποικίλλουν ανάλογα με τις εικόνες. Σε αεροφωτογραφίες χρησιμοποιούνται κατώφλια 0.65 (Joinville, et al., 2004), ενώ σε δορυφορικές εικόνες έως και 0.9 (Fraser, et al., 2004). Η επιλογή κατωφλιού είναι προφανώς βασικό κριτήριο για την μέθοδο αυτή. Ο Kraus (1997) αναφέρει ότι

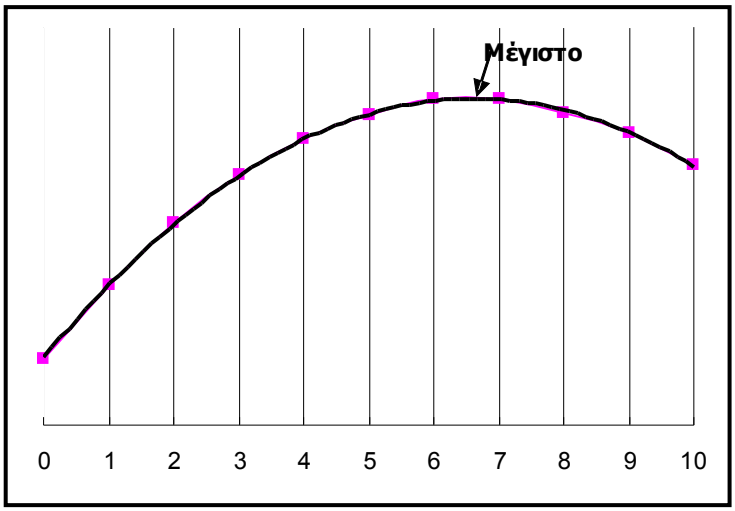
1 Ο απλός συντελεστής συνταύτισης προϋποθέτει ότι οι δύο εικόνες έχουν ίδιες τιμές φωτεινότητας και αντίθεσης σε όλα τα ομόλογα σημεία. Ο κανονικοποιημένος χρησιμοποιείται για να εξομαλύνει αυτές τις διαφορές.

2 Για ευκολία, αριστερή από δω και στο εξής

3 Για ευκολία δεξιά από δω και στο εξής

για τυχαία σημεία το κατώφλι θα πρέπει να είναι κάτω από 0.7 (σελ. 182).

Με αυτό τον τρόπο όμως μόνο ακέραιες τιμές μπορούν να επιστραφούν, παρόλο που σπάνια το ομόλογο σημείο συμπίπτει ακριβώς με το κέντρο του εικονοστοιχείου. Η μέθοδος μπορεί να αποκτήσει καλύτερη ακρίβεια εάν στις τιμές του συντελεστή συσχέτισης προσαρμοστεί μια μαθηματική επιφάνεια (ή καμπύλη στην περίπτωση που η συνταύτιση λαμβάνει χώρα πάνω στην επιπολική γραμμή). Συνήθως χρησιμοποιείται παραβολική καμπύλη (Guelch, 1988). Το μέγιστό της καμπύλης/επιφάνειας αυτής, που υπολογίζεται μαθηματικά θα είναι μία μη άρτια τιμή εικονοστοιχείου κατά τους άξονες x και y (σχ. 2.8).



Σχήμα 2.8. Μέθοδος υπολογισμού ομόλογου σημείου με ακρίβεια καλύτερη από ένα εικονοστοιχείο, πάνω σε επιπολική γραμμή, με προσαρμογή καμπύλης.

Συνήθως ο συντελεστής συσχέτισης δεν χρησιμοποιείται για ακρίβεια καλύτερη από ένα εικονοστοιχείο, γιατί αυτό απαιτεί την εκ των υστέρων χρήση ελαχίστων τετραγώνων ή κάποια άλλης μορφής παρεμβολή, που αποδυναμώνει το βασικό του πλεονέκτημα που είναι η ταχύτητα.

2.7.4. Βασικό μοντέλο ελαχιστοτετραγωνικής συνταύτισης με έξι παραμέτρους

Το μαθηματικό μοντέλο της ελαχιστοτετραγωνικής συνταύτισης περιγράφεται εκτενώς στην βιβλιογραφία (Gruen, 1985 και 1996, Baltsavias, 1991), αλλά για λόγους πληρότητας θα αναφερθεί και εδώ με την απλούστερή μορφή του, που είναι με δύο εικόνες και έξι παραμέτρους.

Έτσι, κατά τον Gruen (1996), δύο τμήματα από διαφορετικές εικόνες περιγράφονται από τις διακριτές συναρτήσεις f(η,ξ) και g(x,y). Έστω ότι η f(η,ξ) αναφέρεται στην αριστερή (πρότυπο) και η g(x,y) στην δεξιά εικόνα (ελέγχου). Συνταύτιση επιτυγχάνεται ιδανικά εάν ισχύει:

$$f(\eta,\xi) = g(x,y).$$

Επειδή όμως υπάρχει θόρυβος στις εικόνες (ηλεκτρονικός και ραδιομετρικός), και γεωμετρικές παραμορφώσεις λόγω αναγλύφου και διαφορετικής γωνίας λήψης, η πραγματικότητα διαφέρει και ισχύει:

$$f(\eta,\xi) - e(\eta,\xi) = g(x,y) \qquad (2.5)$$

όπου

e(η,ξ) είναι ο αληθής πίνακας θορύβου.

Ο ακριβής προσδιορισμός της θέσης της συνάρτησης g(x,y) είναι το ζητούμενο για τον προσδιορισμό του ομόλογου σημείου. Για να επιτευχθεί αυτό θα πρέπει να υπολογισθεί το ελάχιστον μιας συνάρτησης που υπολογίζει την απόσταση ανάμεσα στα δύο παράθυρα, το πρότυπο και το παράθυρο στην εικόνα ελέγχου.

Η βασική εξίσωση (2.5) αποτελεί τη μη γραμμική εξίσωση που εκφράζει την σχέση των παρατηρήσεων f(η,ξ) με την συνάρτηση g(x,y) της οποίας η θέση είναι το ζητούμενο. Η θέση περιγράφεται από τις άγνωστες παραμέτρους μετάθεσης Δx, Δy, που υπολογίζονται με αφετηρία την αρχική θέση της $g(x^0, y^0)$

που αποτελεί και την αρχική προσέγγιση (στο εξής $\overset{o}{g}(x,y)$, χάριν συντομογραφίας)

Επειδή η συνάρτηση g(x,y) δεν είναι συνεχής, αλλά διακριτή και με δεδομένο ότι οι γεωμετρικές παραμορφώσεις όπως περιγράφονται από το μαθηματικό μοντέλο δεν επιστρέφουν ακέραιες τιμές κανάβου στην δεξιά εικόνα, απαιτείται επαναδειγματοληψία.

Το γεωμετρικό μοντέλο που χρησιμοποιείται στην γενική μορφή μπορεί να είναι ένα οποιοδήποτε πολυώνυμο της μορφής:

$$x' = \mathbf{t_y^T}\overline{\mathbf{A}}\mathbf{t_x} \;,\; y' = \mathbf{t_y^T}\overline{\mathbf{B}}\mathbf{t_x} \;,$$

με

$$\mathbf{t_x^T} = \{1 \quad x \quad x^2 \quad \dots \quad x^{m-1}\} \tag{2.6}$$

$$\mathbf{t_y^T} = \{1 \quad y \quad y^2 \quad \dots \quad y^{m-1}\} \tag{2.7}$$

$$\overline{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1m} \\ \dots & & & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mm} \end{bmatrix} \tag{2.8}$$

$$\overline{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1m} \\ \dots & & & \dots \\ b_{m1} & b_{m2} & \dots & b_{mm} \end{bmatrix} \tag{2.9}$$

Οι άγνωστοι είναι οι τιμές $a_{11},\dots, a_{mm}$ και $b_{11},\dots, b_{mm}$. Το πρόβλημα δεν είναι γραμμικό, οπότε πρέπει να γραμμικοποιηθεί προκειμένου να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων. Έτσι έχουμε:

$$f(\eta,\xi) - e(\eta,\xi) = \overset{o}{g}(x,y) + \frac{\partial \overset{o}{g}(x,y)}{\partial x}dx + \frac{\partial \overset{o}{g}(x,y)}{\partial y}dy \tag{2.10}$$

όπου $dx = \frac{\partial x}{\partial p_i}dp_i$,

$dy = \frac{\partial y}{\partial p_i}dp_i$, με p_i τον i-οστό όρο των (2.8) και (2.9)

Για λόγους που έχουν αναφερθεί, οι πίνακες **A** και **B** έχουν την μορφή:

$$\overline{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & 0 \end{bmatrix},$$

$$\overline{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & 0 \end{bmatrix},$$

που αντιστοιχούν στον αφινικό μετασχηματισμό που γράφεται ως:

$$\begin{aligned} x' &= a_{11} + a_{12}x + a_{21}y \,, \\ y' &= b_{11} + b_{12}x + b_{21}y \end{aligned} \tag{2.11}$$

Ο διαφορισμός των (2.11) δίνει:

$dx = da_{11} + \overset{o}{x}\, da_{12} + \overset{o}{y}\, da_{21}$,

$dy = db_{11} + \overset{o}{x}\, db_{12} + \overset{o}{y}\, db_{21}$

Θέτοντας $g_x = \frac{\partial \overset{o}{g}(x,y)}{\partial x}$, $g_y = \frac{\partial \overset{o}{g}(x,y)}{\partial y}$, προκύπτει

$$f(\eta,\xi)-e(\eta,\xi) = \overset{o}{g}(x,y) + g_{x'}(da_{11}+xda_{12}+yda_{21})+g_{y'}(db_{11}+xdb_{12}+ydb_{21}) => \quad (2.12)$$

$$f(\eta,\xi)- \overset{o}{g}(x,y) - e(\eta,\xi)= g_{x'}da_{11}+g_{x'}xda_{12}+g_{x'}yda_{21}+g_{y'}db_{11}+g_{y'}xdb_{12}+g_{y'}ydb_{21} \quad (2.13)$$

Η εξίσωση (2.13) είναι η εξίσωση παρατήρησης, και ισχύει για κάθε εικονοστοιχείο εντός του παραθύρου συνταύτισης. Το σύστημα των παρατηρήσεων σε μορφή πινάκων είναι

$$\mathbf{A}x = \mathbf{l} - v \quad (2.14)$$

Με στατιστικές προσδοκίες E(v)=0 και $\mathbf{E}(vv^T) = \sigma_o^2\mathbf{P}^{-1}$. Η λύση του συστήματος δίνεται από τις:

$$\hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{A}^T\mathbf{PA})^{-1}\mathbf{A}^T\mathbf{Pdl} \quad (2.15)$$

$$\hat{\sigma}_o^2 = \frac{1}{r}\mathbf{v}^T\mathbf{Pv} \quad (2.16)$$

$$v = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{dl} \quad (2.17)$$

με r τον βαθμό ελευθερίας του συστήματος. Επειδή οι μετρήσεις θεωρούνται ισοβαρείς ο πίνακας **P** είναι ο μοναδιαίος. Εξαιρέσεις είναι οι περιπτώσεις που χρησιμοποιούνται "εύρωστοι εκτιμητές" (robust estimators) ή σε περιπτώσεις όπου οι παρατηρήσεις αποκτούν βάρος αντιστρόφως ανάλογο της απόστασης μέσω κάποιας ειδικής συνάρτησης.

Σε περίπτωση γραμμικοποίησης η 2.14 γίνεται

$$\mathbf{A\,dx} = \mathbf{dl}-\mathbf{v} \quad (2.18)$$

με πίνακες τους

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} g_{x'_1} & g_{x'_1}x'_1 & g_{x'_1}y'_1 & g_{y'_1} & g_{y'_1}x'_1 & g_{y'_1}y'_1 \\ g_{x'_2} & g_{x'_2}x'_2 & g_{x'_2}y'_2 & g_{y'_2} & g_{y'_2}x'_2 & g_{y'_2}y'_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ g_{x'_n} & g_{x'_n}x'_n & g_{x'_n}y'_n & g_{y'_n} & g_{y'_n}x'_n & g_{y'_n}y'_n \end{bmatrix}, \ \mathbf{dx} = \begin{bmatrix} da_{11} \\ da_{12} \\ da_{21} \\ db_{11} \\ db_{12} \\ db_{21} \end{bmatrix}, \ \mathbf{dl} = \begin{bmatrix} f(\eta_1,\xi_1) - \overset{o}{g}(x'_1, y'_1) \\ f(\eta_2,\xi_2) - \overset{o}{g}(x'_2, y'_2) \\ \dots \\ f(\eta_n,\xi_n) - \overset{o}{g}(x'_n, y'_n) \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

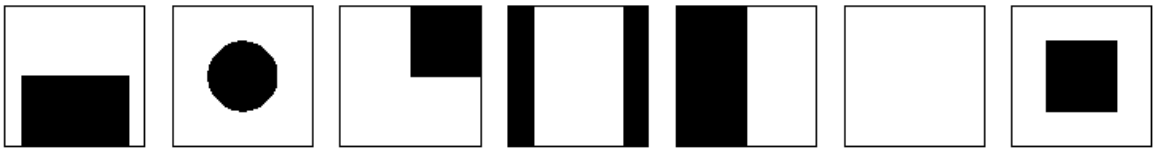
όπου n το πλήθος των εικονοστοιχείων (μετρήσεων) εντός του παραθύρου συνταύτισης mxm.

Συνήθως γίνεται μετάθεση και η αρχή του συστήματος αναφοράς τοποθετείται στο κέντρο του κάθε παραθύρου, ορίζοντας ένα τοπικό σύστημα αναφοράς στο οποίο και γίνονται όλοι οι επιμέρους υπολογισμοί. Έτσι οι τιμές $x_{1,\dots,n}$, $y_{1,\dots,n}$ παίρνουν τιμές στο διάστημα $\left[-\frac{m-1}{2}, \frac{m-1}{2}\right]$. Οι αρχικές τιμές αγνώστων είναι $\mathbf{x}^T = [0 \ \ 1 \ \ 0 \ \ 0 \ \ 0 \ \ 1]$. Οι τιμές $\overset{o}{g}(x',y')$ αφορούν το αριστερό παράθυρο μετά την επαναδειγματοληψία με τις τρέχουσες τιμές αγνώστων.

Οι επαναλήψεις τερματίζουν ανεπιτυχώς εφόσον υπερβούν το ανώτατο όριο επαναλήψεων που έχει θέσει ο χρήστης είτε επιτυχώς εφόσον οι διορθώσεις όλων των παραμέτρων πέσουν κάτω από προκαθορισμένα κατώφλια $|da_{11}| < c_1$, $|da_{12}| < c2$, $|da_{21}| < c_3$, $|db_{11}| < c_4$, $|db_{12}| < c_5$, $|db_{21}| < c_6$. Ο Kraus (1997) αναφέρει ότι κατώφλια από 0.1 έως 0.3 εικονοστοιχεία μπορεί να θεωρηθεί ρεαλιστική για μη προσημασμένα σημεία. Οι τιμές αυτές αφορούν μόνο τις δύο παραμέτρους μετάθεσης, αλλά όχι και τις υπόλοιπες τέσσερις στην περίπτωση αφινικού μετασχηματισμού.

Θα πρέπει να σημειωθεί σε αυτό το σημείο ότι η σύγκλιση του συστήματος είναι ταχύτατη εφόσον υπάρχει αρκετό σήμα, καλές αρχικές τιμές και δεν παρουσιάζονται τοπικά ελάχιστα. Στην δυσμενέστερη περίπτωση που δεν υπάρχει ικανοποιητικός λόγος σήματος προς θόρυβο (SNR) η σύγκλιση είναι απλώς αργή. Υπάρχουν όμως περιπτώσεις όπου η λύση παρουσιάζει διαρκή διολίσθηση (πχ. πάνω σε ακμή) ή συγκλίνει σε κάποιο λανθασμένο σημείο (πχ. επαναλαμβανόμενα πρότυπα). Οι περιπτώσεις αυτές χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής και ειδικών λύσεων. Στην περίπτωση που δεν υπάρχει αρκετή πληροφορία για καλή συνταύτιση, η τυπική απόκλιση ενός ή και των δύο παραμέτρων μετάθεσης παρουσιάζεται αυξημένη, χωρίς να μπορεί και αυτό να αποτελέσει ακριβές κριτήριο για την απόρριψη κάποιου σημείου. Ειδικά η περίπτωση των επαναλαμβανόμενων προτύπων και της σύγκλισης σε λάθος σημείο δεν μπορεί να αντιμετωπισθεί από τα συνήθη μέτρα (ποσοτικοποίησης) και ελέγχου των ελαχίστων τετραγώνων, παρά μόνο με εξωτερικά κριτήρια, όπως η επιπολική γεωμετρία.

Η πληθώρα αγνώστων ενέχει τον κίνδυνο υπερπαραμετροποίησης του προβλήματος. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι υπάρχουν περιπτώσεις όπου είναι αδύνατος ο προσδιορισμός όλων των παραμέτρων (σχ. 2.9). Σε αυτές τις περιπτώσεις θα πρέπει οι άγνωστοι να μειώνονται κατάλληλα και να αφαιρούνται οι μη προσδιορίσιμες παράμετροι ώστε να μην οδηγούν την επίλυση σε υπέρβαση των επαναλήψεων και κατά συνέπεια αδύνατη επίλυση (Gruen, 1996). Συνήθως αυτές οι περιπτώσεις οδηγούν σε αριθμητική αστάθεια (numeric instability).



α β γ δ ε ζ Η

Σχήμα 2.9. (Gruen, 1996) Περιπτώσεις απροσδιοριστίας παραμέτρων. α. κλίμακα y, β. στροφή, γ. δύο κλίμακες, δ. όλα κατά τη διεύθυνση y, ε. όλα κατά την διεύθυνση y και η κλίμακα κατά x, ζ. όλες, η. καμία (όλες προσδιοριστέες).

Η αβεβαιότητα των αγνώστων δίνεται από τον πίνακα μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας

$$\mathbf{V}_{xx} = \hat{\sigma}_o^2 \mathbf{Q}_{xx} = \hat{\sigma}_o^2 (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \tag{2.20}$$

όπου ιδιαίτερη σημασία έχουν οι τιμές $\sigma_x = \hat{\sigma}_o \sqrt{\mathbf{Q}_{xx(1,1)}}$ και $\sigma_y = \hat{\sigma}_o \sqrt{\mathbf{Q}_{xx(4,4)}}$, που αναφέρονται στην ακρίβεια προσδιορισμού της θέσης του ομόλογου σημείου. Ο πίνακας μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας των παρατηρήσεων υπολογίζεται από την σχέση

$$\mathbf{V}_{ll} = \hat{\sigma}_o^2 \mathbf{A} \mathbf{Q}_{xx} \mathbf{A}^T = \hat{\sigma}_o^2 \mathbf{A} (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \tag{2.21}$$

Ακόμα όμως και με αυτούς τους πίνακες παρουσιάζονται συχνά προβλήματα. Η εσωτερική αξιοπιστία (μέτρο ελαχίστων τετραγώνων) είναι συνήθως πολύ μεγάλη, λόγω της πληθώρας παρατηρήσεων και της ομοιογένειάς τους.

Ορισμένα προβλήματα που αντιμετωπίζονται στην υλοποίηση (αριθμητική εφαρμογή) της μεθόδου αφορούν τον υπολογισμό των παραγώγων της εικόνας g_x, gy, τον υπολογισμό του και g(x,y) τον υπολογισμό του πίνακα **A**. Συνήθως $g_x = g_{(r,c)} - g_{(r,c-1)}$ ή $g_x = \dfrac{g_{(r,c+1)} - g_{(r,c-1)}}{2}$

όπου r και c η γραμμή και στήλη του εικονοστοιχείου (r,c),

$g_{(r,c)}$ ή ένταση του γκρι

και αντίστοιχα για τη y διεύθυνση $g_y = g_{(r,c)} - g_{(r-1,c)}$ ή $g_y = \dfrac{g_{(r+1,c)} - g_{(r-1,c)}}{2}$.

Ο υπολογισμός του g(x',y') για κάθε επανάληψη γίνεται με επαναδειγματοληψία (διγραμμική μέθοδο). Ο πίνακας **A** σε ορισμένες υλοποιήσεις δεν υπολογίζεται σε κάθε επανάληψη, αλλά μία φορά μόνο, αρχικά.

2.7.5. Με γνωστό προσανατολισμό (επιπολική γεωμετρία)

Η χρήση επιπολικής γεωμετρίας ουσιαστικά δεσμεύει την κίνηση του παραθύρου αναζήτησης επί της επιπολικής γραμμής, καθιστώντας έτσι την αναζήτηση μονοδιάστατη. Η πλήρης περιγραφή του μοντέλου όπως αυτό εφαρμόζεται με χρήση ελαχίστων τετραγώνων περιγράφεται από τον Baltsavias (1991) και Gruen (1996). Εδώ παρατίθεται μια συνοπτική περιγραφή της μεθόδου.

Ορίζοντας,

$\mathbf{x}_p = \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ -c \end{bmatrix}$, εικονοσυντεταγμένες του σημείου p επί της φωτογραφίας και c η σταθερά της μηχανής

R, πίνακας στροφής

$\mathbf{X}_p = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_p$, γεωδαιτικές συντεταγμένες του σημείου p

$\mathbf{X}_o = \begin{bmatrix} X_o \\ Y_o \\ Z_o \end{bmatrix}$, γεωδαιτικές συντεταγμένες του κέντρου προβολής της φωτογραφίας

λ_p, σημειακή κλίμακα στο σημείο p

Η συνθήκη της συγγραμμικότητας,

$$\mathbf{x_p} = \frac{1}{\lambda_p}\mathbf{R}^{\mathbf{T}}(\mathbf{X_p} - \mathbf{X_o}) \tag{2.22}$$

αναλύεται σε δύο εξισώσεις, τις:

$$x_p = -c\frac{\mathbf{r_1^T}(\mathbf{X}_p - \mathbf{X}_o)}{\mathbf{r_3^T}(\mathbf{X}_p - \mathbf{X}_o)} \hat{=} -F^x \tag{2.23}$$

$$y_p = -c\frac{\mathbf{r_2^T}(\mathbf{X}_p - \mathbf{X}_o)}{\mathbf{r_3^T}(\mathbf{X}_p - \mathbf{X}_o)} \hat{=} -F^y \tag{2.24}$$

Επίσης ισχύει

$$x_p = \overset{o}{x}_p + \Delta x_p \tag{2.25}$$

$$y_p = \overset{o}{y}_p + \Delta y_p \tag{2.26}$$

με τα Δx_p και Δy_p να αντιστοιχούν στα a11 και b11 των (2.11). Οι 2.23, 2.24 σε συνδυασμό με τις 2.25, 2.26 δίνουν

$$\Delta x_p + F^x + \overset{o}{x}_p = 0 \tag{2.27}$$

$$\Delta y_p + F^y + \overset{o}{y}_p = 0 \tag{2.28}$$

που αποτελούν τις βασικές εξισώσεις για οποιαδήποτε εφαρμογή της ελαχιστοτετραγωνικής συνταύτισης της έντασης των εικόνων με τις γεωδαιτικές συντεταγμένες (δέσμευση X,Y για εύρεση υψών σε προκαθορισμένο κάναβο, δέσμευση υψομέτρου Z για δημιουργία ισοϋψών, συνταύτιση πολλαπλών σημείων κλπ.)

Η γραμμικοποίηση των 2.27 και 2.28 δίνει (παραλείποντας τον δείκτη p)

$$\Delta x + \frac{\partial F^x}{\partial X}dX + \frac{\partial F^x}{\partial Y}dY + \frac{\partial F^x}{\partial Z}dZ + F^{x(o)} + \overset{o}{x}_p = 0 \tag{2.29}$$

$$\Delta y + \frac{\partial F^y}{\partial X}dX + \frac{\partial F^y}{\partial Y}dY + \frac{\partial F^y}{\partial Z}dZ + F^{y(o)} + \overset{o}{y}_p = 0 \tag{2.30}$$

Εφόσον το αριστερό παράθυρο δεν αλλάζει θέση ισχύει $\Delta x_o = \Delta y_o = 0$ και $-F^{x(o)} = \overset{o}{x}_p$, $-F^{y(o)} = \overset{o}{y}_p$ (από 2.27 και 2.28), οπότε για την αριστερή εικόνα οι 2.29 και 2.22 γίνονται

$$\frac{\partial F^x}{\partial X}dX + \frac{\partial F^x}{\partial Y}dY + \frac{\partial F^x}{\partial Z}dZ = 0 \tag{2.31}$$

$$\frac{\partial F^y}{\partial X}dX + \frac{\partial F^y}{\partial Y}dY + \frac{\partial F^y}{\partial Z}dZ = 0 \tag{2.32}$$

Αντικαθιστώντας με

$F_X^x = \frac{\partial F^x}{\partial X}$, $F_Y^x = \frac{\partial F^x}{\partial Y}$, $F_Z^x = \frac{\partial F^x}{\partial Z}$, $F_X^y = \frac{\partial F^y}{\partial X}$, $F_Y^y = \frac{\partial F^y}{\partial Y}$, $F_Z^y = \frac{\partial F^y}{\partial Z}$ στις 2.31 και 2.30, και επιλύνοντας το σύστημά τους ως προς dX και dY, παίρνουμε

$$dX = \frac{F^y_{Z_o} F^x_{Y_o} - F^x_{Z_o} F^y_{Y_o}}{F^x_{X_o} F^y_{Y_o} - F^y_{X_o} F^x_{Y_o}} dZ = CXdZ \tag{2.33}$$

$$dY = \frac{F^y_{X_o} F^x_{Z_o} - F^x_{X_o} F^y_{Z_o}}{F^x_{X_o} F^y_{Y_o} - F^y_{X_o} F^x_{Y_o}} dZ = CYdZ \tag{2.34}$$

Με αυτό τον τρόπο εκφράζονται οι dX και dY συναρτήσει ενός αγνώστου, του dZ, γεγονός το οποίο δείχνει ότι οι διορθώσεις κατά x και y στην εικόνα ελέγχου δεν είναι ανεξάρτητες, αλλά δεσμεύονται να κινούνται κατά μήκος της επιπολικής γραμμής.

Αντικαθιστώντας τις 2.29 και 2.22, για την δεξιά εικόνα έχουμε:

$$\Delta x_2 = (-CXF^x_{X_2} - CYF^x_{Y_2} - F^x_{Z_2})dZ = Cx_2 dZ \tag{2.35}$$

$$\Delta y_2 = (-CXF^y_{X_2} - CYF^y_{Y_2} - F^y_{Z_2})dZ = Cy_2 dZ \tag{2.36}$$

όπου αντικαθιστώντας το dZ από την στην 2.18, έχουμε:

$$\Delta x_2 - \frac{Cx_2}{Cy_2}\Delta y_2 = 0 \tag{2.37}$$

η οποία αποτελεί την εξίσωση της επιπολικής γραμμής στην δεξιά φωτογραφία και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δέσμευση στην επίλυση των ελαχίστων τετραγώνων. Έτσι οι εξισώσεις 2.19 γίνονται

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} g_{x'_1} & g_{x'_1}x'_1 & g_{x'_1}y'_1 & g_{y'_1} & g_{y'_1}x'_1 & g_{y'_1}y'_1 \\ g_{x'_2} & g_{x'_2}x'_2 & g_{x'_2}y'_2 & g_{y'_2} & g_{y'_2}x'_2 & g_{y'_2}x'_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ g_{x'_n} & g_{x'_n}x'_n & g_{x'_n}y'_n & g_{y'_n} & g_{y'_n}x'_n & g_{y'_n}x'_n \\ 1 & 0 & 0 & -\frac{Cx}{Cy} & 0 & 0 \end{bmatrix}, \ \mathbf{dx} = \begin{bmatrix} da_{11} \\ da_{12} \\ da_{21} \\ db_{11} \\ db_{12} \\ db_{21} \end{bmatrix}, \ \mathbf{l} = \begin{bmatrix} f(\eta_1,\xi_1) - \overset{o}{g}(x'_1, y'_1) \\ f(\eta_2,\xi_2) - \overset{o}{g}(x'_2, y'_2) \\ \dots \\ f(\eta_n,\xi_n) - \overset{o}{g}(x'_n, y'_n) \\ 0 - da_{11} + \frac{Cx}{Cy} db_{11} \end{bmatrix} \tag{2.38}$$

Η υλοποίηση της μεθόδου σε μερικές εφαρμογές γίνεται με την ταυτόχρονη επίλυση της φωτογραμμετρικής εμπροσθοτομίας. Σε αυτή την περίπτωση η επίλυση επιστρέφει τις τελικές συντεταγμένες του σημείου στο σύστημα των φωτοσταθερών.

Βασικά πλεονεκτήματα της χρήσης επιπολικής γεωμετρίας είναι:

- ο περιορισμός της περιοχής ελέγχου,
- μείωση του πλήθους των επαναλήψεων,
- βελτίωση της ακρίβειας και της αξιοπιστίας,
- ταυτόχρονη λύση και υπολογισμός συντεταγμένων του σημείου στο χώρο,
- δυνατότητα χρήσης περισσότερων της μίας εικόνας.

2.7.6. Μοντέλο με οκτώ παραμέτρους

Από τις ευρύτατα διαδεδομένες παραλλαγές του παραπάνω βασικού μοντέλου είναι εκείνη που χρησιμοποιεί οκτώ αγνώστους (Gruen, 1996). Έξι γεωμετρικούς και δύο ραδιομετρικούς. Οι δύο ραδιομετρικές παράμετροι αφορούν μια γραμμική σχέση για την διόρθωση των ραδιομετρικών τιμών στις δύο εικόνες.

$$gr_l = r_t * gr_r + r_s \tag{2.39}$$

όπου

gr_l και gr_r οι τιμές της έντασης του γκρίζου τόνου στην αριστερή και δεξιά εικόνα
r_t συντελεστής (αντίθεση)
r_s ο σταθερός όρος (φωτεινότητα).

Η (2.5) γίνεται:

$$f(\eta,\xi) - e(\eta,\xi) = r_t * g(x,y) + r_s \tag{2.40}$$

Έτσι οι (2.12) και (2.13) γίνονται:

$$f(\eta,\xi)-e(\eta,\xi)=\overset{o}{g}(x',y')+g_{x'}da_{11}+g_{x'}\,x\,da_{12}+g_{x'}\,y\,da_{21}+g_{y'}db_{11}+g_{y'}\,x\,db_{12}+g_{y'}\,y\,db_{21}+dr_s+\overset{o}{g}(x',y')dr_t \qquad (2.41)$$

Σε αυτή την περίπτωση οι (2.19) τροποποιούνται ως εξής:

$$\mathbf{A}=\begin{bmatrix} g_{x'_1} & g_{x'_1}x'_1 & g_{x'_1}y'_1 & g_{y'_1} & g_{y'_1}x'_1 & g_{y'_1}y'_1 & 1 & gr_1 \\ g_{x'_2} & g_{x'_2}x'_2 & g_{x'_2}y'_2 & g_{y'_2} & g_{y'_2}x'_2 & g_{y'_2}y'_2 & 1 & gr_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ g_{x'_n} & g_{x'_n}x'_n & g_{x'_n}y'_n & g_{y'_n} & g_{y'_n}x'_n & g_{y'_n}y'_n & 1 & gr_n \end{bmatrix},\ \mathbf{dx}=\begin{bmatrix} da_{11} \\ da_{12} \\ da_{21} \\ db_{11} \\ db_{12} \\ db_{21} \\ dsh \\ dsc \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{dl}=\begin{bmatrix} f(\eta_1,\xi_1)-\left(sc*g(x'_1,y'_1)+sh\right) \\ f(\eta_2,\xi_2)-\left(sc*g(x'_2,y'_2)+sh\right) \\ \dots \\ f(\eta_n,\xi_n)-\left(sc*g(x'_n,y'_n)+sh\right) \end{bmatrix} \qquad (2.42)$$

όπου $g'r_i$ i=1,2,…,n οι τιμές έντασης στο δεξί παράθυρο όπως προκύπτουν σε κάθε βήμα μετά την επαναδειγματοληψία

Οι αρχικές τιμές των r_t και r_s είναι φυσικά 1 και 0 γιατί δεν αναμένεται να έχουν σημαντικές ραδιομετρικές διαφορές μεταξύ τους οι δύο εικόνες. Σημαντικές αποκλίσεις από τις ανωτέρω τιμές ενέχουν την περίπτωση λανθασμένης συνταύτισης, εκτός εάν το φαινόμενο είναι συνολικό για όλη την εικόνα, οπότε ουσιαστικά φανερώνει συνολική διαφορά ανάμεσα στις δύο εικόνες.

2.7.7. Ελαχιστοτετραγωνική συνταύτιση με δύο αγνώστους

Στην ειδική περίπτωση που χρειάζεται μόνο ο υπολογισμός των δύο μεταθέσεων οι **A, dx, l** της (2.19) γίνονται:

$$\mathbf{A}=\begin{bmatrix} g_{x'_1} & g_{y'_1} \\ g_{x'_2} & g_{y'_2} \\ \dots & \dots \\ g_{x'_n} & g_{y'_n} \end{bmatrix},\ \mathbf{dx}=\begin{bmatrix} da_{11} \\ db_{11} \end{bmatrix},\ \mathbf{dl}=\begin{bmatrix} f(\eta_1,\xi_1)-g(x'_1,y'_1) \\ f(\eta_2,\xi_2)-g(x'_2,y'_2) \\ \dots \\ f(\eta_n,\xi_n)-g(x'_n,y'_n) \end{bmatrix} \qquad (2.43)$$

και η λύση δίνεται από την απλή εξίσωση:

$$\begin{bmatrix} da_{11} \\ db_{11} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} \sum g_{x'}^2 & \sum g_{x'}g_{y'} \\ \sum g_{x'}g_{y'} & \sum g_{y'}^2 \end{bmatrix}^{-1}\begin{bmatrix} f(\eta_1,\xi_1)-g(x'_1,y'_1) \\ f(\eta_2,\xi_2)-g(x'_2,y'_2) \\ \dots \\ f(\eta_n,\xi_n)-g(x'_n,y'_n) \end{bmatrix} \qquad (2.44)$$

2.7.8. Αξιολόγηση των δύο βασικών μεθόδων επιφανειακής συνταύτισης

Σύγκριση των δύο αλγορίθμων με τεχνητά δεδομένα έκανε ο Trinder et al. (1992). Στην εργασία του παρουσιάζει συγκριτικά αποτελέσματα για την συμπεριφορά τους σε προσημασμένους στόχους, ενώ ελέγχει και την συμπεριφορά τους σχετικά με σχήμα και μέγεθος παραθύρου, ποιότητα εικόνας, θόρυβο, μέγεθος εικονοστοιχείου, βάθος χρώματος, θέση κλίμακα και στροφή του στόχου.

Τα βασικά πλεονεκτήματα της ελαχιστοτετραγωνικής συνταύτισης που οδήγησαν στην ευρύτατη αποδοχή της είναι τα εξής:

- Υψηλή ακρίβεια (1/10 έως 1/100 του εικονοστοιχείου)
- Πληθώρα μέτρων για την παρακολούθηση της ποιότητας, δυνατότητα ανίχνευσης σφαλμάτων (data snooping) και ανάλυση κατά Baarda
- Ταυτόχρονη επίλυση για γεωμετρικούς και ραδιομετρικούς αγνώστους
- Δυνατότητα εφαρμογής σε συνδυασμό με συνταύτιση χαρακτηριστικών, που έχει οδηγήσει στους καλύτερους μέχρι σήμερα αλγορίθμους συνταύτισης εικόνων
- Δυνατότητα ταυτόχρονης επίλυσης με πρόσθετες παραμέτρους (πολλαπλές εικόνες, επιπολική γεωμετρία), με ακρίβεια καλύτερη από χειριστές (περίπου 1/3 του εικονοστοιχείου), αλλά και δυνατότητα παράκαμψης περιοχών με έλλειψη πληροφορίας
- Δυνατότητα επίλυσης με χρήση μόνο των εικονοστοιχείων εκείνων που εμπεριέχουν πληροφορία (αποκλεισμός από την λύση εκείνων των εικονοστοιχείων που είναι σε περιοχή με χαμηλή πληροφορία – Calitz et al., 1996)

Τα προφανή μειονεκτήματα του συντελεστή συσχέτισης είναι ότι δεν μπορεί να εφαρμοστεί όταν υπάρχουν σημαντικές στροφές (>30°) και διαφορά σχήματος δηλαδή οι δύο εικόνες διαφέρουν σημαντικά. Διαφορές κλίμακας 20% και παραπάνω επηρεάζουν σημαντικά την ακρίβεια προσδιορισμού θέσης (Kraus, 1997). Η θαμπάδα (blur) των εικόνων, λίγο επηρεάζει την ακρίβεια (Trinder, et al., 1992). Επίσης εξ ορισμού δεν έχει ακρίβεια καλύτερη ενός εικονοστοιχείου και μόνον με εφαρμογή πολυωνύμων στις τιμές μπορεί να πετύχει καλύτερη ακρίβεια. Απαιτεί εφαρμογή σε όλα τα πιθανά σημεία και πρόβλεψη της περιοχής ελέγχου τόσο σε μέγεθος όσο και σε σχήμα.

Το μειονέκτημά ελέγχου όλων των εικονοστοιχείων στην περιοχή αναζήτησης γίνεται πλεονέκτημα αφού έτσι δεν ο αλγόριθμος είναι τόσο ευαίσθητος στις αρχικές τιμές όσο η ελαχιστοτετραγωνική συνταύτιση. Ταυτόχρονα είναι απλός στην εφαρμογή του και γρήγορος, γι' αυτό χρησιμοποιείται ευρύτατα ακόμα και σε εφαρμογές μηχανικής όρασης. Οι διαφορές σε ακρίβεια των δύο μεθόδων μεγιστοποιούνται όσο οι γεωμετρικές παραμορφώσεις αυξάνονται (Trinder et al., 1992). Στην επιφανειακή συνταύτιση η βασική παραδοχή είναι ότι όλα τα εικονοστοιχεία εντός του παραθύρου έχουν την ίδια παράλλαξη (Scharstein, et al., 2001) γεγονός το οποίο δεν ισχύει γενικά. Γι' αυτό και η χρήση μεγάλων παραθύρων οδηγεί σε εξομάλυνση του ΨΜΕ. Υπάρχουν όμως εργασίες που αντιμετωπίζουν το συγκεκριμένο πρόβλημα με διάφορες μεθόδους, κυριότερες των οποίων είναι η αυτόματη μεταβολή του μεγέθους ή του σχήματος του παραθύρου, ή με επιλογή ορισμένων εικονοστοιχείων εντός του δεδομένου παραθύρου κ.λπ. (Geiger et al., 1995, και Fusiello, et al., 1997, Veksler, 2001, Agrawal, et al. 2003, Kanade και Okutomi 1994).

2.7.9. Χαρακτηριστικά της ελαχιστοτετρα-γωνικής συνταύτισης

Τα κυριότερα προβλήματα στη ψηφιακή συνταύτιση εντοπίζονται στις περιοχές έλλειψης πληροφορίας, στις μεγάλες διαφορές παράλλαξης και στην υφή εικόνων που παρουσιάζουν επαναληπτικά σχήματα (Apaphant, Bethel, 2000) ή ομοιόμορφες τιμές γκρίζου.

Προβλήματα της ελαχιστοτετραγωνικής συνταύτισης είναι:

- μεγάλη ευαισθησία στις αρχικές τιμές, και κατά συνέπεια πιθανότητα πολλαπλών λύσεων στην γειτονιά και πιθανή σύγκλιση σε λάθος σημείο σε περίπτωση επαναλαμβανόμενων προτύπων
- παραδοχή ότι όλα τα εικονοστοιχεία εντός του παραθύρου έχουν την ίδια παράλλαξη (ή αδυναμία μοντελοποίησης από το γεωμετρικό μοντέλο του μετασχηματισμού που χρησιμοποιείται)
- περιοχές που είναι ορατές μόνο σε μία εκ των δύο εικόνων και κατά συνέπεια καθιστούν αδύνατη την συνταύτιση
- χαμηλός λόγος σήματος προς θόρυβο που μπορεί να οδηγήσει σε αργή σύγκλιση ή σε σύγκλιση σε τοπικό και όχι ολικό ελάχιστο.

Από την άλλη βέβαια, υπάρχουν και ουσιαστικά πλεονεκτήματα στην χρήση της ελαχιστοτετραγωνικής συνταύτισης (Lang et al., 1995):

- σε προσημασμένους στόχους η ακρίβεια μπορεί να φτάσει το 0.04 του εικονοστοιχείου (Gruen, 1996).
- παραμένει η πιο ακριβής και αξιόπιστη μέθοδος συνταύτισης τυχαίων σημείων επί επιφανείας σε περιοχές με αρκετή υφή (Mustaffar & Mitcell, 2001).

- δυνατότητα χρήσης οποιαδήποτε μοντέλου γεωμετρικής παραμόρφωσης ανάμεσα στα δύο παράθυρα.
- δυνατότητα χρήσης ραδιομετρικής διόρθωσης ενιαία στην επίλυση.
- δυνατότητα χρήσης οποιασδήποτε πρόσθετης πληροφορίας που μπορεί να εκφραστεί μαθηματικά.
- ισχυρό και καλά τεκμηριωμένο μαθηματικό υπόβαθρο
- δυνατότητα χρήσης πολλαπλών εικόνων και κατά συνέπεια καλύτερη ακρίβεια και αξιοπιστία (Ackerman, 1996)
- δυνατότητα υπολογισμού μέτρων αξιολόγησης ακριβείας.

Θα πρέπει να τονισθεί ότι υπάρχει πολύ μεγαλύτερη κινητικότητα στο αντικείμενο της ψηφιακής συνταύτισης από πλευράς μηχανικής όρασης και οι μέθοδοι που ανακοινώνονται χρησιμοποιούν συνδυασμό συνταύτισης χαρακτηριστικών και επιφανειακή συνταύτιση. Η συνάρτηση κόστους ή ενέργειας που χρησιμοποιείται ευρέως στην μηχανική όραση μορφοποιείται από κάθε ερευνητή διαφορετικά και σύμφωνα με την εφαρμογή. Αυτό μπορεί να αποτελεί πλεονέκτημα σε ορισμένες περιπτώσεις, αλλά τα αποτελέσματα δεν μπορούν να γενικευθούν.

Έχει ήδη αναφερθεί ότι οι καλές αρχικές προσεγγίσεις είναι απαραίτητες και έχουν μικρές ανοχές. Στις αεροφωτογραφίες οι στροφές είναι γνωστές και αναμενόμενες από τον εξωτερικό προσανατολισμό, και η διαφορά κλίμακας δεν είναι γενικά μεγαλύτερη από 25% σε διαδοχικές λήψεις. Η ακρίβεια προσέγγισης των αρχικών τιμών εξαρτάται κυρίως από το περιεχόμενο της εικόνας. Εάν στην εικόνα υπάρχουν απεικονίσεις με υψηλή συχνότητα εμφάνισης, τότε είναι απαραίτητες αρχικές τιμές πολύ κοντά στην αληθή, ενώ εάν υπάρχουν απεικονίσεις με χαμηλή συχνότητα εμφάνισης, τότε οι αρχικές τιμές μπορούν να μην είναι τόσο ακριβείς. Στην περίπτωση των υψηλών συχνοτήτων ένας τρόπος αντιμετώπισης του φαινομένου είναι η χρήση ενός χαμηλοπερατού φίλτρου για την εξομάλυνση των ακμών, με συνέπεια όμως την μείωση της ακρίβειας της συνταύτισης και την δημιουργία εν τέλει μίας ομαλής επιφάνειας.

2.8. Το πρόβλημα αρχικών τιμών και η αντιμετώπισή του

Η ελαχιστοτετραγωνική συνταύτιση, όπως και κάθε περίπτωση βελτιστοποίησης σε μη γραμμικά προβλήματα με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, απαιτεί αρχικές τιμές. Στην συγκεκριμένη περίπτωση θεωρείται ότι οι αρχικές τιμές πρέπει να είναι καλύτερες από 3 εικονοστοιχεία (Trinder et al., 1995) ή 1/10 του μεγέθους του παραθύρου (Krzystek, 1998) ή και καλύτερες από 2 εικονοστοιχεία (McGlone, 2004). Το πρόβλημα των αρχικών τιμών είναι κρίσιμο, γιατί μπορεί πολύ εύκολα η όλη μέθοδος να καταλήξει σε αστοχία εξαιτίας τους.

Ορισμένα παραδείγματα έδειξαν ότι σε περίπτωση απομακρυσμένων αρχικών τιμών, μπορεί οι πρώτες επαναλήψεις να γίνουν με 3 μόνο παραμέτρους αντί 6 (δύο για μετάθεση και μία στροφή) και το πλήρες σετ αγνώστων να χρησιμοποιηθεί για τις 2-3 τελευταίες επαναλήψεις (Gruen, 1996). Στο ίδιο κείμενο αναφέρεται ότι από αποτελέσματα σε 25 προσημασμένους κυκλικούς στόχους διαμέτρου 7 εικονοστοιχείων επί της εικόνας, με αρχικές τιμές 6 και 12 εικονοστοιχεία μακριά από την αληθή τιμή, τα ποσοστά επιτυχίας ήταν 100% και 68% αντίστοιχα. Σε αμφότερες τις περιπτώσεις χρησιμοποιείται επιπολική γεωμετρία.

Η συνταύτιση χαρακτηριστικών που είναι λιγότερο ευαίσθητη σε ραδιομετρικές διαφορές, αφού χρησιμοποιεί συμβολικές περιγραφές, έχει μεγαλύτερη αξιοπιστία και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αρχικές τιμές. Οι συμβολικές περιγραφές χρησιμοποιούν παραμέτρους για να περιγράψουν τα χαρακτηριστικά που ανιχνεύονται τους σχετικούς τελεστές. Με αυτόν τον τρόπο είναι πιο εύκολος ο συσχετισμός τους, αφού δεν χρησιμοποιούνται μόνο οι τιμές γκρίζου, αλλά και άλλα στοιχεία όπως διεύθυνση, ένταση, πρότυπα κλπ. Οι περισσότερες συνδυαστικές εφαρμογές συνταύτισης χαρακτηριστικών και γκρίζων τόνων λειτουργούν με αυτό τον τρόπο. Οι πιο χαρακτηριστικές περιπτώσεις αυτού του συνδυασμού είναι των Apaphant et al. (2000) και Krzystek (1998).

2.8.1. Η χρήση των πυραμίδων εικόνας

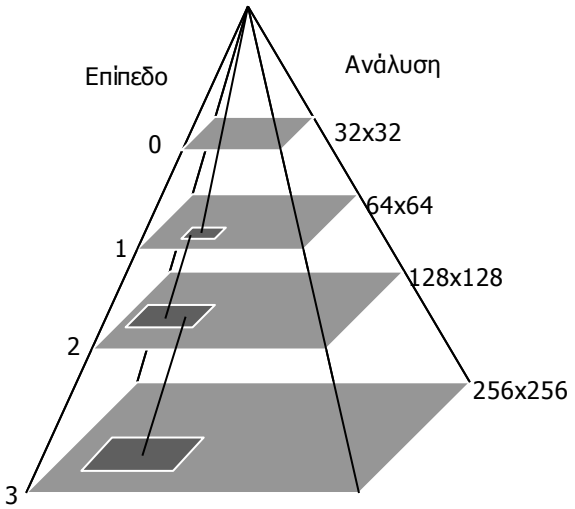
Η πιο διαδεδομένη μέθοδος για την αντιμετώπιση του προβλήματος των αρχικών τιμών είναι η χρήση ιεραρχικής δομής (Hobrough 1978, Hattori et al. 1986, O'Gorman & Anderson 1987, Rosenfeld 1984, Schenk, 1999, Atkinson, 1996, Krzystek, 1998), που στη διεθνή βιβλιογραφία συναντώνται και με τον όρο "πυραμίδες εικόνας" (σχ. 2.10). Πρόκειται για χρήση πολλαπλών αναλύσεων τις ίδιας εικόνας, όπου το

κάθε επίπεδο δημιουργείται από επαναδειγματοληψία του αμέσως κατώτερου. Η διαδικασία επιλογής και μεταφοράς ενός σημείου από το ανώτερο επίπεδο (χαμηλή ανάλυση) προς τα χαμηλότερα (υψηλή ανάλυση) περιγράφεται ως εξής:

α) ε = 0 (επίπεδο)
β) Συνταύτιση στο επίπεδο ε των δύο σημείων στις δυο εικόνες
γ) Μεταφορά στο επόμενο επίπεδο ε=ε+1
δ) Επιλογή και από τις δύο εικόνες επιπέδου ε, εκείνου μόνο του τμήματος που αντιστοιχεί στο εικονοστοιχείο της παραπάνω εικόνας
ε) επανάληψη από το β) εκτός εάν το τρέχον ε είναι το χαμηλότερο επίπεδο.

Είναι προφανές ότι με αυτό τον τρόπο η αναζήτηση για ομόλογο σημείο περιορίζεται σε εκείνο το τμήμα του τρέχοντος επιπέδου που αντιστοιχεί στο εικονοστοιχείο του προηγούμενου επιπέδου.

Σε αυτή την διαδικασία συνηθίζεται η συνταύτιση στα ανώτερα επίπεδα να γίνεται με συντελεστή συσχέτισης (correlation) και μόνο στο τελευταίο με την υψηλή ανάλυση να χρησιμοποιείται ελαχιστοτετραγωνική συνταύτιση, για λόγους ταχύτητας (Krzystek, 1998).



Σχήμα 2.10. Πυραμίδες εικόνας και μεταφορά σημείου από πάνω προς τα κάτω.

2.8.2. Η μέθοδος των Otto-Chau για δορυφορικές εικόνες.

Οι Otto and Chau (1989) παρουσίασαν μία μέθοδο εύρεσης αρχικών τιμών για τον αλγόριθμο ελαχιστοτετραγωνικής συνταύτισης για εφαρμογή σε εικόνες SPOT. Βασικές παραδοχές που διέπουν την εφαρμογή τους ήταν:

1. Η περιοχή είναι γενικά συνεχής και απότομες αλλαγές κλίσης είναι σπάνια φαινόμενα.
2. Υπάρχουν περιοχές που δεν είναι δυνατή η εξαγωγή πληροφορίας επειδή καλύπτονται από σύννεφα ή έχουν ομοιόμορφους τόνους και η στερεοσκοπική παρατήρηση (και κατά επέκταση υψομετρική μέτρηση) δεν είναι δυνατή, όπως λίμνες, θάλασσα, κλπ.
3. Τα ζεύγη εικόνων έχουν κατά κανόνα ληφθεί σε διαφορετικές εποχές με αποτέλεσμα οι ραδιομετρικές διαφορές να είναι μεγάλες.
4. Τα χαρακτηριστικά που εικονίζονται είναι εν γένει μικρά και τα μεγάλα χαρακτηριστικά είναι σπάνια, γεγονός που σημαίνει ότι σε μικρά παράθυρα υπάρχει αρκετή πληροφορία.
5. Οι γεωμετρικές διαφορές μεταξύ των εικόνων είναι σημαντικές λόγω μεγάλης γωνίας λήψης
6. Οι παραλλάξεις μπορεί να είναι πολύ μεγάλες
7. Ακριβή στοιχεία για τον προσανατολισμό της κάμερας δεν υπάρχουν
8. Επιπολική γεωμετρία δεν μπορεί να εφαρμοστεί λόγω του γραμμικού αισθητήρα που έχει ο SPOT, και μόνο επαναληπτικές διαδικασίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν.

Ο αλγόριθμος είναι πολύ απλός: ξεκινάει από μερικά ζεύγη ομόλογων σημείων που είναι δεδομένα (άρα χρειάζεται κάποια αρχικά σημεία ή σημεία εκκίνησης – seed points) τα οποία και ταξινομεί σε σειρά αναμονής (queue) όπου το καλύτερο είναι πρώτο. Στην συνέχεια συσχετίζει ελαχιστοτετραγωνικά το πρώτο και εφόσον αυτό συγκλίνει υπολογίζει πιθανά ομόλογα σημεία στη γειτονιά τα οποία και τοποθετεί

στην σειρά αναμονής. Τα γειτονικά σημεία τοποθετούνται σε απόσταση ίση με το ζητούμενο βήμα κανάβου, συνήθως στις τέσσερις κύριες διευθύνσεις Η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου δεν υπάρχουν άλλα πιθανά ομόλογα.

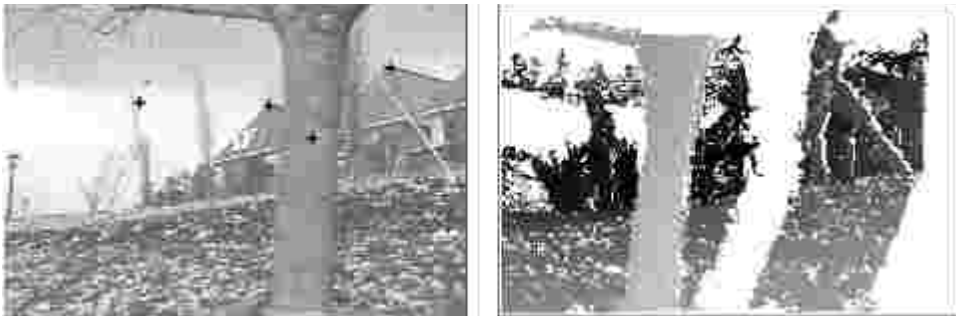
Η ελαχιστοτετραγωνική συνταύτιση αποτυγχάνει λόγω αδύνατης ή λανθασμένης σύγκλισης. Η δεύτερη περίπτωση είναι πιο επικίνδυνη, αφού είναι πιθανό αυτό το σημείο να χρησιμοποιηθεί για λάθος προσεγγίσεις και το σφάλμα να διαδοθεί περαιτέρω. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται χρησιμοποιώντας αυστηρά κριτήρια αποδοχής ενώ η "εξάπλωση" γίνεται επιλέγοντας τα σημεία με καλύτερα εσωτερικά μέτρα αξιοπιστίας. Σαν εσωτερικό μέτρο αξιοπιστίας αναφέρει τη μέγιστη ιδιοτιμή (eigenvalue) του πίνακα μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας επί των δυο αξόνων x και y, το οποίο από εμπειρικές παρατηρήσεις βρέθηκε ότι στις σωστές συσχετίσεις είναι πάντα μικρότερο από κάποιο κατώφλι.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο αλγόριθμος βασίζεται σε μερικά ζευγάρια ομόλογων σημείων που έχουν συλλεχθεί χειρωνακτικά με σχετικά χαμηλή ακρίβεια. Ανάλογα με την περίπτωση μπορεί να είναι ακόμα και ένα μόνο σημείο, αλλά για βεβαιότητα επιλέγονται 3-4 σημεία. Αυτά τα σημεία χρησιμοποιούνται ως σημεία αναφοράς και εν συνεχεία χρησιμοποιείται τελεστής Moravec για εύρεση πολλών χαρακτηριστικών σημείων και στις δύο εικόνες, εκ των οποίων μόνο τα πλέον ασφαλή χρησιμοποιούνται για πύκνωση των αρχικών αυτών σημείων.

Με την αντιμετώπιση του μειονεκτήματος των αρχικών ομόλογων σημείων ασχολείται η εργασία του Zemerly et al. (1992). Προκειμενου να εντοπισθούν τέτοια αρχικά σημεία αυτόματα διαιρεί αμφότερες τις εικόνες σε μικρά επιμέρους τμήματα και εφαρμόζει τον τελεστή Förstner για να βρει ορισμένα σημεία εντός του κάθε τμήματος. Στην συνέχεια χρησιμοποιείται επιπολική γεωμετρία με ανοχή ±3 εικονοστοιχείων από την επιπολική γραμμή για να περιοριστούν τα πιθανά ζεύγη. Η παράλλαξη x περιορίζεται από το μέγιστο και ελάχιστο αναμενόμενο ύψος επί του μοντέλου. Από τα πιθανά ομόλογα σημεία που περνούν τα δύο αυτά όρια x και y παράλλαξης, εφαρμόζεται συνταύτιση έντασης και το καλύτερο σημείο επιλέγεται ως ομόλογο.

Η μέθοδος έχει αρκετά καλά αποτελέσματα και επιτυγχάνει πλήρη κάλυψη των στερεομοντέλων, ενώ ταυτόχρονα αποφεύγει ύποπτες περιοχές (με μεγάλη μάλιστα ασφάλεια), με αποτέλεσμα ο χρήστης να γνωρίζει τις περιοχές με προβλήματα και να επεμβαίνει με συμπληρωματική συλλογή σημείων. Επίσης δεν βασίζεται στην υπόθεση του 60% επικάλυψης και οι αρχικές χειρωνακτικές τιμές δίνουν πληροφορία για την κάλυψη και την στροφή ανάμεσα στις δύο εικόνες, παρέχοντας αρχική πληροφορία και για την στροφή κ μεταξύ των εικόνων και κατά συνέπεια για τις αρχικές τιμές του αφινικού.

Μια παραλλαγή του αλγορίθμου των Otto-Chau παρουσιάστηκε από τους Lhuillier και Quan (2000). Η συνταύτιση ξεκινάει από τα αρχικά σημεία με την περισσότερη υφή γύρω από αυτά. Η προτεραιότητα αυτή τηρείται συνεχώς ακόμα και ανάμεσα στα νέα πιθανά ζεύγη, ενώ ταυτόχρονα χρησιμοποιεί και γεωμετρικές δεσμεύσεις (επιπολική γεωμετρία) εκφρασμένες όμως προβολικά (fundamental matrix). Σύμφωνα με τους συγγραφείς η μέθοδος αυτή αντιμετωπίζει επιτυχώς μεγάλες μεταβολές βάθους (σχ. 2.11).



Σχήμα 2.11. (Lhuillier και Quan 2000). Αποτελέσματα του αλγορίθμου με τέσσερα αρχικά χειρωνακτικά ομόλογα σημεία. Απαραίτητη η χρήση ενός τουλάχιστον σημείου επί του κορμού του δέντρου που αποτελεί ανεξάρτητη επιφάνεια.

2.9. Ειδικές υλοποιήσεις και παραλλαγές συνταύτισης

Σε αυτό το εδάφιο θα αναφερθούν κάποιες υλοποιήσεις της συνταύτισης εικόνων ώστε να γίνει κατανοητή η πληθώρα παραλλαγών που έχουν κατά καιρούς διερευνηθεί. Ορισμένες από αυτές

αποτελούν απλές τροποποιήσεις του βασικού μαθηματικού μοντέλου και είναι εύκολα εφαρμόσιμες, ενώ άλλες είναι πολύ πιο σύνθετες μοντελοποιήσεις, που βασίζονται ολοένα και περισσότερο στην ανθρώπινη αντίληψη. Επειδή ακριβώς η συνταύτιση γκρίζων τόνων είναι ένα ελλιπώς ορισμένο (ill-posed) πρόβλημα, συνήθως οι αλγόριθμοι ενσωματώνουν στρατηγικές όπως πυραμίδες, ύφεση (relaxation), νευρωνικά δίκτυα, δυναμικό προγραμματισμό και άλλες μεθόδους για την ενίσχυση της συνταύτισης στην ειδική περίπτωση της δημιουργίας ΨΜΕ. Κατά συνέπεια δεν υπάρχει ξεκάθαρος διαχωρισμός και ορισμένες αποτελούν συνθέσεις, με αποτέλεσμα να αναλύονται σε μία κατηγορία αλλά να αναφέρονται και σε κάποια άλλη.

2.9.1. Βασικές παραλλαγές του ελαχιστοτετραγωνικού μοντέλου

2.9.1.1. Ελαχιστοτετραγωνική συνταύτιση με δέσμευση X και Y

Αυτή η παραλλαγή της ελαχιστοτετραγωνικής συνταύτισης είναι ευρύτατα διαδεδομένη σε φωτογραμμετρικούς σταθμούς, δεσμεύοντας την εύρεση ομόλογων σημείων σε προκαθορισμένες και διατεταγμένες οριζοντιογραφικές θέσεις, επιστρέφοντας ένα κανονικό ΨΜΕ. Στην βιβλιογραφία συναντάται και ως συνταύτιση στον χώρο του αντικειμένου (Helava, 1988b, Ebner and Heipke 1988, Gruen and Baltsavias 1986). Σε αυτή την περίπτωση χρειάζεται ένα μέγιστο και ένα ελάχιστο αναμενόμενο υψόμετρο για όλη την περιοχή. Για κάθε σημείο X,Y,Z του προκαθορισμένου και διατεταγμένου κανάβου, υπολογίζονται οι εικονοσυντεταγμένες στην δεξιά και αριστερή εικόνα. Για τα σημεία αυτά υπολογίζεται ο συντελεστής συσχέτισης. Εν συνεχεία για το σημείο X,Y,Z+dZ υπολογίζεται όμοια ο συντελεστής συσχέτισης. Με αυτό τον τρόπο υπολογίζεται ο συντελεστής συσχέτισης για όλα τα πιθανά υψόμετρα μεταξύ μέγιστου και ελάχιστου, με χρήση κάποιου βήματος. Το ζευγάρι με τον καλύτερο θεωρείται το υψόμετρο στην κορυφή του κανάβου (Karabork et al., 2004).

Στη βιβλιογραφία συναντάται ως vertical line locus method (Bernard et al. 1986, Kolbl et al. 1987, Li 1986, Almroth & Hendriks 1987), ενώ δεν έχει καλύτερη ακρίβεια από τον χειριστή (Wrobel, 1988).

2.9.1.2. Ελαχιστοτετραγωνική συνταύτιση με δέσμευση Z

Η παραλλαγή αυτή δεν έχει βρει εφαρμογή σε φωτογραμμετρικούς σταθμούς. Δημιουργήθηκε ως αντικατάσταση της χειροκίνητης δημιουργίας ισοϋψών από τους χειριστές των αναλογικών και αναλυτικών οργάνων. Σκοπός της είναι η αυτόματη παρακολούθηση και δημιουργία ισοϋψών. Σε αυτή την περίπτωση αμφότερα τα παράθυρα ελέγχου μετακινούνται. Η παραλλαγή αυτή δεν έχει ιδιαίτερη εφαρμογή, αφού στην φωτογραμμετρία οι ισοϋψείς προκύπτουν πλέον με παρεμβολή σε ΨΜΕ.

2.9.1.3. Ταυτόχρονη συνταύτιση πολλαπλών παραθύρων σε δύο εικόνες

Στην περίπτωση που σκοπός είναι η δημιουργία ενός ΨΜΕ, περιοχές με χαμηλή πληροφορία (με ομοιόμορφους γκρίζους τόνους) δημιουργούν προβλήματα. Για τέτοιες περιοχές αναπτύχθηκε η συγκεκριμένη μεθοδολογία, η οποία στηρίζεται στην ιδέα της γεωμετρικής συνταύτισης μεταξύ γειτονικών ζευγών ομόλογων σημείων, ώστε να ενισχυθεί η συνταύτιση σε παράθυρα με χαμηλή πληροφορία από γειτονικά με αρκετή πληροφορία. Η ελαχιστοτετραγωνική επίλυση γίνεται ταυτόχρονα για όλα τα παράθυρα, εμπεριέχοντας και την πληροφορία γειτνίασης μεταξύ τους. Κατά συνέπεια η επίλυση αφορά ταυτόχρονα όλη την επιφάνεια ενδιαφέροντος, γεγονός που την καθιστά αργή αλλά ταυτόχρονα προσφέρει ενιαία αξιοπιστία.

Αρχικές προσεγγίσεις της εν λόγω μεθοδολογίας έγιναν από τους Gruen (1985), Li (1989), Rauhala (1986), Rosenholm (1986), Heipke (1992).

2.9.1.4. Συνταύτιση πολλαπλών εικόνων

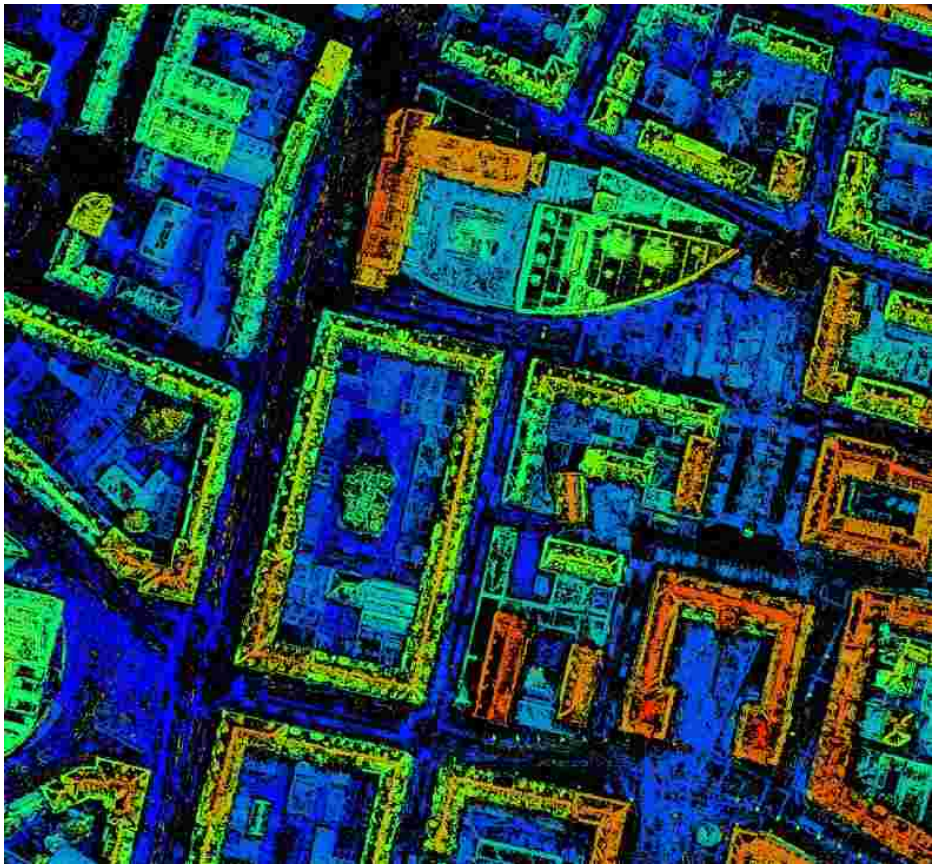
Η μέθοδος των πολλαπλών φωτογραφιών (multiphoto) παρουσιάστηκε από τους Gruen και Baltsavias (1985,1986) και αναλυτικά περιγράφεται από τον Baltsavias (1991). Η μέθοδος αυτή βελτιώνει θεαματικά τα αποτελέσματα σε περιπτώσεις που το αντικείμενο δεν φαίνεται μερικώς ή ολικώς σε κάποια εικόνα, αυξάνοντας την ακτίνα σύγκλισης. Σε ορισμένες περιπτώσεις και ανάλογα με το περιεχόμενο και το πλήθος των φωτογραφιών, η ακτίνα αυτή μπορεί να φτάσει ακόμα και 12 εικονοστοιχεία. Με δεδομένο ότι η συνθήκη της συγγραμμικότητας πρέπει να ικανοποιείται από όλες τις ακτίνες της δέσμης, οι φωτογραφίες με αρκετή πληροφορία και μοναδική λύση υποστηρίζουν αυτές με χαμηλή ποιότητα και ασάφεια. Οι αδύνατες λύσεις υποστηρίζονται από τις ισχυρότερες ώστε να μην συγκλίνουν σε λάθος σημείο, ενώ στις επόμενες επαναλήψεις συνεισφέρουν και αυτές θετικά.

Στην απλή περίπτωση όπου το αντικείμενο είναι ορατό από περισσότερες των δύο εικόνων, γίνεται

εύκολα κατανοητό ότι με περισσότερες μετρήσεις εικονοσυντεταγμένων ο τελικός προσδιορισμός θέσης αναμένεται ότι θα είναι ακριβέστερος, ενώ ταυτόχρονα αποφεύγεται η ανώμαλη σύνδεση γειτονικών ΨΜΕ που έχουν δημιουργηθεί από γειτονικά μοντέλα.

Η βελτίωση αυτή έχει εφαρμογή στις επίγειες λήψεις όπου υπάρχει η πολυτέλεια πολλαπλών λήψεων και πολλαπλής κάλυψης του αντικειμένου, αλλά και στην αεροφωτογράφηση, αφού σε πτήση με επικάλυψη 60% και 30% κατά μήκος και πλάτος αντίστοιχα, το 76% του εμβαδού απεικονίζεται σε περισσότερες των τριών φωτογραφιών. Μέχρι τώρα η δυνατότητα αυτή έχει ενσωματωθεί στο λογισμικό Socket Set της Helava (ηλεκτρονική αλληλογραφία, 25.02.2004) αλλά δεν διευκρινίζεται εάν απλώς χρησιμοποιείται το καλύτερο ζευγάρι ή εάν γίνεται ταυτόχρονη επίλυση όλων των παρατηρήσεων στα ελάχιστα τετράγωνα. Σε ορισμένες επίσης περιπτώσεις ο αλγόριθμος διαλέγει το καλύτερο ζευγάρι και εκτελεί την συνταύτιση σε δύο μόνο εικόνες (Zhang και Miller, 1997).

Οι Paparoditis et al. (2000) παρουσιάζουν μία εργασία για την δημιουργία ΨΜΕ σε πυκνό αστικό περιβάλλον. Η πτήση ήταν προσαρμοσμένη στις ανάγκες της εφαρμογής με 60% κατά μήκος και κατά πλάτος επικάλυψη, με προφανή οφέλη σχετικά με την αλληλοκάλυψη των ψηφιακών αεροφωτογραφιών. Η πολλαπλή κάλυψη επιτρέπει την μείωση του μεγέθους του παραθύρου έως 3x3, χωρίς να δημιουργούνται προβλήματα στην συνταύτιση, παρά μόνο σε περιοχές με ομοιογενείς τόνους έντασης. Το μέτρο συνταύτισης που χρησιμοποιείται είναι μια παραλλαγή του συντελεστή συσχέτισης για πολλαπλές εικόνες με ταυτόχρονες τοπικές ραδιομετρικές διορθώσεις. Η εφαρμογή γίνεται σε τέσσερις εικόνες και το ΨΜΕ που δημιουργήθηκε με αυτόν τον τρόπο καταφέρνει να περιγράψει πολύ καλά τα ύψη και το σχήμα των κτιρίων. Μειονέκτημα μπορεί να θεωρηθεί ο θόρυβος του ΨΜΕ, που παρουσιάζεται κυρίως στους δρόμους και μπορεί να οφείλεται σε κινούμενα αυτοκίνητα και ανθρώπους που δυσχεραίνουν τον αλγόριθμο. Χρησιμοποιώντας ένα κατώφλι που προκύπτει από στατιστική ανάλυση επί του συντελεστή συσχέτισης, μπορούν να απορριφθούν ορισμένα σημεία και έτσι προκύπτει ένα εντυπωσιακό αποτέλεσμα (σχ. 2.12) που επιβεβαιώνει την αντίληψη ότι η χρήση περισσοτέρων εικόνων μπορεί να λύσει το πρόβλημα της συνταύτισης. Οι συγγραφείς σημειώνουν ότι όσο περισσότερες φωτογραφίες χρησιμοποιούνται τόσο πιο εύκολο είναι να βρεθεί κατάλληλο κατώφλι, ενώ το αποτέλεσμα μετά την εφαρμογή του κατωφλιού και την διαγραφή των ύποπτων σημείων περιέχει σχεδόν 100% σωστά σημεία. Επίσης υποστηρίζουνι ότι οι κενές περιοχές μπορούν να συμπληρωθούν από τον ίδιο αλγόριθμο συνταύτισης χρησιμοποιώντας μεγαλύτερα παράθυρα, για λόγους αξιοπιστίας (αλλά μικρότερης ακρίβειας), καταλήγοντας σε ένα πυκνό και ακριβές ΨΜΕ με αντίστοιχη αξιόπιστη μετά-πληροφορία. Καταλήγοντας σημειώνει ότι ο απλός σε σύλληψη και εφαρμογή αλγόριθμος έχει καλύτερα αποτελέσματα από μορφολογική άποψη από τους εναέριους σαρωτές Laser (αφού έχει καλύτερη ανάλυση κατά x,y) και ανάλογη ακρίβεια στον προσδιορισμό του ύψους.



Σχήμα 2.12. ΨΜΕ από τέσσερις ψηφιακές αεροφωτογραφίες, φιλτραρισμένο με κατώφλι 2.9 (Paparoditis et al., 2001).

Οι Kang et al. (2001) βελτίωσαν την μέθοδο για συνταύτιση πολλαπλών εικόνων με χρήση δυναμικά προσαρμοζόμενων παραθύρων κατά μέγεθος και σχήμα, όσο και την δυναμική επιλογή των εικόνων ανάλογα με την γωνία θέασης του αντικειμένου. Παράλληλα χρησιμοποιούν μεθόδους συνολικού χαρακτηρισμού (global labeling) των εικονοστοιχείων, ώστε η συνταύτιση να γίνεται ανάμεσα σε εικονοστοιχεία που είναι ορατά. Για να γίνει εφικτό αυτό γίνεται ελαχιστοποίηση των κριτηρίων της ομαλότητας (smoothness) και της συνέχειας, ώστε οι συσχετίσεις να είναι περισσότερο προσαρμόσιμες στην πραγματικότητα. Οι διαδικασίες αυτές εφαρμόζονται σχετικά εύκολα σε δύο εικόνες, αλλά όπως ισχυρίζονται οι συγγραφείς είναι αρκετά πιο δύσκολο να επεκταθούν σε περισσότερες εικόνες, με κέρδος όμως την πρόσθετη πληροφορία και κατά συνέπεια καλύτερη κάλυψη με πληροφορία βάθους, η οποία είναι ταυτόχρονα και ακριβέστερη λόγω περίσσειας παρατηρήσεων. Έτσι η μέθοδος εφαρμόζεται σε όλα τα διαθέσιμα ζεύγη εικόνων και τελικά συνδυάζονται τα αποτελέσματα από όλα τα ζευγάρια, αποτελώντας μια διαφορετική προσέγγιση στη μέθοδο των πολλαπλών εικόνων. Η εφαρμογή έχει γίνει σε επίγειες λήψεις με πολύ μεγάλες διαφορές βάθους, παρουσιάζοντας πολύ καλά αποτελέσματα κυρίως κατά μήκος ακμών με διαφορές βάθους. Το μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι χρησιμοποιείται συγκεκριμένη διάταξη με φωτογραφικές μηχανές σταθερά τοποθετημένες επί ράβδου, γεγονός που περιορίζει τις εφαρμογές της με φωτογραφίες από τυχαίες θέσεις. Παρόμοια είναι και η εφαρμογή των Maruya et al. (1992).

Συνήθως χρησιμοποιείται μία εικόνα ως πρότυπο, με τον κίνδυνο εάν σε αυτή υπάρχει κάποια σοβαρή παραμόρφωση (αόρατη περιοχή), αυτό να επηρεάζει την συνταύτιση σε όλες. Λύση σε αυτό μπορεί να αποτελέσει η διαδοχική χρήση όλων των εικόνων ως προτύπου και έλεγχος των αποτελεσμάτων (Maas, 1996), εφαρμογή που πρακτικά δεν χρησιμοποιείται λόγω οικονομίας υπολογιστικού χρόνου.

Άλλες εφαρμογές είναι των Ruther et al. (1996) και Wolff & Förstner (2000), όπου δίνεται έμφαση στην περίπτωση τριών εικόνων και ισότιμης χρήσης τους.

Η χρήση πολλών εικόνων βελτιώνει θεαματικά την ακρίβεια και αποτελεί μοναδικό πλεονέκτημα της ελαχιστοτετραγωνικής συνταύτισης ακόμα και απέναντι στον χειριστή, που μπορεί να βλέπει ταυτόχρονα μόνο δύο εικόνες. Υπάρχουν βέβαια πολλές περιπτώσεις που για λόγους οικονομίας ή ανυπαρξίας περισσοτέρων εικόνων είναι επιβεβλημένη η χρήση μόνο δύο.

2.9.2. Άθροισμα των απολύτων διαφορών (L_1-norm, LAD, SAD)

Η χρήση των απόλυτων διαφορών ως μέτρου ομοιότητας αντί του αθροίσματος των τετραγώνων των διαφορών προσφέρει το πλεονέκτημα του καλύτερου προσδιορισμού στην περίπτωση που το παράθυρο της συνταύτισης περιέχει δύο πληθυσμούς με διαφορετική παράλλαξη, με άλλα λόγια στην περίπτωση που το παράθυρο πέφτει πάνω σε κάποια ακμή με μεγάλες διαφορές παράλλαξης εκατέρωθεν (Calitz και Ruther, 1996). Από στατιστική άποψη η μέθοδος χρησιμοποιείται όταν τα δεδομένα περιέχουν πολλά σφάλματα. Η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων βασίζεται (και αποδίδει) στην υπόθεση ότι τα σφάλματα ακολουθούν κατανομή Gauss. Σε αντίθετη περίπτωση η μέθοδος των απόλυτων διαφορών είναι προτιμότερη, γιατί τα υπόλοιπα εκφράζονται συναρτήσει υποομάδων δεδομένων (και όχι συναρτήσει όλων των δεδομένων όπως στη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων). Συνέπεια του παραπάνω είναι ότι τα ελάχιστα τετράγωνα έχουν την τάση να προσπαθούν να προσαρμόσουν το γεωμετρικό μοντέλο (αφινικό μετασχηματισμό) στο μέσο όρο της επιφάνειας, ενώ το άθροισμα των απολύτων διαφορών τείνει να προσαρμόσει την επιφάνεια στην μεσαία τιμή (median), δηλαδή στην επιφάνεια που ανήκει η μεγαλύτερη ομάδα των παρατηρήσεων, δηλαδή της επιφάνειας του παραθύρου. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι όταν το παράθυρο πέφτει πάνω σε μία γραμμή αλλαγής κλίσεως, τότε αυτό θα προσαρμοστεί (επίλυση του αφινικού) στην πλευρά που καταλαμβάνει την μεγαλύτερη επιφάνεια επί του παραθύρου συνταύτισης. Το φαινόμενο αυτό μεγιστοποιείται και η συγκεκριμένη μέθοδος έχει σαφές πλεονέκτημα σε σχέση με τα ελάχιστα τετράγωνα όταν το παράθυρο περιλαμβάνει πχ. κατά ένα μέρος ταράτσα και κατά το υπόλοιπο έδαφος.

Στην εργασία των Calitz και Ruther (1996) συγκρίνονται αποτελέσματα με χρήση της κλασικής μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων, των ελαχίστων τετραγώνων με χρήση "εύρωστων εκτιμητών" (robust estimators) και δύο διαφορετικών υλοποιήσεων των LAD. Οι μέθοδοι ήταν σχεδόν ισοδύναμες σε πλήθος και ταχύτητα επαναλήψεων, αλλά οι εύρωστοι εκτιμητές κατά την διάρκεια των επαναλήψεων παρουσίαζαν αστάθεια, ταλαντεύσεις και χρειάζονταν ελαφρώς περισσότερο χρόνο. Πειράματα με προσημασμένους στόχους έδειξαν ότι τα ελάχιστα τετράγωνα έχουν καλύτερη ακρίβεια και η συμπεριφορά των εύρωστων εκτιμητών προσομοιώνουν τις δύο μεθόδους LAD, αν και σημαντικά πιο αργά, γεγονός που πρακτικά τους καθιστά μη πρακτική λύση, όπως αναφέρουν οι συγγραφείς. Όταν δημιουργηθούν τεχνητά σφάλματα επί της μίας εικόνας, τότε τα ελάχιστα τετράγωνα αποκλίνουν από την προηγούμενη τους σωστή λύση τουλάχιστον κατά ένα pixel, ενώ η αντίστοιχη απόκλιση για τις υπόλοιπες μεθόδους είναι της τάξης των 0.25 pixel. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνει, σύμφωνα με τους συγγραφείς, ότι το άθροισμα των απολύτων διαφορών είναι καταλληλότερη μέθοδος όταν υπάρχουν σοβαρά σφάλματα στις παρατηρήσεις και δη όταν το παράθυρο περικλείει δύο διαφορετικά επίπεδα που φυσικά δεν μπορούν να μοντελοποιηθούν ταυτόχρονα από τον αφινικό μετασχηματισμό.

Μία από τις λίγες ανακοινώσεις με χρήση έγχρωμων εικόνων είναι των Mühlmann et al. (2002) στην οποία χρησιμοποιείται το άθροισμα των απολύτων διαφορών ως μέτρο ομοιότητας. Σαν άθροισμα υπολογίζεται το άθροισμα των επιμέρους διαφορών σε κάθε κανάλι χρώματος. Η εφαρμογή είναι πολύ απλή και η χρήση έγχρωμων εικόνων βελτιώνει 20-25% τον λόγο σήματος-θορύβου. Επίσης σε αυτή την εφαρμογή χρησιμοποιείται έλεγχος της συνταύτισης και από την εικόνα ελέγχου πίσω στην εικόνα πρότυπο. Δηλαδή το ομόλογο σημείο που έχει ευρεθεί στην εικόνα ελέγχου χρησιμοποιείται ως πρότυπο για να βρεθεί το ομόλογο του στην εικόνα πρότυπο που θα πρέπει να συμπίπτει με το αρχικό σημείο.

Πρακτικά τα αποτελέσματα της μεθόδου είναι πιο αξιόπιστα σε σημεία πλησίον ακμών, με κόστος όμως την γενικά μειωμένη ακρίβεια προσδιορισμού. Βέλτιστη λύση θα ήταν να μπορούσε να χρησιμοποιηθεί η συγκεκριμένη μέθοδος επιλεκτικά και μόνο κοντά σε ακμές, όπου η ελαχιστοτετραγωνική συνταύτιση αποτυγχάνει.

2.9.3. Παρακολούθηση γραμμικών στοιχείων

Μία ενδιαφέρουσα παραλλαγή της ελαχιστοτετραγωνικής συνταύτισης είναι η δυνατότητα παρακολούθησης γραμμικών στοιχείων σε εικόνες ώστε να εξαχθούν ακμές (Gruen & Agouris, 1994), ακριβώς αντίστοιχα με τις γραμμές "φίδια" (snakes) που είναι καμπύλες ελάχιστης ενέργειας προσαρμόσιμες με βάση γεωμετρικές και ραδιομετρικές δυνάμεις. Σε αυτή την περίπτωση η ακμή μπορεί να είναι τύπου ράμπας, οπότε με την χρήση ενός προτύπου αντίστοιχου αυτού του σχήματος 1.9 (περιπτωση ε), τεχνητό ή φυσικό, είναι δυνατόν να ανιχνευθεί η ακμή. Προκειμένου να μην επηρεάζεται η διαδικασία από μικρά κενά, χρησιμοποιούνται και οι εσωτερικές δυνάμεις σχήματος (internal shape forces), δηλαδή μαθηματικές περιγραφές καμπυλών, ώστε να είναι δυνατή η παρακολούθηση των γραμμών.

Στην ειδική αυτή περίπτωση όπου δεν μπορούν να υπολογιστούν οι κλίμακες και η παραμόρφωση του παραθύρου (σχ. 2.9, περίπτωση ε), δηλαδή όταν πρόκειται για μία ακμή κλιμακωτού τύπου, τότε το γεωμετρικό μοντέλο των 1.10 εκφυλίζεται στο

$$x=\Delta x+\cos(\varphi)x_o-\sin(\varphi)y_o$$
$$y=\Delta y+\sin(\varphi)x_o+\cos(\varphi)y_o \qquad (2.45)$$

Συνήθως χρησιμοποιείται παράθυρο μεγέθους 5x5 έως 9x9. Τα μικρότερα παράθυρα παρουσιάζουν μεγάλη ευαισθησία σε θόρυβο, ενώ τα μεγαλύτερα αυξάνουν την πιθανότητα να επηρεαστεί η διαδικασία από γειτονικά αντικείμενα.

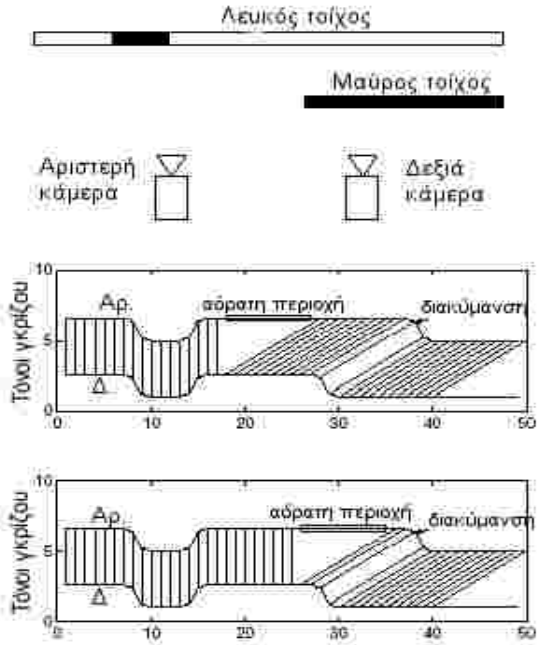
2.9.4. Δυναμικός προγραμματισμός

Ο δυναμικός προγραμματισμός (ΔΠ) αποτελεί μια διαδεδομένη μέθοδο που έχει εφαρμογή και στην συνταύτιση εικόνων. Είναι ουσιαστικά ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης σε διαδικασίες λήψης αποφάσεων πολλαπλών σταδίων, δηλαδή βρίσκει την λύση ενός προβλήματος ως σύνολο λύσεως πολλών μικρότερων. Η βέλτιστη δε λύση αποτελεί αυστηρά την σύνθεση των επιμέρους βέλτιστων λύσεων. Υλοποιείται ως εύρεση της διαδρομής με το μικρότερο κόστος, μέσα σε έναν πίνακα του οποίου γραμμές και στήλες έχουν την τιμή κόστους ανάμεσα στα στοιχεία τους (Bernard 1984, Bernard et al., 1986, Koelbl et al., 1987, Lloyd et al., 1987). Είναι φυσικό να μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε προβλήματα που μπορούν να αναλυθούν σε επιμέρους. Βασικό πλεονέκτημα είναι η δυνατότητα χρήσης συνάρτησης κόστους οποιασδήποτε μορφής. Έτσι έχουν παρουσιαστεί πολλές μελέτες με πολλές διαφορετικές προτάσεις συναρτήσεων κόστους (Bernard et al., 1986, Cox et al., 1994, Geiger et al., 1995, Birchfied et al., 1998), όπου κάθε μελετητής προτείνει μία συνάρτηση ανάλογα με τα κριτήρια που επιθυμεί να χρησιμοποιήσει. Το βάρος κάθε παραμέτρου καθώς και ο τρόπος υπολογισμού του μέτρου της, διαφέρουν. Έτσι πχ. τα εικονοστοιχεία σε αόρατες περιοχές δεν συμμετέχουν με τον ίδιο τρόπο σε κάθε εφαρμογή. Το γεγονός αυτό της ποικιλίας στην αντιμετώπισης παρόμοιων φαινομένων καθιστά την μέθοδο σχεδόν εμπειρική (ad hoc), ενώ στις περισσότερες περιπτώσεις δεν αποφεύγεται η χρήση κατωφλιών.

Οι Cox et al. (1992, 1994, 1996) παρουσίασαν έναν αλγόριθμο μέγιστης πιθανοφάνειας (maximum likelihood) που χρησιμοποιεί τα κριτήρια της μοναδικότητας και της διάταξης. Η συνάρτηση κόστους που χρησιμοποιεί εφαρμόζεται σε όλα τα εικονοστοιχεία και επιβάλλει ποινή σε εκείνα που δεν συσχετίζονται. Ο δυναμικός προγραμματισμός εφαρμόζεται σε κάθε γραμμή των επιπολικών εικόνων ξεχωριστά. Στις δύο τελευταίες ανακοινώσεις χρησιμοποιείται δέσμευση συνεκτικότητας για να συνδέσει μεταξύ τους τα αποτελέσματα από όλες τις γραμμές, καταλήγοντας έτσι σε μία συνολική λύση για όλη την εικόνα.

Η εργασία των Geiger et al. (1995) βασίζεται στα κριτήρια της μοναδικότητας, συνέχειας και μονοτονικότητας, τα οποία μοντελοποιούν πλήρως τις "αόρατες" περιοχές. Η παρατήρηση ότι μία "αόρατη" περιοχή πάνω στην επιπολική γραμμή αντιστοιχεί απαραιτήτως σε μία αντίστοιχη περιοχή στην άλλη εικόνα, οδήγησε στην χρήση και ενός κριτηρίου "αόρατων" περιοχών. Επιπρόσθετα χρησιμοποιεί και μεταθετά (shiftable) παράθυρα συνταύτισης, ενώ το τελικό αποτέλεσμα προκύπτει με δυναμικό προγραμματισμό με συνάρτηση κόστους που λαμβάνει υπόψη της όλα τα παραπάνω κριτήρια. Η υπόθεση των διπλών "αόρατων" περιοχών ισχύει μόνο σε πόλεις με κατακόρυφα στοιχεία και όχι σε φυσικό έδαφος.

Οι Birchfield και Tomasi (1998) ανακοίνωσαν μία ενδιαφέρουσα εργασία με χρήση δυναμικού προγραμματισμού. Χρησιμοποιούν επιπολικές εικόνες και συσχετίζουν όλα τα εικονοστοιχεία επι των επιπολικών ανά ζεύγη μεταξύ τους. Στην εφαρμογή αυτή προβλέπουν "αόρατα" εικονοστοιχεία και εικονοστοιχεία που σηματοδοτούν μεγάλες αλλαγές παράλλαξης x. Βασικές υποθέσεις στην ανακοίνωση αυτή είναι ότι οι "αόρατες" περιοχές εμφανίζονται ανά ζεύγη (όπως υποστήριξε και ο Geiger et al., 1995), είναι μικρή η πιθανότητα να υπάρχει μεγάλη διαφορά παράλλαξης x ανάμεσα σε όμοιους γκρίζους τόνους και ότι το φυσικό όριο μεταξύ δύο αντικειμένων σε διαφορετικό βάθος είναι το όριο το πλησιέστερου. Επίσης πριμοδοτείται η πλευρά εμφάνισης της αόρατης περιοχής ανάλογα με το εάν αυτή εμφανίζεται στην δεξιά ή αριστερή εικόνα σε συνδυασμό με την πλευρά ομοιόμορφων τόνων (σχ. 2.13).



Σχήμα 2.13. Με δεδομένη την υπόθεση ότι υπάρχει μεταβολή της έντασης κατά μήκος μιας ασυνέχειας μεταξύ εγγύτερων και απώτερων αντικειμένων, η μεταβολή των γκρίζων τόνων πρέπει να βρίσκεται στην δεξιά πλευρά της αόρατης περιοχής στην αριστερή εικόνα. Άνω: Φυσική διάταξη. Μέσον: Μία αντιστοίχηση που φαίνεται λογική άλλα παραβιάζει την παραπάνω υπόθεση. Κάτω: Μια αντιστοίχηση που συμβαδίζει με την παραπάνω υπόθεση.

Η συνάρτηση κόστους που χρησιμοποιούν είναι πρωτότυπη και εμπεριέχει κόστος για "αόρατα" εικονοστοιχεία, κέρδος για συνεπή εικονοστοιχεία, κόστος για ανομοιότητα γκρίζων τόνων και πλήθος "αόρατων" περιοχών των οποίων το πλήθος θα πρέπει να είναι ζυγό. Το μέτρο ανομοιότητας των τιμών του γκρίζου υπολογίζεται επί της επιπολικής γραμμής επιλέγοντας μέγιστα και ελάχιστα μεταξύ των υπό έλεγχο τόνων και των ημιαθροισμάτων τους με τα γειτονικά. Η συνάρτηση κόστους δεν υπολογίζεται για κάθε εικονοστοιχείο της αριστερής, ούτε για όλα τα εικονοστοιχεία της δεξιάς παρά μόνο για όσα είναι εντός κάποιου ορίου παράλλαξης x, μειώνοντας έτσι τον χρόνο υπολογισμού.

Αφού γίνει ο υπολογισμός για όλες τις γραμμές, ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί την αξιοπιστία (ανάλογη με την συχνότητα εμφάνισης συνεχόμενων συμφωνούντων σημείων) των εικονοστοιχείων για την ταξινόμησή τους σε τρεις κατηγορίες και εν συνεχεία τον έλεγχο συνέχειας κατά πλάτος. Συνολικά, παρόλο που το μέτρο ομοιότητας που χρησιμοποιεί είναι πρωτότυπο, τα αποτελέσματα είναι ικανοποιητικά γιατί καταφέρνουν και χρησιμοποιούν πολλές παραμέτρους.

Μία ενδιαφέρουσα εφαρμογή έχει παρουσιαστεί από τους Apaphant και Bethel (2000). Σε αυτή την περίπτωση ο δυναμικός προγραμματισμός χρησιμοποιείται στο πλαίσιο της δημιουργίας σωστού ΨΜΕ σε αστικές περιοχές, όπου τα κτίρια παρουσιάζονται στο ΨΜΕ με σχεδόν κατακόρυφες πλευρές (στο πλαίσιο του περιορισμού ότι κανένα οριζοντιογραφικό σημείο δεν μπορεί να έχει δύο υψόμετρα). Τα βασικά προβλήματα των αστικών περιοχών, που είναι τα ορατά σε μία μόνο φωτογραφία, οι μεγάλες και απότομες διαφορές παράλλαξης x και η ποικιλία υφής αντιμετωπίζονται πολύ καλά με εφαρμογή δυναμικού προγραμματισμού κατά μήκος των επιπολικών γραμμών (σχ. 2.14). Για το σκοπό αυτό δημιουργούνται οι οντότητες του "επιπέδου" και της "έξαρσης", (plateau, spike) ως βασικά χαρακτηριστικά. Η συνάρτηση χρησιμοποιεί κυρίως τα χαρακτηριστικά ως δεσμεύσεις (ουσιαστικά με μικρότερο βάρος ενθαρρύνοντας τον δυναμικό προγραμματισμό να περάσει από αυτά τα σημεία), ενώ παράλληλα χρησιμοποιεί συνταύτιση γκρίζων τόνων. Με δεδομένο ένα μέγιστο εύρος αλλαγής παράλλαξης x, τα στοιχεία μέσα σε αυτό συσχετίζονται και ορίζεται ένα βάρος ανάλογα με την ομοιότητα τους. Στο τέλος όλα τα σημεία και χαρακτηριστικά συσχετίζονται κατά μήκος όλης της γραμμής ταυτόχρονα με χρήση δυναμικού προγραμματισμού, που επιτρέπει την ύπαρξη "ορφανών" χαρακτηριστικών (χωρίς ομόλογο). Συγκεκριμένα στον δυναμικό προγραμματισμό τα χαρακτηριστικά επί

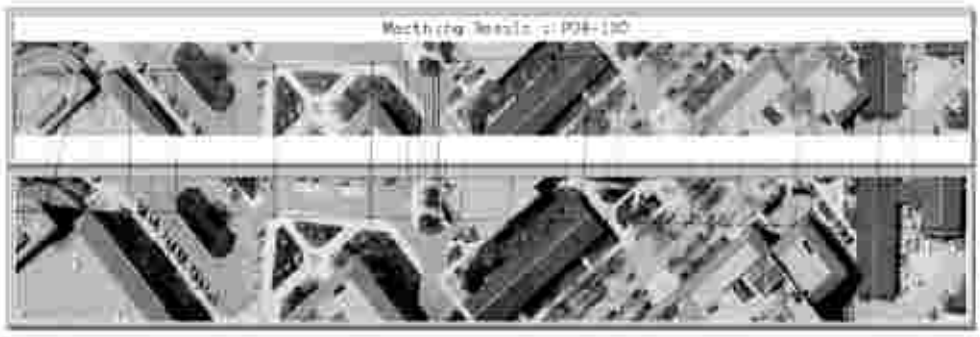
της επιπολικής γραμμής στην μία εικόνα αποτελούν τις στήλες και τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά από την άλλη εικόνα αποτελούν τις γραμμές. Ο πίνακας αυτός γεμίζει με τιμές κόστους (μικρές για καλή πιθανή συνταύτιση και μεγάλος για όχι τόσο πιθανή συνταύτιση). Σε περίπτωση που υπάρχει βεβαιότητα για την ανυπαρξία οιασδήποτε συνταύτισης μεταξύ δύο χαρακτηριστικών, χρησιμοποιείται ένα πολύ μεγάλο μέγεθος για κόστος στον πίνακα. Αν θεωρηθεί ότι είναι γνωστή η συνταύτιση ανάμεσα στο πρώτο και το m-οστό στοιχείο της στήλης, με δύο αντίστοιχα στοιχεία της γραμμής, τότε πρέπει να βρεθεί ο ελάχιστος δρόμος (ελαχιστοποίηση των αθροισμάτων κόστους διαμέσου του πίνακα) που να συνδέει αυτά τα δύο στοιχεία.

Στην δημιουργία/εύρεση της βέλτιστης διαδρομής διαμέσου του πίνακα, υπάρχουν μερικοί κανόνες που μειώνουν τους πιθανούς συνδυασμούς και αυτοί προκύπτουν από την θεωρία της στερεοσκοπικής όρασης. Τέτοιοι είναι οι εξής:

1. Εφόσον κάθε σημείο της αριστερής εικόνας έχει ένα ομόλογο, η διαδρομή στον πίνακα θα πρέπει να προχωράει μονοτονικά από αριστερά στα δεξιά και από πάνω προς τα κάτω.
2. Χρησιμοποιώντας μία μέγιστη διαφορά ύψους μεταξύ διαδοχικών σημείων επί της γραμμής, δημιουργείται ένα ελάχιστο και ένα μέγιστο κατώφλι για την διαφορά παράλλαξης x από το προηγούμενο ζευγάρι. Έτσι υλοποιείται και ένα μέγιστο πιθανών υποψήφιων χαρακτηριστικών στην άλλη εικόνα, και άρα δεν χρειάζεται ο υπολογισμός του κόστους για όλα τα πιθανά ζευγάρια.

Για την δημιουργία του ΨΜΕ, δημιουργείται ένας κάναβος από σημεία (παράλληλος στις επιπολικές). Οι αρχικές τιμές για την ελαχιστοτετραγωνική συνταύτιση προκύπτουν από τα γειτονικά σημεία χαρακτηριστικών που έχουν συσχετιστεί και στις δυο εικόνες με βάση την προηγούμενη διαδικασία.

Τα αποτελέσματα συνταύτισης αεροφωτογραφιών του Πανεπιστημίου Purdue, κλίμακας 1:5000 και ανάλυσης 15μm, έδωσαν ικανοποιητικά αποτελέσματα (σχ. 2.14), τουλάχιστον όπως φαίνεται σε μία προοπτική αναπαράσταση του ΨΜΕ. Αριθμητικά δεδομένα σε σχέση με ΨΜΕ αναφοράς δεν παρατίθενται. Με τη μέθοδο αυτή ενισχύεται η ταυτόχρονη συνταύτιση πολλών χαρακτηριστικών (θυμίζοντας σαν ιδέα την ταυτόχρονη συνταύτιση πολλαπλών παραθύρων, αλλά με διαφορετικό τρόπο γεωμετρικής σύνδεσης ανάμεσα στα συσχετιζόμενα στοιχεία).



Σχήμα 2.14. (Δυναμικός προγραμματισμός κατά μήκος των επιπολικών γραμμών και οι τελικές συσχετίσεις Apaphant and Bethel, 2000).

Στην εργασία των Bobick et al. (1999) παρουσιάζεται μία παραλλαγή όπου ομόλογα σημεία και "αόρατες" περιοχές συνυπολογίζονται, ενώ δεν χρησιμοποιούνται κριτήρια συνέχειας (ομαλότητας) και συνοχής. Χρησιμοποιεί μία νέα χωρική δομή δεδομένων παράλλαξης (Disparity Space Image), όπου με χρήση δυναμικού προγραμματισμού υπολογίζει την καλύτερη διαδρομή. Προκειμένου η μέθοδος να έχει αξιοπιστία (και μη χρήση κριτηρίων δέσμευσης) χρησιμοποιεί φωτοσταθερά, τα οποία δεσμεύουν την λύση και οδηγούν σε σωστά αποτελέσματα. Κατά τον υπολογισμό της συνάρτησης κόστους, οι "αόρατες" περιοχές που συμπίπτουν με ακμές στην εικόνα έχουν μικρότερο κόστος, επιδοτώντας ουσιαστικά αυτές τις περιπτώσεις. Η προσέγγιση αυτή οδηγεί σε ασφαλή εντοπισμό ακόμα και μεγάλων "αόρατων" περιοχών.

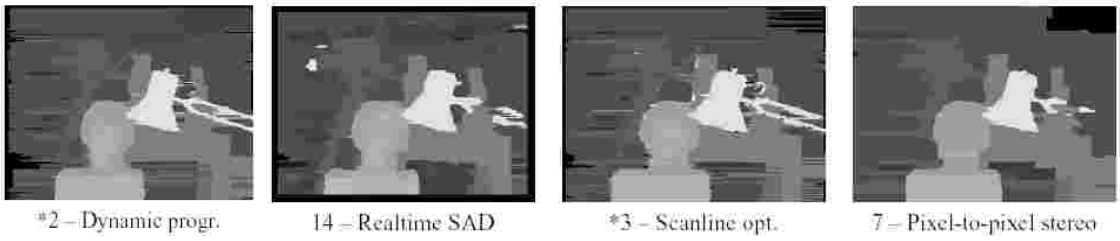
Χρήση δυναμικού προγραμματισμού αναφέρεται και στην εργασία των Kang et al. (2001), όπου χρησιμοποιείται για τον διαχωρισμό των εικονοστοιχείων εκατέρωθεν ακμών καθ' ύψος, σε συνδυασμό με επιπολική γεωμετρία. Ο Belhumeur (1996) χρησιμοποιεί δυναμικό προγραμματισμό για να υπολογίσει

ταυτόχρονα το βάθος, τις αόρατες περιοχές, τον προσανατολισμό της επιφάνειας και την καμπυλότητά της.

Οι Zitnick & Kanade (2000) χρησιμοποιούν δυναμικό προγραμματισμό με έμφαση στον εντοπισμό "αόρατων" περιοχών. Η εφαρμογή τους σε αληθή δεδομένα δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Άλλες εργασίες που χρησιμοποιούν δυναμικό προγραμματισμό είναι των Milios (1989), Ohta (et al. 1987), Oriot (et al., 1998), Sun (1997, 2001, 2002), Pollefeys (et al., 1999).

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι εφαρμογές που χρησιμοποιούν δυναμικό προγραμματισμό λειτουργούν ανά γραμμή και κατά συνέπεια χρησιμοποιούν επιπολικές εικόνες. Επίσης επιλύουν το πρόβλημα ανεξάρτητα για κάθε γραμμή, συνήθως αδυνατώντας να τις συσχετίσουν όλες μαζί στο τέλος σωστά ενώ παρουσιάζουν έντονες γραμμικές ανομοιομορφίες κατά μήκος τους, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.15. Δουλεύουν πολύ καλά και βελτιστοποιούν κάθε γραμμή χωριστά, αλλά δεν μπορούν να εξασφαλίσουν συνέπεια και συνέχεια μεταξύ των γραμμών (Sun et al., 2002). Σπανίως αναφέρεται, αλλά βασική προϋπόθεση για τον δυναμικό προγραμματισμό είναι η δέσμευση της διάταξης, με όσα μειονεκτήματα αυτό σημαίνει (Kolmogorov et al., 2001).



Σχήμα 2.15. Εικόνες παράλλαξης x με την μέθοδο συνταύτισης ανά γραμμή, όπου εμφανίζονται έντονοι γραμμικοί σχηματισμοί και η αδυναμία του δυναμικού προγραμματισμού να συσχετίσει αποτελέσματα μεταξύ γειτονικών γραμμών (Scharstein, Szeliski, 2001). Η μέθοδος Birchfield και Tomasi (1998) που χρησιμοποιεί έλεγχο μεταξύ γραμμών είναι η δεξιά.

2.9.5. Τομές γραφημάτων (Graph Cuts)

Η μέθοδος της τομής γραφήματος βασίζεται στην δημιουργία ενός σύνθετου δικτύου κόμβων που συνδέονται μεταξύ τους με πλευρές, κάθε μία των οποίων έχει κάποιο βάρος. Η συνάρτηση υπολογισμού του βάρους αυτού, καθώς και ο τρόπος σύνδεσης των κόμβων, αποτελούν το σχεδιασμό του γραφήματος και πρέπει να είναι αντιπροσωπευτικός του προβλήματος. Η εύρεση της τομής με το ελάχιστο κόστος, δηλαδή της τομής της οποίας το άθροισμα των καταργηθεισών πλευρών είναι το ελάχιστο, είναι εκείνη που αντιστοιχεί στη λύση του προβλήματος.

Οι Agrawal et al. (2003) χρησιμοποιούν τομή γραφήματος τοπικά αντί για συνταύτιση γκρίζων τόνων. Ξεκινώντας από την παραδοχή ότι σε κάθε παράθυρο υπάρχουν δύο πληθυσμοί με διαφορετική παράλλαξη, ένας εκ των οποίων πρέπει να επικρατήσει, οργανώνει το γράφημα με κόμβους σε όλα τα εικονοστοιχεία και τις δύο επικρατέστερες παραλλάξεις. Οι πλευρές γίνονται ανάμεσα σε όλα τα εικονοστοιχεία και τις δύο παραλλάξεις καθώς και κάθε εικονοστοιχείο με τα γειτονικά του. Τα βάρη αυτών των πλευρών καθορίζονται αναλυτικά. Η λύση αντιπροσωπεύει την επικρατέστερη παράλλαξη. Η εφαρμογή αυτή μοιάζει με την μέθοδο την απολύτων διαφορών (παρ.1.9.8), όπου συνεισφέρουν στην λύση μόνο οι παρατηρήσεις από τον μεγαλύτερο πληθυσμό παραλλάξεων. Η μέθοδος των απόλυτων διαφορών όμως έχει στερεό στατιστικό και μαθηματικό υπόβαθρο, ενώ στην προκειμένη περίπτωση ο σχεδιασμός του γραφήματος είναι αυθαίρετος και θεωρείται επιτυχής από τα αποτελέσματα τα οποία έχει, κοινώς είναι μία εμπειρική μέθοδος.

Η μέθοδος δεν διασφαλίζει την ένα προς ένα σχέση και δεν έχει καλή συμπεριφορά στις αόρατες περιοχές. Ο Kolmogorov (et al., 2001) προτείνει μια τροποποίηση στον σχεδιασμό του γραφήματος, που ενσωματώνει την δέσμευση της μοναδικότητας και ταυτόχρονα αντιμετωπίζει επιτυχώς και τις αόρατες περιοχές.

2.9.6. Με χρήση κυκλώπειας γεωμετρίας (PMF)

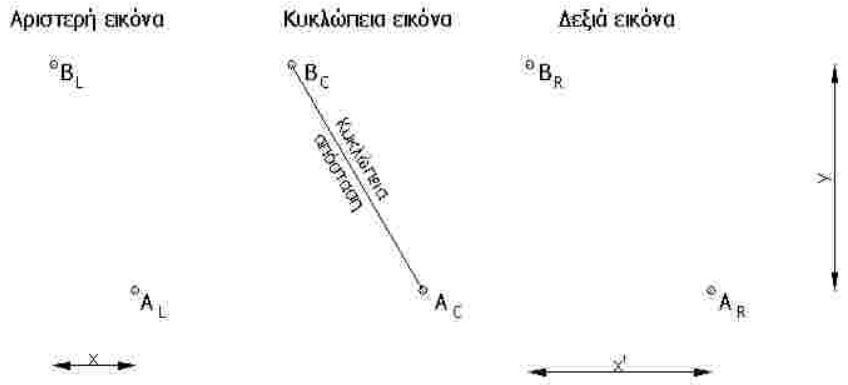
Αρχικά οι Marr και Poggio (1977) πρότειναν μια μέθοδο βασισμένη στην στερεοσκοπική αντίληψη του ανθρώπου. Βασίστηκε στην ιδέα ότι εφόσον οι τιμές γκρίζου ακόμα και μεταξύ ομόλογων σημείων διαφέρουν, η συνταύτιση θα έπρεπε να γίνει σε περιοχές με απότομη αλλαγή της έντασης, δηλαδή σε χαρακτηριστικά της εικόνας (ακμές, γωνίες, κ.λπ.). Τα χαρακτηριστικά περιγράφονται από τις ιδιότητές τους και η συνταύτιση βασίζεται στην αντιστοίχηση αυτών των χαρακτηριστικών. Επίσης εξέφρασαν την αρχή της συνέχειας της επιφάνειας, αρχή που ισχύει γενικά αλλά όχι απαραιτήτως.

Η βασική αρχή της συνέχειας της επιφάνειας των Marr και Poggio (1977) βελτιώθηκε από τους Pollard et al. (1985) με τον αλγόριθμο PMF που αποτελεί και το χαρακτηριστικότερο παράδειγμα της κατηγορίας αυτής. Σε αυτή τη μέθοδο η συνέχεια της επιφάνειας εξασφαλίζεται από μία συνθήκη μέγιστης μεταβολής της παράλλαξης που βασίζεται στην κυκλώπεια γεωμετρία των Burt & Julesz (1980). Συγκεκριμένα είχαν παρουσιάσει στοιχεία, σύμφωνα με τα οποία ο λόγος της διαφοράς των παραλλάξεων μεταξύ δύο σημείων που είναι ταυτόχρονα εστιασμένα από το ανθρώπινο οπτικό σύστημα, προς την κυκλώπεια απόστασή τους, δεν πρέπει να ξεπερνάει το 1 (σχ. 2.16). Έτσι εάν το A και B είναι δύο σημεία του φυσικού χώρου που ο άνθρωπος έχει εστιάσει την όρασή του, τότε στο αριστερό και δεξί μάτι εικονίζονται αντίστοιχα τα σημεία A_L, A_R και B_L, B_R. Το B_C είναι το μέσο της απόστασης B_L–B_R και το A_C αντίστοιχα. Η απόσταση B_C-A_C είναι η κυκλώπεια απόσταση $S=\sqrt{\left(\frac{1}{2}(x+x')\right)^2+y^2}$, οπότε για να είναι και τα δύο σημεία ταυτόχρονα εστιασμένα στο οπτικό σύστημα του ανθρώπου θα πρέπει να ισχύει $\frac{x'-x}{S}<1$.

Ο Pollard χρησιμοποιεί αυτή την συνθήκη για όλα τα σημεία, ορίζοντας ουσιαστικά την μέγιστη επιτρεπόμενη διαφορά παράλλαξης στον χώρο ελέγχου.

Η όλη διαδικασία μπορεί να περιγραφεί ως εξής:

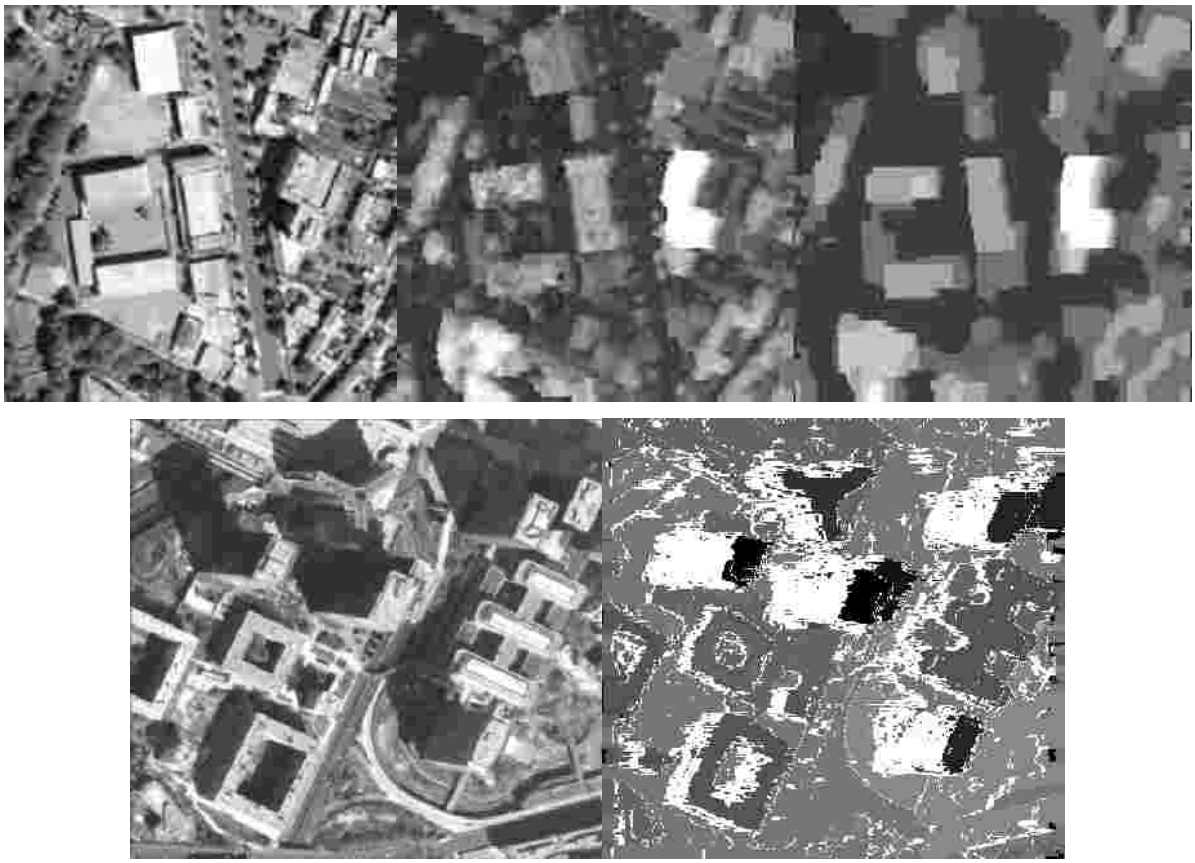
- Εξαγωγή χαρακτηριστικών και στις δύο εικόνες, πχ. ακμές
- Για κάθε στοιχείο στην εικόνα πρότυπο, εύρεση των πιθανών ομόλογων στην εικόνα ελέγχου. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται επιπολική γεωμετρία.
- Για κάθε τέτοιο ζεύγος αύξηση της ενέργειας ανάλογα με το πλήθος των πιθανών ομολόγων που δεν παραβιάζουν το κριτήριο της μέγιστης παράλλαξης. Στην προκειμένη περίπτωση μέγιστη παράλλαξη είναι η κυκλώπεια απόσταση, που ουσιαστικά μεταβάλλεται ανάλογα με την απόσταση από τον παρατηρητή και δεν αποτελεί ένα κατώφλι ορισμένο από τον χρήστη του αλγορίθμου.
- Τα ζεύγη σημείων με τη μεγαλύτερη ενέργεια για αμφότερα τα σημεία θεωρούνται σωστά. Με χρήση του κριτηρίου της μοναδικότητας αυτά τα ζεύγη εξαιρούνται από περαιτέρω επεξεργασία.
- Επιστροφή στο 2 και επαναϋπολογισμός των σημείων, εξαιρουμένων των ήδη σωστών ζευγών.
- Τερματισμός όταν όλα τα ζεύγη έχουν βρεθεί.



Σχήμα 2.16. Κυκλώπεια απόσταση και η σχέση της με την διαφορά παραλλάξεως x′-x.

Οι Oriot et al. (1998) παρουσίασαν μια μέθοδο με σκοπό την δημιουργία λεπτομερούς ΨΜΕ σε ημιαστικές περιοχές ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διαδικασίες εντοπισμού κτιρίων. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούν μια συνάρτηση κόστους με τέσσερις όρους, τον συντελεστή συνταύτισης (ποιότητα), την

κανονικότητα των επιφανειών[1] (regularization term), την γ παράλλαξη και την κυκλώπεια γεωμετρία. Επειδή η σχέση είναι πεπλεγμένη, η επίλυση επιτυγχάνεται μετά από μία επανάληψη και το τελικό αποτέλεσμα υπολογίζεται με χρήση δυναμικού προγραμματισμού. Τα αποτελέσματα κρίνονται πολύ καλά (σχ. 2.17). Οι συγγραφείς παραπέμπουν στους Sonka et al. (1993), που αναφέρουν ότι βασικό μειονέκτημα της κυκλώπειας γεωμετρίας είναι ότι δεν μπορεί να συσχετίσει καλά ακμές παράλληλες στις επιπολικές.



Σχήμα 2.17. Οι δύο περιοχές ελέγχου με τα αντίστοιχα αποτελέσματα. Στην πρώτη περιοχή τα αποτελέσματα διαφέρουν λόγω χρήσης διαφορετικού βάρους στον όρο κανονικότητας επιφανειών. Στην δεύτερη περιοχή σημειώνονται με λευκό χρώμα οι αόρατες περιοχές (Oriot et al. 1998).

2.9.7. Ογκομετρικές προσεγγίσεις (Voxels)

Οι ογκομετρικές προσεγγίσεις χρησιμοποιούν voxels, που είναι το αντίστοιχο των εικονοστοιχείων στις τρεις διαστάσεις, είναι δηλαδή τα ελάχιστα τρισδιάστατα στοιχεία του χώρου. Πλεονέκτημά τους είναι ότι επιτρέπουν την καλύτερη περιγραφή τρισδιάστατων αντικειμένων χωρίς τους περιορισμούς των 2½ ΨΜΕ και κατά συνέπεια έχουν καλύτερη συμπεριφορά σε επίγειες λήψεις και κοντινές αποστάσεις. Επιτρέπουν κατά κανόνα καλύτερο χειρισμό των αόρατων περιοχών. Μειονέκτημά τους αποτελεί το γεγονός ότι περιορίζουν την ακρίβεια που καθορίζεται από το μέγεθος των voxels και κατά συνέπεια είναι άμεσα εξαρτώμενη από την μνήμη του υπολογιστή αφού η περιοχή εργασίας χωρίζεται σαν ένας τρισδιάστατος πίνακας μεγάλων διαστάσεων.

Η εργασία των Zitnick & Kanade (1998, 2000) χρησιμοποιεί τις βασικές αρχές μοναδικότητας και συνέχειας των Marr & Poggio (1976), για την δημιουργία αυτόματου ΨΜΕ και τον ταυτόχρονο εντοπισμό αόρατων περιοχών. Οι δύο αυτές βασικές αρχές συγχωνεύονται μέσω ογκομετρικής προσέγγισης. Δημιουργείται ένας τρισδιάστατος πίνακας με τιμές πιθανότητας συνταύτισης, όπου κάθε τιμή αντιστοιχεί σε ένα εικονοστοιχείο της εικόνας και μία παράλλαξη σε σχέση με την δεύτερη εικόνα. Επαναληπτικά οι τιμές αυτές ανανεώνονται από τα γειτονικά voxels (αυξάνοντας ή μειώνοντας το βάρος τους) μέχρι το σύστημα να έρθει σε ισορροπία. Στο τελευταίο στάδιο γίνεται ο εντοπισμός των αόρατων περιοχών.

1 Σε αστικές περιοχές αναμένονται ομαλές ανά τμήματα (piecewise smooth) επιφάνειες

Ο Collins (1996) χρησιμοποίησε voxels σε συνδυασμό με πολλαπλές εικόνες.

2.9.8. Νευρωνικά δίκτυα

Τα νευρωνικά δίκτυα αποτελούν μία μέθοδο ευρείας αποδοχής για την επίλυση προβλημάτων χωρίς την μαθηματική τους περιγραφή ή μοντελοποίηση. Ένα νευρωνικό δίκτυο αντλεί την δύναμή του από την παράλληλη δομή του και την ικανότητα του να μαθαίνει και να γενικεύει, δηλαδή να παράγει λογικά αποτελέσματα για δεδομένα που δεν έχει αντιμετωπίσει κατά την εκπαίδευσή του. Το θεώρημα Kolmogorov (Wang et al., 1999) σύμφωνα με το οποίο ένα δίκτυο ανάδρασης (back propagation) με τρία επίπεδα μπορεί να προσεγγίσει οποιαδήποτε συνάρτηση $f:[0,1]^n \rightarrow R^m$ με μέσο τετραγωνικό σφάλμα ε, όπου ε>0, έδωσε βήμα για τους ερευνητές να προσεγγίσουν με νέα οπτική πρακτικά προβλήματα.

Χαρακτηριστική περίπτωση χρήσης δύο διαφορετικών ειδών νευρωνικών δικτύων για την συνταύτιση εικόνων αναφέρεται στην μελέτη των Wang & Hsiao (1999). Συγκεκριμένα χρησιμοποιούν ένα δίκτυο ανάδρασης (back-propagation, BP), που αποτελεί το βασικό είδος νευρωνικών δικτύων, και ένα δίκτυο διατήρησης ζωτικότητας (vitality conservation, VC). Το δεύτερο, αν και δεν είναι ευρύτερα διαδεδομένο, έχει το βασικό πλεονέκτημα ότι είναι αυτοδημιούργητο, δηλαδή αυτό-οργανώνεται και δεν χρειάζεται να προκαθοριστεί από τον χρήστη.

Το δίκτυο BP αφού εκπαιδευτεί σε 200 ζεύγη, που έχουν υποδειχθεί από τον χρήστη, επιτυχών και ανεπιτυχών ομόλογων σημείων σε επίπεδες και επικλινείς περιοχές με παράθυρα 7x7, θεωρητικά μπορεί να αντιμετωπίσει οποιαδήποτε περίπτωση. Υποχρεωτική είναι η φάση εκπαίδευσης, η οποία όμως γίνεται μία φορά. Το διάνυσμα δεδομένων (πρώτο επίπεδο) έχει 147 νευρώνες, το κρυφό επίπεδο (δεύτερο) 50 και το διάνυσμα εξόδου ένα, που είναι και το μέτρο του βαθμού συνταύτισης στο διάστημα (0,1). Ορίζοντας την πρώτη παράγωγο ως

$$\nabla f = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \end{bmatrix} \tag{2.46}$$

το μέτρο της παραγώγου ως

$$|\nabla f| = mag(\nabla f) = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \tag{2.47}$$

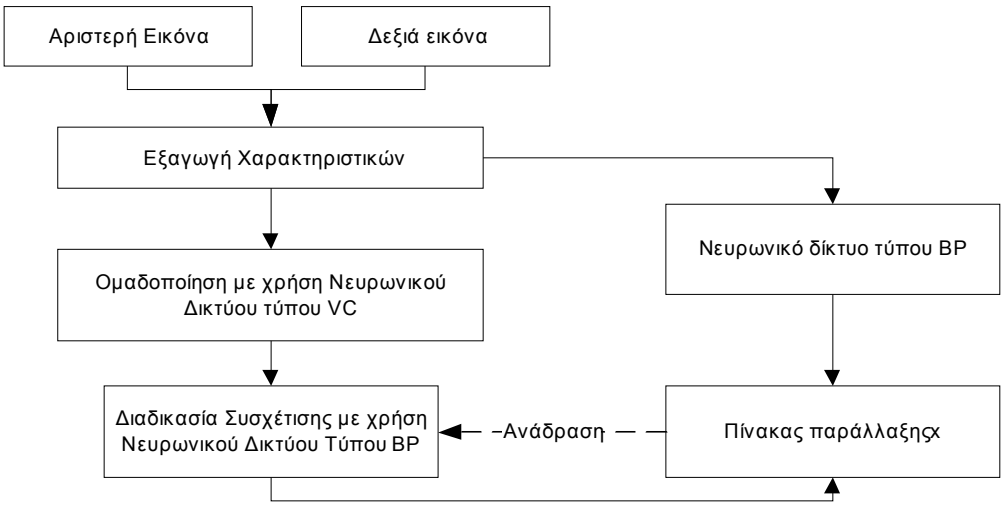
και την διεύθυνσή της ως

$$a(x,y) = \tan^{-1}\begin{pmatrix} G_x \\ G_y \end{pmatrix} \tag{2.48}$$

τότε το διάνυσμα εισόδου περιέχει τις διαφορές της έντασης, του μεγέθους και της διεύθυνσης της πρώτης παραγώγου ανάμεσα στα 49 εικονοστοιχεία των δύο παραθύρων, δηλαδή

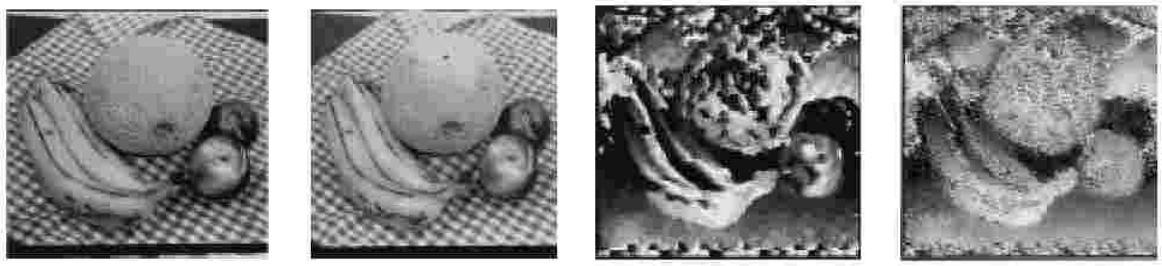
$$f_{L_i} - f_{R_i}, |\nabla f_{L_i}| - |\nabla f_{R_i}|, a_{L_i} - a_{R_i} \tag{2.49}$$

Το δίκτυο BP χρησιμοποιείται για να δημιουργηθεί ένας αρχικός πίνακας παραλλάξεων x ενώ το VC ομαδοποιεί τα χαρακτηριστικά και τα συνδυάζει με τον αρχικό πίνακα παραλλάξεων x βελτιστοποιώντας τον (σχ. 2.18). Σε αυτή την προσπάθεια συμμετέχουν οι δεσμεύσεις της επιπολικής γεωμετρίας, της σειράς, της συνέχειας και της διάταξης.



Σχήμα 2.18. Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου Wang & Hsiao (1999).

Οι συγγραφείς αναφέρουν ότι προσπάθησαν να συνδυάσουν τα πλεονεκτήματα της συνταύτισης γκρίζων τόνων, που προσομοιώνεται από το δίκτυο ανάδρασης, και της συνταύτισης χαρακτηριστικών, που προσομοιώνεται από το δίκτυο διατήρησης ζωτικότητας. Οι συγγραφείς υποστηρίζουν ότι αυτή η επιλογή του διανύσματος έχει το πλεονέκτημα της ανεξαρτησίας από το περιεχόμενο των εικόνων, οπότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε οποιεσδήποτε εικόνες.



Σχήμα 2.19. Από αριστερά προς τα δεξιά, η αριστερή και δεξιά εικόνα, τα αποτελέσματα της ελαχιστοτετραγωνικής συνταύτισης και τα αποτελέσματα της προτεινόμενης μεθόδου (Wang & Hsiao 1999).

Άλλες εφαρμογές είναι αυτές των Huang et al. (1997) και Sakamoto et al. (2002). Η πρώτη χρησιμοποιεί ένα συνδυασμό νευρωνικού δικτύου τύπου Hopfield και οι βασικές δεσμεύσεις που εφαρμόζει είναι της συνέχειας, της ομαλότητας και της μοναδικότητας, ενώ η όλη προσπάθεια βασίζεται στην βελτίωση της μεθόδου του Barnard σε έξι σημεία.

Βασικό μειονέκτημα είναι ότι δεν υπάρχουν μέτρα ελέγχου των αποτελεσμάτων, καθώς ο συντελεστής που επιστρέφεται από το νευρωνικό δίκτυο δεν έχει κάποια φυσική έννοια. Δεν αποτελεί δηλαδή μοντελοποίηση ενός φυσικού φαινομένου, αλλά προσπάθεια προσέγγισης ενός προβλήματος βελτιστοποίησης με χρήση νευρωνικών δικτύων. Σε περιπτώσεις εικόνων με ομοιογενή ένταση, όπου το παράθυρο 7x7 δεν επαρκεί, ο αλγόριθμος δεν είναι προσαρμόσιμος και ουσιαστικά πρέπει να εκπαιδευτεί εκ νέου, καταλήγοντας ουσιαστικά σε εκπαίδευση όλων των δυνατών μεγεθών παραθύρων.

2.9.9. Σταθεροί εκτιμητές (Robust Estimators)

Συνήθως στην ελαχιστοτετραγωνική συνταύτιση δεν χρησιμοποιείται πίνακας βαρών **P**, γιατί όλες οι παρατηρήσεις θεωρούνται ισοβαρείς. Για την εφαρμογή βαρών, λαμβάνεται υπόψη η απόσταση από το κεντρικό εικονοστοιχείο ή ο πίνακας μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας των παρατηρήσεων. Αυτός ο πίνακας εφαρμόζεται απευθείας ή μέσω κάποιων σχέσεων, ως βάρη στην επόμενη επανάληψη. Η δεύτερη αυτή περίπτωση εμφανίζεται στην διεθνή βιβλιογραφία με τον όρο σταθεροί εκτιμητές (robust estimators). Στις σχετικές μελέτες, κάθε ερευνητής προτείνει μια διαφορετική σχέση προσαρμογής του πίνακα μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας των παρατηρήσεων ως βάρη για την επόμενη επανάληψη (Calitz & Ruther 1996, Baltsavias 1991, Cross 1990, Pilgrim 1996).

Οι σταθεροί εκτιμητές χρησιμοποιούνται ως εύκολο αριθμητικό υποκατάστατο του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών, και κατά συνέπεια έχουν καλύτερη συμπεριφορά σε περιπτώσεις αόρατων περιοχών, σκιών και απότομων αλλαγών κλίσεων από τα απλά ελάχιστα τετράγωνα. Ο Pilgrim (1996) αναφέρει ότι ακόμα και η παρουσία ενός χονδροειδούς λάθους στις παρατηρήσεις επηρεάζει πολύ την λύση των ελαχίστων τετραγώνων. Σε περιπτώσεις σαν αυτές που αναφέρθηκαν παραπάνω, είναι περισσότερα του ενός τα εικονοστοιχεία που δημιουργούν πρόβλημα, οπότε η λύση (εάν συγκλίνει η επίλυση) θα είναι πιθανότατα λανθασμένη.

Στην περίπτωση που το επιθυμητό αποτέλεσμα είναι η εξομοίωση της μεθόδου του αθροίσματος των απόλυτων τιμών, τότε η διαγώνιος του πίνακα βαρών δίνεται από τη σχέση

$$W_i = \frac{1}{|u_i| + \varepsilon} \tag{2.50}$$

όπου u_i, είναι το υπόλοιπο της παρατήρησης από την προηγούμενη επανάληψη

ε, μία μικρή αυθαίρετη σταθερά για την αποφυγή της διαίρεσης με μηδέν.

2.9.10. Ύφεση (Relaxation)

Πρόκειται για μια διαδικασία η οποία θέτει σε κάθε υποψήφιο ομόλογο σημείο μία τιμή πιθανότητας σύμφωνα με ορισμένα κριτήρια καταλληλότητας και ενημερώνει επαναληπτικά αυτές τις τιμές, διαγράφοντας όσες είναι κάτω από ένα κατώφλι, ώστε τελικά σε κάθε σημείο στην εικόνα πρότυπο να αντιστοιχεί το πολύ ένα σημείο στην εικόνα ελέγχου, υλοποιώντας τη δέσμευση της μοναδικότητας. Σε κάθε επανάληψη η τιμή της πιθανότητας κάθε ζεύγους m-m' αυξάνεται αναλογικά με την συνέπεια (consistency) της παράλλαξης σε γειτονικά ομόλογα σημεία. Αναλυτική περιγραφή δίνεται από τους Ballard & Thompson (1980).

Η μέθοδος παίρνει το όνομα της από τις επαναληπτικές αριθμητικές μεθόδους που αντιγράφει. Πρόκειται για μια διαδικασία "από κάτω προς τα πάνω" (bottom-up) όπου χρησιμοποιεί αλληλοεξαρτώμενα μέτρα ομοιότητας με τους γείτονες. Έτσι με διαδοχικές επαναλήψεις το σύστημα οδηγείται σε κατάσταση ύφεσης (ηρεμίας) όταν έχει βρεθεί η σωστή συνταύτιση. Το πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η ανοχή της σε γεωμετρικές στρεβλώσεις, γεγονός που επιτυγχάνεται με τη χρήση τοπικών μέτρων ομοιότητας.

Οι Shao & Fraser (1998) παρουσίασαν μία μέθοδο στην οποία χρησιμοποιείται συνταύτιση πολλαπλών εικόνων, παράλληλα με επιπολική γεωμετρία, αλλά και χρήση μέτρων ομοιότητας και αρχικής πληροφορίας βάθους. Οι εικόνες συσχετίζονται αρχικά ανά ζεύγη και δημιουργούν μια αρχική επιφάνεια με χρήση πολλαπλών ακτίνων. Στη συνέχεια εφαρμόζονται συνολικά κριτήρια αξιολόγησης και διαδικασία ύφεσης για την δημιουργία ενός δικτύου πολλαπλών ακτίνων, που συμπεριλαμβάνει ελέγχους ασαφειών. Στο τελικό στάδιο ελέγχου, η δημιουργία συνοχής ανάμεσα στα σημεία ενδιαφέροντος στην ίδια εικόνα ξεκαρίζει τις ασάφειες. Μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι χρησιμοποιεί αρχική πληροφορία σχετικά με το βάθος της σκηνής.

Κυριότερες εργασίες είναι των Hummel & Zucker (1983), Ranade & Rosenfeld (1980), Shao et al. (1998) καθώς και η σύγκριση τεχνικών ύφεσης από τον Price (1985).

2.9.11. Χρήση ασαφούς λογικής (Fuzzy logic)

Η ασαφής λογική ως διαδικασία διαμόρφωσης αποφάσεων διαφοροποιείται από την κλασική δυαδική λειτουργία εάν-τότε (if-then) με χρήση ποσοτικών περιγραφών όπως μικρό, χαμηλό, μεσαίο, αρκετό και πολύ (small, low, medium, large, high) και επιλογή διαδικασιών μέσω ενός πλήρη πίνακα συνδυασμών των παραπάνω.

Η ασαφής λογική χαρακτηρίζει κάθε κριτήριο που λαμβάνει μέρος στην διαδικασία διαμόρφωσης αποφάσεων με μία διακριτή περιγραφή σε βαθμίδες. Στην συνέχεια χρησιμοποιείται ένας προκαθορισμένος πλήρης πίνακας όλων των πιθανών συνδυασμών κριτηρίων και βαθμίδων ώστε να γίνει η τελική επιλογή. Η μέθοδος πλεονεκτεί στο γεγονός ότι μπορεί να αντιμετωπίσει πολύπλοκες καταστάσεις με αρκετές παραμέτρους, αλλά εξακολουθεί να χρησιμοποιεί διακριτές τιμές και προϋπάρχουσα εμπειρία (σε σύγκριση με τα νευρωνικά δίκτυα).

Ασαφής λογική έχει χρησιμοποιηθεί στην εργασία των Kim et al. (1998) για τον εντοπισμό και χαρακτηρισμό προβληματικών περιοχών σε δορυφορικές εικόνες. Ο βασικός μηχανισμός συνταύτισης

χρησιμοποιεί την μέθοδο των Otto & Chau (1989) και Gruen (1985), τροποποιημένη κατά Kim et al. (1997). Η μέθοδος αυτή αφήνει κενά στο ΨΜΕ σε περιοχές 'οπου δεν μπορεί να βρει σημεία, γιατί η πρόοδός της βασίζεται σε προηγούμενες επιτυχείς συσχετίσεις. Το γεγονός αυτό την κάνει ιδιαίτερα ευαίσθητη σε αποτυχίες. Έτσι ο βασικός αλγόριθμος ενισχύεται με ασαφή λογική, γεγονός το οποίο οδηγεί σε χαρακτηρισμό περισσότερων συσχετίσεων ως περισσότερο ή λιγότερο πιθανών και κατά συνέπεια μειώνει εν τέλει πολύ τις περιοχές χωρίς ομόλογα σημεία. Η μέθοδος Otto-Chau έχει το πλεονέκτημα ότι δεν δίνει αποτελέσματα σε αμφίβολες περιοχές (με μεγάλη μάλιστα ασφάλεια), με αποτέλεσμα ο χρήστης να γνωρίζει τις περιοχές με προβλήματα και να επεμβαίνει με χειρωνακτική συλλογή σημείων. Με τη χρήση ασαφούς λογικής οι περιοχές χωρίς πληροφορία μειώνονται και κατά συνέπεια μειώνεται και ο κόπος του χειριστή, ενώ παράλληλα διατηρείται η αξιοπιστία.

2.9.12. Μεμονωμένες παραλλαγές

Κατά καιρούς παρουσιάστηκαν πολλές ενδιαφέρουσες εφαρμογές με χρήση πρόσθετων πληροφοριών. Οι πληροφορίες αυτές θα μπορούσαν να χωριστούν σε κατηγορίες, όπως καθαρά ραδιομετρικές (εσωτερικές των εικόνων), δευτερεύουσες (αυτόματος σχετικός μεταξύ των εικόνων), εξωτερικές (συνταύτιση στον χώρο του αντικειμένου με απευθείας συντεταγμένες στο πραγματικό χώρο) και επικουρικές (χρησιμοποιούν επικουρική πληροφορία όπως ανίχνευση ακμών, επιπολική γεωμετρία, σημεία φυγής κ.λπ., τα οποία όμως μπορούν να χαρακτηριστούν ως πληροφορία προκύπτουσα από την ίδια την εικόνα).

Οι Lu & Kubik (2000) παρουσίασαν μία εφαρμογή όπου το ψηφιακό μοντέλο που υπολογίζεται αφορά το φυσικό έδαφος. Πρόκειται για έρευνα στην ψηφιακή συνταύτιση που ασχολείται κυρίως με την αξιοπιστία του ΨΜΕ, αφαιρώντας περιοχές με δενδροκάλυψη και σπίτια που δεν αποτελούν στοιχεία του ΨΜΕ.

Ο Tsay (2000) παρουσίασε μία αρχική προσέγγιση σχετικά με την χρήση 'κυματιδίων' (wavelet) σε ΨΜΕ. Το μαθηματικό μοντέλο των κυμάτων, ανάλογα με τον βαθμό του, μπορεί να προσεγγίσει πολύ καλά επιφάνειες με ασυνέχειες. Ο συγγραφέας υποστηρίζει ότι μόνο με χρήση κλασματικής γεωμετρίας (fractals) είναι δυνατή η δημιουργία αληθούς ΨΜΕ. Η προσέγγιση αυτή δίνει λύση στο πρόβλημα των δειγματοληπτικών ΨΜΕ, όπου η επιφάνεια μοντελοποιείται με χρήση περιορισμένου αριθμού σημείων σε τακτές αποστάσεις. Ως περιοχή μελέτης επιλέχθηκε ένα μικρό τμήμα με τέσσερα κτίρια και η μοντελοποίηση ήταν ικανοποιητική. Ο συγγραφέας αναφέρει ότι χρησιμοποιεί ελαχιστοτετραγωνική συνταύτιση και την συνθήκη της συγγραμμικότητας (εμπροσθοτομία) για τον υπολογισμό.

Η μέθοδος αυτή αντιμετωπίζει την ψηφιακή συνταύτιση και την εξαγωγή χαρακτηριστικών σε δύο ανεξάρτητα αλλά ταυτόχρονα στάδια. Η συγχώνευση των πληροφοριών γίνεται σε τρίτο στάδιο. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η εξαγωγή χαρακτηριστικών από τον χάρτη παράλλαξης, η οποία σε συνδυασμό με τα απλά χαρακτηριστικά που έχουν εξαχθεί από τις εικόνες οδηγούν στην εύρεση σπιτιών και δέντρων και στην συνέχεια αφαίρεσή τους από το τελικό ΨΜΕ. Στην ανάλυση του χάρτη παράλλαξης χρησιμοποιεί εξαγωγή γραμμών, και εντοπίζει κτίρια (με ιδιαιτέρως ικανοποιητικά αποτελέσματα) με ανάλυση και διαχωρισμό των περιοχών αυτών, ανάλυση υφής με πίνακες συνεμφάνισης (co-occurence matrix), μορφολογικά χαρακτηριστικά, ανάλυση ιστογράμματος και εύρεση κύριων διευθύνσεων σε υποπαράθυρα.

Καταλήγει τονίζοντας ότι με την χρήση τεχνικών ανάλυσης εικόνας που επιτρέπει την εύρεση και αφαίρεση σπιτιών και δέντρων είχε πολύ καλά αποτελέσματα, σε σχέση πάντα με την πολυπλοκότητάς της εικόνας. Η κατηγοριοποίηση των περιοχών που έχουν βρεθεί ξεπερνάει την αδυναμία των πινάκων συνεμφάνισης να "κατανοήσουν" και συμπεριλάβουν επαναλαμβανόμενα σχήματα υφής. Η μέθοδος έχει επιτυχία ακόμα και εάν οι οροφές είναι μαύρες, αλλά εάν η σκεπή δεν έχει κανονικό σχήμα δεν είναι ακριβής ο εντοπισμός της.

Αυτό επιτυγχάνεται με την αυτόματη ανίχνευση και αφαίρεση από το μοντέλο τεχνητών αντικειμένων. Η αρχή αυτή βασίζεται στην κανονικότητα των αντικειμένων και κατά συνέπεια μειονεκτεί στα ακανόνιστα αντικείμενα. Ουσιαστικά πρόκειται για σύνθεση πληροφορίας που προκύπτει από την συνταύτιση εικόνων, εξαγωγή επιφανειών από την εικόνα βάθους (disparity map) και την εξαγωγή επιφανειών από την κανονική εικόνα με παράλληλη επεξεργασία υφής και ταξινόμηση (texture analysis and classification) χρησιμοποιώντας πίνακες συνεμφάνισης (co-occurrence matrices). Τα αποτελέσματα των δύο αυτών παράλληλων και ανεξάρτητων διαδικασιών συντίθενται για την δημιουργία του τελικού αποτελέσματος.

Η εργασία του Sun (1997, 2001, 2002) χρησιμοποιεί δυναμικό προγραμματισμό δύο σταδίων σε συνδυασμό με κατάτμηση επιφανειών. Ο πυρήνας του αλγορίθμου χρησιμοποιεί συντελεστή συσχέτισης σε επιμέρους επιφάνειες που έχουν προκύψει από κατάτμηση. Οι επιφάνειες αυτές του στερεοσκοπικού ζεύγους αντιπροσωπεύουν κύβους επί του χώρου του αντικειμένου, ορίζοντας ουσιαστικά έτσι όρια

παράλλαξης για κάθε επιμέρους επιφάνεια επί της εικόνας. Ο συγγραφέας δίνει ιδιαίτερο βάρος στην ταχύτητα του αλγορίθμου (που όμως εφαρμόζεται σε πολύ μικρές εικόνες), χωρίς όμως να υποβιβάζει τα αποτελέσματα που είναι ικανοποιητικά από πλευράς πληρότητας και αξιοπιστίας, αλλά έχουν υψηλό βαθμό εξομάλυνσης μικρότερων χαρακτηριστικών και στρογγυλοποίησης των ακμών.

Οι Sakamoto et al. (2002) παρουσίασαν μία εργασία βασισμένη στην θεωρία ενίσχυσης της σύμπτωσης (coincidence enhancement), η οποία με την σειρά της χρησιμοποιείται σαν μηχανισμός αυτόματης οργάνωσης στα νευρωνικά δίκτυα. Η θεωρία αυτή δημιουργεί πολύ ομαλές επιφάνειας, οπότε οι συγγραφείς την τροποποίησαν ώστε να κάνει συνταύτιση ακμών και επιπλέον να χρησιμοποιεί αυτές τις ακμές ως γραμμές αλλαγής κλίσης. Τα αποτελέσματα αφορούν κυρίως αστικές περιοχές, με κτίρια των οποίων οι οροφές είναι επίπεδες. Οι συγγραφείς αναφέρουν ότι είναι δυνατή η προσαρμογή και εφαρμογή του αλγορίθμου και σε περιπτώσεις με διαφορετικές σκεπές (σκεπές με διπλή κλίση κ.λπ.).

Οι Patias et al. (2002) χρησιμοποιούν μία εντελώς διαφορετική τεχνική για εύρεση ομόλογων σημείων, επί συμπλεκόμενων (interlaced) εικόνων, που χρησιμοποιούνται για στερεοσκοπική παρατήρηση. Πρόκειται για έναν τροποποιημένο αλγόριθμό εστίασης ψηφιακών εικόνων. Η συμπλεκόμενη εικόνα αλλάζει σταδιακά, μεταβάλλοντας την παράλλαξη μεταξύ δεξιάς και αριστερής εικόνας. Σε κάθε στάδιο η εικόνα εξομαλύνεται με ένα φίλτρο μέσου όρου και υπολογίζεται το απόλυτο της διαφοράς όλων των εικονοστοιχείων από το προηγούμενο στάδιο. Όταν αυτή η διαφορά ελαχιστοποιείται, τότε πρόκειται για την βέλτιστη θέση των δύο εικόνων που δημιουργούν την πεπλεγμένη (interlaced) εικόνα, άρα και η παράλλαξη είναι σωστή. Ο αλγόριθμος είναι πολύ γρήγορος και μπορεί να πετύχει ακρίβεια μέχρι 0.1 του εικονοστοιχείου με κατάλληλη μεγέθυνση της αρχικής εικόνας, αφότου έχει βρεθεί το ομόλογο σημείο και στις δύο.

Οι Mustaffar & Mitchell (2001) χρησιμοποιούν επιφάνειες πρώτου και δευτέρου βαθμού για την προσέγγιση της επιφάνειας που καλύπτει το παράθυρο συνταύτισης. Η υπόθεση αυτή βασίζεται στο γεγονός ότι ο αφινικός μετασχηματισμός δεν αρκεί για μοντελοποίηση της επιφάνειας που απεικονίζεται στο παράθυρο-πρότυπο στην περίπτωση που το παράθυρο αυτό είναι μεγάλο και οι στροφές μεταξύ των φωτογραφιών επίσης μεγάλες. Η μέθοδος εφαρμόστηκε σε επίπεδη, κυλινδρική και μία πιο πολύπλοκη συνεχή επιφάνεια, παράλληλα με την κλασική μέθοδο με αφινικό μετασχηματισμό. Οι συγγραφείς καταλήγοντας συμπεραίνουν ότι η νέα μέθοδος δίνει καλύτερα αποτελέσματα από πλευράς ακρίβειας, αξιοπιστίας και επαναλήψεων. Μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι χρειάζονται αρχικές τιμές για την προσέγγιση της επιφάνειας, ενώ παραμένουν ερωτήματα σχετικά με το μέγεθος του παραθύρου και την επιλογή μαθηματικού μοντέλου (επιφάνεια πρώτου ή δεύτερου βαθμού).

Από τις πιο ενδιαφέρουσες εφαρμογές αυτόματου ψηφιακού μοντέλου με χρήση ελαχιστοτετραγωνικής συνταύτισης είναι εκείνη των Li & Gruen (2004) που αναφέρεται σε γραμμικούς σαρωτές από αεροπλάνο (STARIMAGE). Το αξιόλογο της εφαρμογής είναι ότι χρησιμοποιεί μια πληθώρα χαρακτηριστικών, όπως ισχυρή προ-επεξεργασία της εικόνας για ενίσχυση αντιθέσεων (Wallis), επιπολική γεωμετρία, πυραμίδες, συνταύτιση χαρακτηριστικών και γκρίζων τόνων, συνταύτιση ακμών και σημείων σε διατεταγμένες θέσεις και πολλαπλές εικόνες (MPGC). Παρόλο που η εφαρμογή έχει πολλά χαρακτηριστικά αλλά και χρήση πολλαπλών εικόνων, οι συγγραφείς παραδέχονται ότι εξακολουθούν να υπάρχουν χονδροειδή σφάλματα παρόλο που χρησιμοποιούνται πολλές εικόνες και θα έπρεπε να μειώνουν την συχνότητα εμφάνισης χονδροειδών λαθών.

2.10. Εφαρμογές

Κυριότερες εφαρμογές της συνταύτισης εικόνων αφορούν την δημιουργία ΨΜΕ, την εύρεση σημείων σύνδεσης μεταξύ εικόνων για σχετικό προσανατολισμό και αεροτριγωνισμό, την παρακολούθηση στόχων σε διαδοχή εικόνων video και την μέτρηση εικοσημάτων ή προσημασμένων στόχων για εφαρμογές βιομηχανικού ελέγχου.

Όλα τα παραπάνω αφορούν το πρόβλημα της εύρεσης ομολόγων σημείων και όχι την δημιουργία ενός Ψηφιακού μοντέλου εδάφους χωρίς δέντρα και κτίρια, που δεν αφορά την παρούσα εργασία. Εργασίες που ξεκινούν με την ύπαρξη ενός καλού ΨΜΕ και συνεχίζουν με διάφορες διαδικασίες και μεθόδους να αφαιρέσουν ανθρωπογενείς παρεμβάσεις και δέντρα (Baillard et al., 1999) μπορούν ίσως να θεωρηθούν επεκτάσεις του αντικειμένου της παρούσας.

2.10.1. Προσανατολισμοί

2.10.1.1. Εσωτερικός προσανατολισμός και εντοπισμός στόχων

Εδώ το πρότυπο προέρχεται από βιβλιοθήκη προτύπων (ιδεατά ή φυσικά) και αφορά προσημασμένους στόχους ή εικονοσήματα σε αεροφωτογραφίες (Atkinson, 1996). Στις βιομηχανικές εφαρμογές είναι εφικτός ο πλήρης αυτοματισμός γιατί το σύστημα λειτουργεί υπό συγκεκριμένες, ελεγχόμενες κυρίως συνθήκες, γεγονός που επιτρέπει την βελτιστοποίησή του (Karrara, 1989)

Έτσι υπάρχει η δυνατότητα χρήσης ανακλαστικών στόχων και η φωτογράφηση να λάβει χώρα σε συνθήκες χαμηλού φωτισμού, ώστε στην τελική φωτογραφία να φαίνονται μόνο οι στόχοι ως φωτεινά σημεία σε μαύρη εικόνα.

Ειδική εφαρμογή είναι και η χρήση τροποποιημένου βαγονιού με βίντεο κατά μήκους σιδηροδρομικών γραμμών για ανίχνευση εμποδίων (Boochs, 1999). Σε αυτή την περίπτωση η συνταύτιση εικόνων χρησιμοποιείται για τον αυτόματο προσανατολισμό κάθε ζεύγους εικόνων από το βίντεο. Οι στόχοι είναι προσημασμένοι και η περιοχή τους σε κάθε εικόνα είναι αναμενόμενη, οπότε η όλη διαδικασία είναι εύκολο να αυτοματοποιηθεί.

2.10.1.2. Σχετικός προσανατολισμός

Στην εφαρμογή του Li (1988) χρησιμοποιούνται σταθεροί εκτιμητές (robust estimators) για την τελική συνταύτιση των σημείων και επίλυση του σχετικού προσανατολισμού, προκείμενου να εξαλειφθούν οι ύποπτες αντιστοιχίσεις, που επηρεάζουν την λύση. Ο συγγραφέας καταλήγει υποστηρίζοντας ότι η χρήση εύρωστων εκτιμητών που έχει δυνατότητα εντοπισμού μεγάλου ποσοστού σφαλμάτων είναι καλύτερη στην φάση του σχετικού προσανατολισμού από την διαδικασία της ύφεση (relaxation), όπου δεν μπορούν να εντοπισθούν τα σφάλματα.

Οι Kanazawa & Kanatani (2002) προτείνουν μία μέθοδο εύρεσης ομόλογων σημείων σε εικόνες με μεγάλες βάσεις και μεγάλες στροφές, και κατά συνέπεια μεγάλες διαφορές. Οι συναρτήσεις ενέργειας που χρησιμοποιούνται αφορούν την ελαχιστοτετραγωνική συνταύτιση εντάσεων, την εμπιστοσύνη της συνταύτισης, την συνέχεια της επιφάνειας που υποθετικά δεν πρέπει να έχει πολύπλοκα τρισδιάστατα αντικείμενα (αλλά στην πραγματικότητα είναι σαφώς πολυπλοκότερα από ό,τι μία αεροφωτογραφία) και την ομαλότητα της επιφάνειας. Τα κριτήρια αυτά περιγράφονται ως "αδύνατα", και εν συνεχεία επιλύεται ο σχετικός προσανατολισμός με την μορφή θεμελιώδους πίνακα και ουσιαστικά εφαρμόζεται επιπολική γεωμετρία. Η εναπομένουσα γ-παράλλαξη χαρακτηρίζεται ως "δυνατό" κριτήριο αφού με χρήση κατωφλιού απορρίπτονται όσα ζεύγη δεν το πληρούν. Τελευταίο κριτήριο είναι η μοναδικότητα που οδηγεί και στην τελική λύση. Χαρακτηριστικό της μεθόδου είναι ότι χωρίζει τα πιθανά ζεύγη σημείων σε "ορατά" και "υπό καταστολή" (suppressed). 'Ορατά' είναι εκείνα τα ζεύγη που έχουν υψηλή ενέργεια και περνούν το κριτήριο της μοναδικότητας. Στη συνέχεια η ενέργεια όλων των σημείων ανανεώνεται με βάση τα "ορατά" ζεύγη. Έτσι στην επόμενη επανάληψη τα ζεύγη μπορεί να αλλάξουν κατάσταση. Οι συγγραφείς υποστηρίζουν ότι η μέθοδος λειτουργεί καλύτερα από την απλή RANSAC και ότι έχει εφαρμογή σε μεγάλες βάσεις, αλλά τα παραδείγματα που παρουσιάζουν αφορούν εικόνες με μικρές σχετικά διαφορές και πολλά χαρακτηριστικά σημεία ομοιογενώς κατανεμημένα σε όλη την έκταση της εικόνας, κάτι που βοηθάει πολύ την διαδικασία.

2.10.1.3. Δημιουργία ψηφιακών μοντέλων εδάφους

Η εφαρμογή αυτή συνιστά ένα ιδιαίτερα απαιτητικό πρόβλημα και ευρύτατο ερευνητικό αντικείμενο, ακριβώς επειδή δεν αναφέρεται σε προσημασμένους στόχους και κατά συνέπεια πρέπει να είναι σε θέση να αντιμετωπίσει την γενική περίπτωση. Επίσης πρέπει να συλλέγει όσο γίνεται περισσότερα σημεία επί του στερεοσκοπικού μοντέλου και με ομοιόμορφη κατανομή. Παράλληλα θα πρέπει έχει καλή αξιοπιστία, γεγονός που όμως είναι σε αντίθεση με το πλήθος των σημείων που πρέπει να συλλέξει.

2.10.1.4. Μονοεικονική απόδοση

Σε αυτή την περίπτωση η συνταύτιση χρησιμοποιείται για να ακουμπάει αυτόματα η ιπτάμενη μάρκα πάνω στο έδαφος, χωρίς ο χρήστης να είναι υποχρεωμένος να την ανεβοκατεβάζει μόνος του. Είναι προφανές ότι σε αυτή την περίπτωση η παρατήρηση δεν είναι απαραίτητο να είναι στερεοσκοπική, διευκολύνοντας πολύ την απόδοση. Αν και η συγκεκριμένη δυνατότητα προσφέρεται από σχεδόν όλα τα εμπορικά πακέτα, δεν χρησιμοποιείται ευρέως αφού σε ασυνέχειες παρουσιάζει προβλήματα.

2.11. Περιθώρια βελτίωσης

Θα περίμενε κανείς ότι τα περιθώρια βελτίωσης μιας μεθόδου που ερευνάται για δεκαετίες θα είναι στενά. Παρ' όλα αυτά όχι μόνο είναι υπαρκτά, αλλά "η συνταύτιση εξακολουθεί να αποτελεί ερευνητικό αντικείμενο" (Harvey & Mustaffar, 2000). Ο Heipke (1996) σημειώνει ότι "η ψηφιακή συνταύτιση είναι ακόμα ένα από τα πιο προκλητικά αντικείμενα στην φωτογραμμετρική έρευνα και εξέλιξη". "Οι αλγόριθμοι ψηφιακής συνταύτισης δεν έχουν επιτύχει απόλυτη αξιοπιστία στην πραγματικότητα" (Baltsavias et al., 1996). Σε περιπτώσεις επίγειων λήψεων η αξιοπιστία των αλγορίθμων συνήθως μειώνεται περαιτέρω.

Η βελτίωση μπορεί να επιτευχθεί είτε με χρήση εξυπνότερων αλγορίθμων που βελτιώνουν την αξιοπιστία (Heipke, 1997) είτε με την φιλοσοφία των "χαμηλού επιπέδου αυτοματισμών να αντικαθιστούν την ευφυΐα με περίσσεια μετρήσεων" (Ackerman, 1996).

Στον πίνακα 2.1 φαίνονται τα βασικά προβλήματα της συνταύτισης και οι πιθανές λύσεις τους, οι οποίες όμως δεν αποτελούν πανάκεια.

Πρόβλημα	**Πιθανή αντιμετώπιση**
Πιθανότητα πολλαπλών λύσεων στην γειτονιά και πιθανή σύγκλιση σε λάθος σημείο, ειδικά σε περίπτωση επαναλαμβανόμενων προτύπων	Καλύτερες αρχικές τιμές, με χρήση συνταύτισης χαρακτηριστικών Χρήση επιπολικής γεωμετρίας ή απλός έλεγχος και φιλτράρισμα της y παράλλαξης επί των ομολόγων στο τέλος της συνταύτισης επί των εικόνων
Παραδοχή ότι όλα τα εικονοστοιχεία έχουν την ίδια παράλλαξη (ή αδυναμία μοντελοποίησης από το γεωμετρικό μοντέλο)	Χρήση αθροίσματος απόλυτων διαφορών ή άλλων πιό σύνθετων μεθόδων
Χρήση λανθασμένου εσωτερικού και σχετικού προσανατολισμού (στις περιπτώσεις που χρησιμοποιείται επιπολική γεωμετρία)	Χρήση εναλλακτικών μεθόδων και όχι επιπολικής γεωμετρίας Έλεγχοι για την ακρίβεια της επίλυσης των προσανατολισμών
Περιοχές που είναι ορατές μόνο σε μία εκ των δύο εικόνων και κατά συνέπεια καθιστούν αδύνατη την συνταύτιση	Χρήση πολλαπλών φωτογραφιών
Χαμηλός λόγος σήματος προς θόρυβο που μπορεί να οδηγήσει σε αργή σύγκλιση ή σε σύγκλιση σε τοπικό και όχι ολικό ελάχιστο	Ενίσχυση των εικόνων με προ επεξεργασία Χρήση επιπολικής γεωμετρίας ή εναλλακτικών μεθόδων Χρήση μεγαλύτερων παραθύρων που περιέχουν περισσότερη πληροφορία
Αξιολόγηση αποτελεσμάτων, ακρίβεια και αξιοπιστία	Επιπολική γεωμετρία ή εναλλακτικές Συνταύτιση από την εικόνα πρότυπο στην εικόνα ελέγχου και από την εικόνα ελέγχου στην εικόνα πρότυπο

Πίνακας 2.1. Προβλήματα της συνταύτισης και πιθανές λύσεις.

Όπως έχει προαναφερθεί έχουν γίνει πολλές προσπάθειες επίλυσης του προβλήματος της συνταύτισης με πολύ διαφορετικές προσεγγίσεις (νευρωνικά δίκτυα, ασαφής λογική, δυναμικός προγραμματισμός, ύφεση, εύρωστοι εκτιμητές, τομές γραφημάτων κλπ), μερικές από τις οποίες ήταν επιτυχείς και άλλες λιγότερο.

Βασικό πρόβλημα παραμένει ο αξιόπιστος εντοπισμός προβληματικών περιοχών. Αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί είτε με την επιστροφή σημείων σε αυτή την περιοχή και επισήμανσή τους ως προβληματικών είτε με την ύπαρξη κενών σε αυτές τις περιοχές του ΨΜΕ. Οι αλγόριθμοι παρουσιάζουν αδυναμία σε αυτού του είδους τους ελέγχους, δημιουργώντας σημαντικές καθυστερήσεις στην παραγωγή αφού ο χειριστής πρέπει να ελέγξει οπτικά όλο το μοντέλο, ανεξαρτήτως των εσωτερικών μέτρων του

αλγόριθμου. Ο Krystek (1991) αναφέρει ότι μπορούν να "χρησιμοποιηθούν κριτήρια με βάρος ανά τμήμα του ΨΜΕ και εν συνεχεία να υπερτεθούν επί των εικόνων φανερώνοντας περιοχές με καλή και χαμηλή αξιοπιστία. Αυτό χρησιμεύει ως αρχικός ποιοτικός έλεγχος". Οι Baltsavias et al. (1996) και Παπασάικα (2002) στις εργασίες τους σχετικά με έλεγχο εμπορικών πακέτων για την αυτόματη παραγωγή ΨΜΕ, αναφέρουν ότι τα μέτρα που επιστρέφουν οι αλγόριθμοι σχετικά με την ποιότητα του ΨΜΕ είναι αναξιόπιστα, αφού οι "καλές" περιοχές μπορεί να είναι λανθασμένες και οι "κακές" περιοχές να είναι σωστές. Οι Karras et al. (1998) αναφέρουν ότι το 80% των σημείων ενός αυτόματου ΨΜΕ (άμεσα ή έμμεσα) ήταν καλύτερα από ±2.6 σ_h, όπου σ_h η ακρίβεια του παρατηρητή. Επίσης παρατηρούν ότι το 70% των σημείων προέρχονταν από συνταύτιση, ενώ το 30% από παρεμβολή. Αυτό φυσικά εξαρτάται άμεσα από το είδος των εικόνων, ενώ σε κάθε περίπτωση ο χειρωνακτικός έλεγχος των αποτελεσμάτων είναι απαραίτητος γιατί τα μέτρα αυτοελέγχου δεν είναι ακόμα καλά. Ο Walker (1999), μεταξύ άλλων, αναφέρει "Η αυτόματη δημιουργία ψηφιακών μοντέλων εδάφους είναι ένα αναγνωρισμένο και σταθερό κομμάτι της ψηφιακής φωτογραμμετρίας. Οι δυσκολίες της συνταύτισης σε ορισμένου είδους εδάφη και με ορισμένου είδους φωτογραφίες είναι αναμενόμενες. Η ανάγκη χειρωνακτικών διορθώσεων είναι γνωστή και μερικά πακέτα προσφέρουν καλά εργαλεία. .... και οι προμηθευτές δεν αναμένουν μια λύση-πανάκεια".

"Η ψηφιακή συνταύτιση αν και έχει διερευνηθεί για δεκαετίες, αποτελεί ακόμα ένα ερευνητικά προκλητικό αντικείμενο" (Koch, 2003) και κατά συνέπεια υπάρχουν ακόμα πολύ μεγάλα περιθώρια βελτίωσης.

3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

3.1. Μέγεθος και σχήμα παραθύρου

Το μέγεθος του παραθύρου συνταύτισης είναι ένα από τα βασικότερα ερωτήματα που αντιμετωπίζεται στην παραγωγή αυτόματων ΨΜΕ. "Αυτό συμβαίνει επειδή χρησιμοποιούμε αποκλειστικά και μόνο μετρήσεις επί των εικόνων για να αναπαραστήσουμε λεπτομέρειες (που προϋποθέτουν μικρό μέγεθος παραθύρου) με μεγάλη αξιοπιστία (που χρειάζεται μεγάλο μέγεθος παραθύρου για να υποστηριχθεί)" (Koch, 2003). Οι Fox et al. (2001) συμπληρώνουν ότι όσο αυξάνει το μέγεθος του παραθύρου υποβιβάζεται η ακρίβεια και ως εκ τούτου έχει μεγάλη σημασία η επιλογή του σωστού μεγέθους. Οι Kanade & Okutomi (1994) συμφωνούν και σημειώνουν ότι η συμμετοχή επιπλέον εικονοστοιχείων στο παράθυρο μπορεί να μεγαλώνει αντί να μειώνει το σφάλμα υπολογισμού της παράλλαξης x. Σύμφωνα με τον Gruen (1996) το μέγεθος του παραθύρου είναι ιδιαίτερης σημασίας και πρέπει να περιέχει επαρκές σήμα.

Υπάρχουν δύο τρόποι αντιμετώπισης του προβλήματος. Ο πρώτος είναι η επιλογή άλλου σημείου για συνταύτιση και ο δεύτερος να μεγαλώσει το παράθυρο, ώστε να συμπεριλάβει πληροφορία που ήταν κοντά αλλά όχι εντός του παραθύρου. Η αύξηση του μεγέθους μπορεί να γίνεται κλιμακωτά έως ότου συμπεριληφθεί αρκετό σήμα.

Για να ελαχιστοποιηθεί η περίπτωση λανθασμένης εύρεσης θα πρέπει εντός της περιοχής ελέγχου να υπάρχει μόνο ένα τοπικό ελάχιστο ή μία δυνατή αντιστοίχηση. Εφόσον χρησιμοποιούνται οι τιμές του γκρίζων τόνων ως οντότητες συνταύτισης, η αβεβαιότητα μειώνεται όσο αυξάνει το πλήθος των μετρήσεων, δηλαδή όσο αυξάνει το μέγεθος του παραθύρου. Δυστυχώς αυξάνοντας το μέγεθος του παραθύρου μειώνεται η ισχύς της παραδοχής του αφινικού μετασχηματισμού, που υποθέτει παράλληλες ακτίνες για τόσο μικρή έκταση. Το αποτέλεσμα είναι τα ΨΜΕ που προκύπτουν με μεγάλα παράθυρα να είναι περισσότερα ομαλοποιημένα (smoothed) σε σχέση με αντίστοιχα που έχουν γίνει με μικρότερα και παρουσιάζονται πιο λεπτομερή. Ιδανική ισορροπία δεν υπάρχει και το πρόβλημα ανάγεται στον συνδυασμό των αντικρουόμενων παραμέτρων για την εύρεση του βέλτιστου μεγέθους.

Ο Kraus (1997) σημειώνει ότι δύσκολα μπορεί να βρεθεί ενιαίο μέγεθος παραθύρου για όλη την εικόνα. Όσο μεγαλύτερο είναι το παράθυρο τόσο εξομαλύνεται η τελική επιφάνεια, ενώ όσο μικραίνει μειώνεται η αξιοπιστία της συνταύτισης. Διαδικασίες που προσαρμόζουν το μέγεθος σύμφωνα με το περιεχόμενο του παραθύρου ή ανάλογα με την συμπεριφορά των επαναλήψεων (αργή σύγκλιση ή ακόμα και απόκλιση) είναι οι καλύτερες λύσεις. Προτείνει για μέγεθος παραθύρου σε αεροφωτογραφία με αρκετό περιεχόμενο το 15x15, ενώ για ανάλογες εικόνες με θόρυβο ή μεγάλες ραδιομετρικές διαφορές 21x21 ή μεγαλύτερο. Σε περιπτώσεις με χρήση πολλαπλών φωτογραφιών το μέγεθος του παραθύρου μπορεί να μειωθεί έως και 3x3 (Paparoditis et al., 2000).

Στην βιβλιογραφία αναφέρεται ότι το χρησιμοποιούμενο μέγεθος παραθύρου κυμαίνεται από 3x3 έως 31x31 (Veksler, 2001), 16x16 (Rosenholm, 1987), 21x21 Angleraud et al. (1992), με βέλτιστα εκείνα μεταξύ 20x20 έως 30x30 για ακρίβεια, και μεγαλύτερα για αξιοπιστία (Rosenholm, 1987). Οι Fox et al. (2001) μετά από δοκιμές με διαφορετικά μεγέθη παραθύρων σημειώνει ότι το καλύτερο μέγεθος για την περίπτωση παγετώνων σε φωτογραφίες 1:30000 και 30μm μέγεθος εικονοστοιχείου είναι 20x20. Παρατηρεί επίσης χρήση μεγαλύτερων παραθύρων, χειροτερεύει πολύ την ακρίβεια του ΨΜΕ και ότι οι υπόλοιπες παράμετροι δεν βελτιώνουν σημαντικά το ΨΜΕ σε περίπτωση που η συνταύτιση μπορεί να λειτουργήσει καλά. Σε δύσκολες περιπτώσεις κάθε παράμετρος παίζει σημαντικό ρόλο.

Η ελαχιστοτετραγωνική συνταύτιση αποτυγχάνει σε παράθυρα:

1.με ομοιόμορφους (ομοιογενείς) τόνους και μικρούς στόχους, όπου η λύση είναι ασθενής ή δεν συγκλίνει καθόλου. Συνήθως τέτοια φαινόμενα συνοδεύονται από αργή σύγκλιση.
2.με πολλές ακμές αλλά πολύ ανομοιόμορφα πρότυπα, όπου δεν υπάρχει η απαραίτητη ομοιότητα για σύγκλιση.
3.με επαναλαμβανόμενα πρότυπα, όπου η πιθανότητα σύγκλισης σε λάθος λύση είναι μεγάλη. Τέτοιου είδους φαινόμενα περιορίζονται δραματικά έως και εξαλείφονται με χρήση επιπολικής γεωμετρίας.
Όλες οι παραπάνω περιπτώσεις μπορούν να αντιμετωπισθούν με αύξηση του μεγέθους του παραθύρου συνταύτισης (Gruen, 1996).

Μερικά μεγέθη που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως κριτήρια για το μέγεθος του παραθύρου είναι τα

εξής (Schenk, 1999):

Αυτο-συσχέτιση (autocorrelation). Εάν η εφαρμογή του συντελεστή συσχέτισης και στα γειτονικά εικονοστοιχεία είναι υψηλή τότε ενδεχομένως να υπάρχουν επαναλαμβανόμενα πρότυπα, γεγονός που αποδυναμώνει το κριτήριο της μοναδικότητας.

Μεταβλητότητα (variance). Το στατιστικό αυτό μέτρο αποδίδει την "διαφορετικότητα" των τιμών των γκρίζων τόνων και αποτελεί ένα καλό κριτήριο.

Εντροπία. Η εντροπία είναι μέγεθος που μετρά την τυχαιότητα ενός συνόλου τιμών. Ως εκ τούτου υψηλή τιμή εντροπίας σημαίνει ότι υπάρχει σημαντική πληροφορία μέσα στο παράθυρο.

Συντελεστές Förstner. Ο τελεστής Förstner χρησιμοποιεί δύο μεγέθη για να εντοπίσει σημεία κατάλληλα για συνταύτιση έντασης. Το ένα αφορά την "ισχύ" του σημείου και το δεύτερο το σχήμα του (βλ. ενότητα 3.1.6.3)

Η αυτο-συσχέτιση, η μεταβλητότητα και η εντροπία αποτελούν μεγέθη τα οποία δεν προσμετρούν την χωρική κατανομή των εικονοστοιχείων στο παράθυρο και απλώς αντιμετωπίζουν όλα τα εικονοστοιχεία ως τιμές. Οι μεταξύ τους θέσεις δεν έχουν καμία σημασία.

Είναι χαρακτηριστικό ότι αν και υπάρχουν δημοσιευμένες εργασίες που αναφέρονται σε χρήση δυναμικού υπολογισμού μεγέθους παραθύρων για συνταύτιση (Rosenholm, 1987c, Kanade, 1994, Veksler, 2003), αυτά συνήθως περιγράφονται στο περιθώριο κάποιας συνολικότερης μελέτης αλγορίθμου συνταύτισης, χωρίς πολλές λεπτομέρειες.

Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύονται οι τροποποιήσεις που προτείνονται στις μεθοδολογίες επιλογής μεγέθους και σχήματος παραθύρου.

3.1.1. Εφαρμογές σχετικές με το μέγεθος παραθύρου

Η πρώτη εφαρμογή σχετικά με δυναμική επιλογή μεγέθους παραθύρου παρουσιάστηκε από τον Levine et al. (1973). Σε αυτήν το μέγεθος του παραθύρου αυξάνεται μέχρι η διακύμανση της έντασης να είναι αρκετή.

Οι Lue & Novak (1992) χρησιμοποιούν πυραμίδες και εφαρμόζουν τουλάχιστον τρία μεγέθη παραθύρων σε κάθε σημείο και σε όλες τις πυραμίδες, προκειμένου να συγκρίνουν τα αποτελέσματα και να χρησιμοποιήσουν το βέλτιστο. Μόνο εφόσον και τα τρία διαφορετικά μεγέθη δώσουν το ίδιο αποτέλεσμα θεωρείται επιτυχής η συνταύτιση. Οι συγγραφείς δεν αναφέρουν κατώφλια για να είναι τα τρία αποτελέσματα "ίσα" ούτε γιατί επιλέγονται τρία ή περισσότερα, ή με ποια κριτήρια επιλέγονται και ποια ακριβώς είναι αυτά τα τρία διαφορετικά μεγέθη. Η όλη διαδικασία δεν οδηγεί στον υπολογισμό και χρήση του βέλτιστου παραθύρου, αλλά στην αλληλο-επαλήθευσή τους.

Οι Kang et al. (2001) παρουσιάζετουν μία μέθοδο προσαρμογής μεγέθους παραθύρου, η οποία επιπλέον συνδυάζεται με χαρακτηρισμό και επιλογή των εικονοστοιχείων που είναι ορατά σε αμφότερες τις εικόνες. Βασίζεται δε στην διακύμανση ως μέτρο αξιοπιστίας και καταλληλότητας των εικονοστοιχείων, ενώ οι συγγραφείς παραδέχονται ότι είναι απαραίτητη η χρήση και άλλων μέτρων (συνολικότερων) για την καλύτερη επιλογή των μικρότερων κυρίως παραθύρων, που εμπεριέχουν δηλαδή αρκετή πληροφορία ήδη από μικρό μέγεθος. Αναλυτικά αποτελέσματα ως προς την συμπεριφορά του παραθύρου δεν παρουσιάζονται, με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η αξιολόγησή της συγκεκριμένης εργασίας για πιθανή εφαρμογή σε διαφορετικές εικόνες.

Οι Kanade et al. (1994) υπολογίζουν το βέλτιστο μέγεθος παραθύρου με κριτήρια την ένταση και την διακύμανση. Η βασική ιδέα είναι ότι σε σημεία κοντά σε ακμές τα παραπάνω μεγέθη είναι μεγαλύτερα. Προτείνουν ένα μοντέλο κατανομής της διακύμανσης μέσα στο παράθυρο, το οποίο μπορεί και ελέγχει δυναμικά το σχήμα και το μέγεθος. Το μέγεθος του παραθύρου αυξάνεται και προς τις τέσσερις διευθύνσεις, έως ότου ικανοποιηθούν τα κριτήρια. Δ παρουσιάζονται αναλυτικά αποτελέσματα ως προς την συμπεριφορά του παραθύρου.

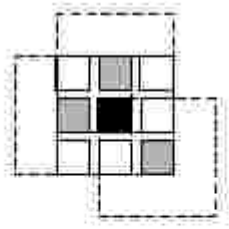
3.1.2. Εφαρμογές σχετικά με το σχήμα παραθύρου.

Σύμφωνα με τους Mitchell et al. (2000) το σχήμα του παραθύρου μπορεί να είναι οποιοδήποτε και μάλιστα το σημείο ελέγχου μπορεί να είναι οπουδήποτε και όχι απαραιτήτως στο κέντρο, ακόμα και έξω από αυτό.

Σε αυτή την κατηγορία ανήκει η μέθοδος των μεταθετών παραθύρων, όπου δεν αλλάζει το σχήμα ούτε το μέγεθος του παραθύρου, αλλά η θέση του προς εξέταση εικονοστοιχείου μέσα σε αυτό. Οι Geiger et al. (1995) χρησιμοποιούν δύο διαφορετικές θέσεις μέσα στο παράθυρο (δεξιά-αριστερά), ενώ οι Bobick et al. (1999) χρησιμοποιούν 9 διαφορετικές θέσεις. Αμφότερες οι περιπτώσεις προτείνουν μεταθετά παράθυρα στο πλαίσιο μίας συνολικής επίλυσης με δυναμικό προγραμματισμό.

Οι Okutomi et al. (2001), στο περιθώριο μίας καθαρά τοπικής προσέγγισης, προτείνουν την χρήση 9 διαφορετικών θέσεων εντός ενός παραθύρου 5x5, όπου τελικά επιλέγεται η θέση με την καλύτερη ελαχιστοτετραγωνική λύση (μικρότερο άθροισμα των τετραγώνων των υπολοίπων).

Η μέθοδος αυτή επιτρέπει τον καλύτερο εντοπισμό σημείων πλησίον ακμών. Έχει όμως την ιδιότητα να καταστρέφει την συνέχεια της επιφάνειας, που είναι γενικά επιθυμητή. Κατά συνέπεια η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται αποκλειστικά σε περιοχές κοντά σε ακμές, ενώ στο υπόλοιπο της εικόνας εφαρμόζεται το κλασικό παράθυρο με το σημείο ελέγχου στο κέντρο.



Σχήμα 3.1. Μεταθετά παράθυρα. Το αποτέλεσμα της δοκιμής όλων των διακεκομμένων παραθύρων 3x3 γύρω από το μαύρο εικονοστοιχείο είναι το ίδιο με την επιλογή του κανονικού παραθύρου 3x3 με τον ελάχιστο συντελεστή συσχέτισης ανάμεσα στα 8 γειτονικά εικονοστοιχεία. (Εδώ φαίνονται μόνο τρία από τα γειτονικά διακεκομμένα παράθυρα.)

Η μέθοδος των μεταθετών παραθύρων είναι ισοδύναμη με την επιλογή του παραθύρου με το καλύτερο σ_0 στο σύνολο της επιφάνειας που καλύπτουν όλα τα παράθυρα, όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.1 (Tao et al., 2001). Οι μέθοδοι είναι ισοδύναμες όταν το μέγεθος του παραθύρου συνταύτισης με το παράθυρο φίλτρου έχουν το ίδιο μέγεθος. Έρευνες δείχνουν ότι η χρήση της μεθόδου παρουσιάζει βελτίωση του αλγορίθμου συνταύτισης, ιδίως κοντά σε ακμές που συνοδεύονται από μεγάλη διαφορά παράλλαξης (Scharstein et al.,, 2001), όπου το παράθυρο περιέχει πληθυσμούς και από το κοντινό και το μακρινό επίπεδο. Για να λειτουργήσει σωστά όμως πρέπει το παράθυρο φίλτρου να είναι όλο από την μία πλευρά. Η χρήση αυτής της μεθόδου έχει καλά αποτελέσματα σε ακμές, αλλά στο υπόλοιπο του στερεοσκοπικού μοντέλου οδηγεί σε γενίκευση. Παρόλα αυτά, η μέθοδος αυτή δεν απευθύνεται στη ρίζα του προβλήματος, αλλά λειτουργεί ως φίλτρο ή διαδικασία διόρθωσης. Ως εκ τούτου δεν έχει ουσιαστική προσφορά στο βασικό πρόβλημα που καλείται να λύσει το μέγεθος του παραθύρου, αλλά στην βελτιστοποίηση των αποτελεσμάτων.

Παραδείγματα μεθόδων όπου το προς συνταύτιση σημείο δεν είναι το κεντρικό αναφέρονται από τους Kang et al. (2001), χρήση κυκλικού παραθύρου αναφέρεται από τους Trinder et al. (1995) και χρήση μη ορθογώνιων παραθύρων από την Veksler (2001) και αναλύεται στην ενότητα 3.1.3.

3.1.3. Εφαρμογές με μεταβλητό σχήμα και μέγεθος

Σε αυτή την κατηγορία ανήκει η πρωτοποριακή εφαρμογή των Kanade & Okutomi (1994). Η ιδιαιτερότητα της μεθόδου έγκειται στην ταυτόχρονη εκτίμηση της έντασης και της διαφοροποίησης της παράλλαξης x εντός του παραθύρου, που οδηγούν στον υπολογισμό της αβεβαιότητας της παράλλαξης. Το γεγονός αυτό προϋποθέτει την ύπαρξη ενός αρχικού ΨΜΕ, αλλά επιτρέπει την αναζήτηση ενός κατάλληλου παραθύρου, που οδηγεί στην ελάχιστη αβεβαιότητα παράλλαξης. Το μαθηματικό μοντέλο επιτρέπει να υπολογιστεί η παράλλαξη x, το μέγεθος και το σχήμα του παραθύρου, αλλά στην συγκεκριμένη εφαρμογή περιορίζεται σε ορθογώνια σχήμα παραθύρου για λόγους υπολογιστικού κόστους, παρ΄ όλο που υπάρχει η συνατότητα να μπορεί να μεταβάλλεται.

Η παραδοχή της ελαχιστοτετραγωνικής συνταύτισης προϋποθέτει ότι η παράλλαξη εντός του παραθύρου συνταύτισης είναι ίδια για όλα τα εικονοστοιχεία, κάτι που όμως δεν συμβαίνει στην πραγματικότητα και επαληθεύεται από την εξομάλυνση της τελικής επιφάνειας στην περίπτωση χρήσης μεγάλων παραθύρων. Η μέθοδος αυτή αντιμετωπίζει αυτό ακριβώς το πρόβλημα.

Μειονέκτημα της μεθόδου αποτελεί η αναγκαιότητα ύπαρξης ενός προσεγγιστικού ΨΜΕ. Η προσέγγιση του προβλήματος είναι λογική και έχει μαθηματική θεμελίωση, αλλά η εφαρμογή βασίζεται διπλά στην κανονική κατανομή, που δεν έχει απαραίτητα γενική εφαρμογή. Η μέθοδος έχει πολύ καλά αποτελέσματα σύμφωνα με τους συγγραφείς. Σε αυτό δεν συμφωνεί η Veksler (2001), κατά με την οποία η προτεινόμενη μέθοδος δεν επιφέρει σημαντική βελτίωση σε σχέση με την κλασική μέθοδο του σταθερού παραθύρου. Βασικός λόγος για την ανυπαρξία ουσιαστικής βελτίωσης θεωρείται η ευαισθησία του αλγορίθμου στο προσεγγιστικό ΨΜΕ.

Οι Geiger et al. (1995) και Fusiello et al. (1997) χρησιμοποιούν μια απλούστερη μέθοδο. Για κάθε εικονοστοιχείο και διαφορά παράλλαξης δοκιμάζεται ένα πλήθος περιπτώσεων μεγέθους και σχήματος, και εκείνο με την καλύτερη συνταύτιση θεωρείται σωστή. Προκειμένου η εφαρμογή να παραμείνει απλή χρησιμοποιείται ένα περιορισμένο εύρος παραθύρων που δεν καλύπτει όλες τις περιπτώσεις.

Η Veksler (2001) προτείνει μία βελτίωση της μεθόδου των προηγούμενων στην οποία δεν χρησιμοποιούνται ορθογώνια παράθυρα. Το σχήμα του παραθύρου εξαρτάται από τις ακμές στην γειτονιά του, καθώς και από μία συνάρτηση μικρού λόγου περιμέτρου προς εμβαδόν με σκοπό να δημιουργηθούν κατά το δυνατόν "συνεκτικά" παράθυρα, τα οποία να μην περιέχουν ακμές. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται ένα μέτρο για τα πιθανά παράθυρα, το οποίο συνδυάζει το μικρότερο μέσο σφάλμα παράλλαξης όλων των εικονοστοιχείων (όπως και των Kanade & Okutomi) ενώ ταυτόχρονα προμοδοτούνται τα μεγαλύτερα παράθυρα. Ο αλγόριθμος δίνει καλά αποτελέσματα θεωρώντας επιτυχείς τις συσχετίσεις με ακρίβεια ±1 εικονοστοιχείο, το οποίο όμως θεωρείται ανεπαρκές για πολλές τοπογραφικές εφαρμογές. Αργότερα η ίδια συγγραφέας (2003) επιστρέφει στα τετράγωνα παράθυρα, γιατί θεωρεί ότι τα "συνεκτικά" δεν έχουν να προσφέρουν σημαντική βελτίωση.

3.1.4. Εφαρμογές με παράθυρα σε κατατετμημένες εικόνες

Η μεθοδολογία αυτή προσπαθεί να εξασφαλίσει ότι η συνταύτιση γίνεται πάνω σε τμήματα εικόνας με ίδια χαρακτηριστικά και κατά συνέπεια αποφεύγεται η συνταύτιση σε ακμές που δημιουργούν προβλήματα. Το μειονέκτημα είναι ότι δεν εξασφαλίζεται η ορθότητα των αποτελεσμάτων της κατάτμησης.

Ο Tao et al. (2001) παρουσίασαν μία εργασία στην οποία χρησιμοποιείται κατάτμηση. Αρχικά γίνεται συνταύτιση των εντάσεων των δύο εικόνων σε όλη την επιφάνεια. Το ομόλογο σημείο με την καλύτερη συνταύτιση χρησιμοποιείται ως αρχική προσέγγιση της παράλλαξης για όλα τα σημεία. Στην συνέχεια η εικόνα αναφοράς κατατέμνεται και αποδίδεται σε κάθε επιφάνεια ο μέσος όρος της παράλλαξης των ομόλογων σημείων εντός αυτής. Οι ίδιες περιοχές αντιστοιχίζονται και στην δεύτερη εικόνα μέσω της πληροφορίας παράλλαξης x που υπάρχει από το αρχικό στάδιο. Η αποχή των προβαλλομένων ομόλογων σημείων και των πραγματικών αποτελεί την συνάρτηση κόστους. Η εικόνα βάθους είναι εκείνη που έχει το μικρότερο συνολικό κόστος. Τα αποτελέσματα εφαρμογής της μεθόδου σε περιορισμένο αριθμό επίγειων "κανονικών" λήψεων (παράλληλοι άξονες, μικρές στροφές και 60% επικάλυψη) είναι πολύ καλά.

Άλλη μια εργασία βασισμένη σε κατάτμηση έχει δημοσιευθεί από τους Zhang et al. (2002), αλλά έχει τα ίδια μειονεκτήματα. Η κατάτμηση αεροφωτογραφιών οδηγεί συνήθως σε πολύ μεγάλο κατακερματισμό της εικόνας κάνοντας την περαιτέρω επεξεργασία σύμφωνα με τα παραπάνω από δύσκολη έως αδύνατη.

3.1.5. Αξιολόγηση αλγορίθμων

Οι μεθοδολογίες με τα καλύτερα συνολικά αποτελέσματα είναι εκείνες των Kanade-Okutomi, Veksler και οι μέθοδοι τομής γραφημάτων (graph-cuts).

Σε όλες τις ανακοινώσεις που γίνεται σύγκριση αλγορίθμων δεν αναφέρεται αξιολόγηση σχετικά με τα επιλεγόμενα μεγέθη των παραθύρων. Πιθανότατα επειδή δεν υπάρχει τρόπος αξιολόγησης αποκλειστικά και μόνο του μεγέθους των παραθύρων, αφού σε όλες τις περιπτώσεις η δυναμική επιλογή μεγέθους παραθύρου συνοδεύεται και από άλλες καινοτόμες εφαρμογές, με αποτέλεσμα τα συμπεράσματα να αφορούν συνολικά τον αλγόριθμο και όχι αποκλειστικά το μέγεθος. Στην αντιπαράθεση των αποτελεσμάτων, που κυρίως προέρχονται από την κοινότητα της μηχανικής όρασης, αποδεκτή είναι η συνταύτιση όταν βρίσκεται στο εύρος ±1 εικονοστοιχείο από την αληθή τιμή. Ακόμα και εάν ο λόγος βάσης προς απόσταση λήψης είναι της τάξης του 1, η συγκεκριμένη ακρίβεια δεν είναι ικανοποιητική για πολλές τοπογραφικές εφαρμογές, στις οποίες απαιτείται ακρίβεια μικρότερη του εικονοστοιχείου (sub-pixel accuracy).

Η καλύτερη μέθοδος σε επίπεδο τελικών αποτελεσμάτων, εκείνη που ανιχνεύει καλύτερα τις ακμές και

διατηρεί τις μεγάλες διαφορές βάθους, είναι εκείνη των μεταθετών παραθύρων. Το πρόβλημα είναι ότι για να λειτουργήσει σωστά θα πρέπει να γίνεται συνταύτιση σε όλα τα εικονοστοιχεία των εικόνων, πράγμα εξαιρετικά χρονοβόρο για αεροφωτογραφίες. Γενικότερα, η εφαρμογή αυτών των μεθόδων αναφέρεται σε μικρές σχετικά εικόνες μεγάλης κλίμακας και αντιμετωπίζονται με συνολικές μεθόδους. Στις αεροφωτογραφίες τέτοιες διαδικασίες δεν έχουν εφαρμοστεί μέχρι σήμερα, γεγονός που πιθανότατα οφείλεται στο ότι έχουν μεγαλύτερο μέγεθος, πολύ μικρότερη κλίμακα με πολλές λεπτομέρειες, και οι απαιτήσεις ακρίβειας είναι πολύ μεγαλύτερες,.

3.1.6. Προτεινόμενη μεθοδολογία προσδιορισμού μεγέθους παραθύρου

Η ανάγκη για την αυτόματη επιλογή μεγέθους παραθύρου είναι προφανής και υποστηρίζεται από όλους τους ερευνητές. Υπογραμμίζεται δε από την αδυναμία χειριστών ψηφιακών οργάνων, ακόμα και εξειδικευμένων στην φωτογραμμετρία, ή μηχανικών υποστήριξης των εν λόγω λογισμικών να επιλέξουν το κατάλληλο μέγεθος για ψηφιακή συνταύτιση. Η επιλογή από μόνη της πρέπει να ισορροπήσει ανάμεσα σε δύο αντιφατικά στοιχεία. Το παράθυρο πρέπει να είναι μικρό για να έχει ακρίβεια εντοπισμού (αφού για μεγαλύτερα μεγέθη η παραδοχή του αφινικού μετασχηματισμού δεν ισχύει) και μεγαλύτερη ταχύτητα, ενώ θα πρέπει να είναι και αρκετά μεγάλο για αξιοπιστία. Επιπρόσθετα είναι αδύνατον η επιλογή ενός μεγέθους να είναι κατάλληλη για όλα τα σημεία του επικαλυπτόμενου μέρους των φωτογραφιών που καλύπτουν περιοχές με διαφορετική χρήση γης (αστική, ημιαστική, καλλιεργήσιμη γη, δασώδεις εκτάσεις κ.λπ.). Ακόμα λοιπόν και αν η επιλογή μεγέθους από το χειριστή ήταν "σωστή" για το συγκεκριμένο ζεύγος εικόνων, αυτή θα είναι επιτυχής μόνο για ένα τμήμα του. Η καλύτερη δυνατή λύση θα πρέπει να χρησιμοποιεί διαφορετικό μέγεθος για κάθε σημείο ώστε και η τελική επιφάνεια να μην αμβλύνεται, ενώ ταυτόχρονα να διατηρείται η αξιοπιστία. Τέτοια μέθοδος θα πρέπει να υπολογίζει διαφορετικό μέγεθος σε κάθε σημείο σύμφωνα με τις τοπικές παραμέτρους.

Τα μεγέθη που αποδίδουν καλύτερα την πληροφορία που υπάρχει σε ένα συγκεκριμένο παράθυρο είναι η διακύμανση και η εντροπία. Παράλληλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλα στατιστικά μεγέθη όπως ο μέσος όρος, ο διάμεσος, το εύρος και η μέση απόκλιση. Όλα αυτά τα στατιστικά μεγέθη εξαρτώνται αποκλειστικά από τις τιμές της έντασης του παραθύρου και δεν εμπεριέχουν πληροφορία σχετικά με την χωρική κατανομή τους.

Ο Förstner έχει προτείνει έναν τελεστή εντοπισμού σημείων κατάλληλων για συνταύτιση, ο οποίος περιγράφεται αναλυτικά στην ενότητα 3.1.6.3. Σύμφωνα με αυτόν υπολογίζεται η έλλειψη σφάλματος που αναμένεται από την ελαχιστοτετραγωνική συνταύτιση. Τα κριτήρια επιλογής κάποιου σημείου είναι το μέγεθος και η αναλογία των κύριων αξόνων αυτής της έλλειψης. Με αυτό τον τρόπο λαμβάνεται υπόψη τόσο η ένταση των τόνων όσο και η διάταξη των εικονοστοιχείων στην διαδικασία επιλογής κατάλληλου μεγέθους.

Στη συνέχεια περιγράφονται αναλυτικά οι τρεις διαφορετικές μεθοδολογίες επιλογής μεγέθους.

3.1.6.1. Στατιστική ανάλυση

Τα στατιστικά μεγέθη που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αυτή την ανάλυση είναι ο μέσος όρος, η τυπική απόκλιση, το εύρος, ο διάμεσος, η επικρατούσα τιμή και ο μέσος όρος των απόλυτων διαφορών. Σκοπός ήταν να βρεθεί κάποια σχέση μεταξύ των παραπάνω μεγεθών που να καθορίζει το κατάλληλο μέγεθος για την συνταύτιση. Το μέγεθος αυτό θα πρέπει να περιέχει αρκετή πληροφορία για αξιόπιστο εντοπισμό, αλλά να μην είναι πολύ μεγάλο ώστε να διατηρείται η παραδοχή του αφινικού μετασχηματισμού.

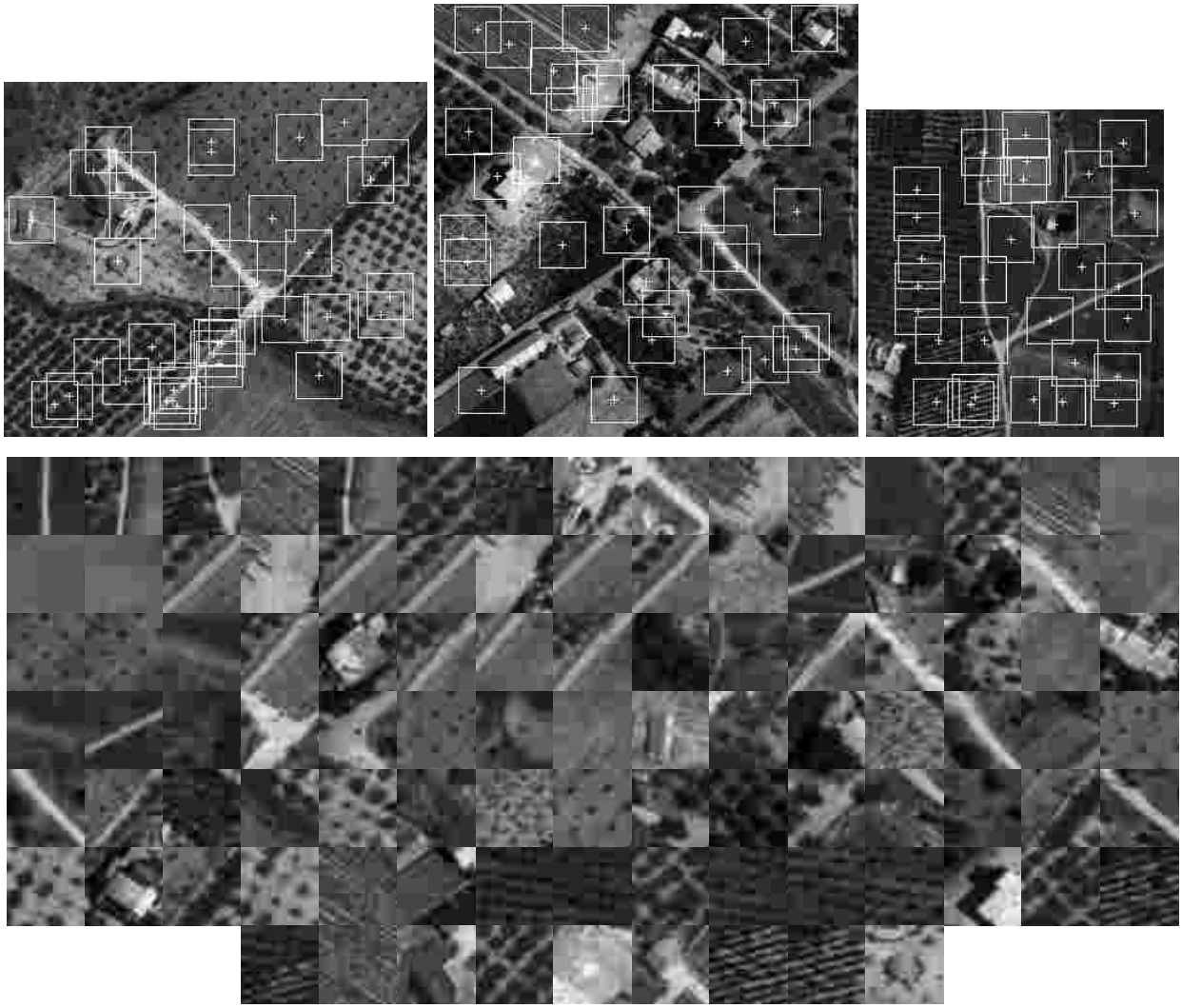
Για το σκοπό αυτό επιλέχθηκαν 99 αντιπροσωπευτικά δείγματα (εικ. 3.1) παραθύρων 41x41 από εικόνες με ανάλυση 0.5 m. Το πλήθος τους κρίνεται ικανοποιητικό αφού καλύπτει ένα ευρύ φάσμα σημείων σε ομοιογενείς περιοχές, γραμμικά φαινόμενα (δρόμοι διαφόρων μεγεθών, σημεία στο κέντρο ή στις άκρες), χαρακτηριστικά σημεία (μεμονωμένα σημεία σε αντίθετο φόντο, θάμνοι, επαναλαμβανόμενα πρότυπα), αλλά και άλλες περιπτώσεις.

Στη συνέχεια συλλέχθηκαν τα στατιστικά μεγέθη για όλα τα παράθυρα με μεγέθη από 5x5 έως 41x41 και κέντρο το εικονοστοιχείο αναφοράς. Το μέγιστο αυτό μέγεθος επιλέχθηκε με βάση το γεγονός ότι σε καμία έρευνα δεν αναφέρεται μεγαλύτερο μέγεθος από αυτό και ότι μεγαλύτερο παράθυρο αποτελεί σε κάθε περίπτωση υπερβολή, αφού η υπόθεση του αφινικού μετασχηματισμού δεν ευσταθεί. Τα στατιστικά μεγέθη που αναφέρονται παραπάνω αναπαριστώνται σε διαγράμματα (σχ. 3.2), ανεξάρτητα για το κάθε σημείο. Για κάθε ένα από τα δείγματα σημειώθηκε το βέλτιστο μέγεθος κατά την κρίση του παρατηρητή.

Στην συνέχεια έγινε αντιπαράθεση των στατιστικών μεγεθών, ώστε να βρεθούν συνδυασμοί που να χαρακτηρίζουν το "βέλτιστο" μέγεθος παραθύρου. Το βέλτιστο αυτό παράθυρο αποτελεί ανθρώπινη επιλογή για το τι θα ήταν καλύτερο για τον υπολογιστή. Το γεγονός αυτό αποτελεί αδυναμία στην περιγραφόμενη μεθοδολογία, αλλά ακόμα και με απόκλιση από την "αληθώς βέλτιστη" τιμή ±2 εικονοστοιχείων μεγαλύτερου ή μικρότερου παραθύρου δεν επηρεάζει πολύ την όλη διαδικασία εύρεσης σχέσεων μεταξύ των στατιστικών μεγεθών.

Η συσχέτιση των στατιστικών μεγεθών και η εύρεση κάποιων σχέσεων είναι υποκειμενική και αρκετά δύσκολη. Τα μεγέθη της τυπικής απόκλισης και του μέσου όρου των απόλυτων διαφορών που έχουν φυσική σημασία και αποδίδουν το μέγεθος των διαφορών και της περιεχόμενης πληροφορίας, έχουν μικρή διαφορά μεταξύ τους και παράλληλη πορεία στα διαγράμματα. Κατά συνέπεια δεν είναι δυνατόν να προκύψει συσχέτιση μεταξύ τους ή με άλλα μεγέθη, αφού είναι καταφανώς εκτός του εύρους των τιμών που λαμβάνουν οι άλλες παράμετροι.

Το εύρος τιμών παρουσιάζει ενδιαφέρον ως μέγεθος, αφού όταν το παράθυρο μεγαλώνει αρκετά ώστε να περιέχει και σήμα από άλλο χαρακτηριστικό αυξάνει απότομα. Ο μέσος όρος, ο διάμεσος και η τιμή του δείγματος με την μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης είναι μεγέθη παραπλήσια. Ο μέσος όρος είναι ο πιο ευαίσθητος σε μεταβολές, ενώ τα άλλα δύο είναι παράλληλα στα διαγράμματα και δεν διευκολύνουν την μεταξύ τους συσχέτιση (σχ. 3.2)



Εικόνα 3.1 Τα 99 δείγματα που συλλέχθηκαν με μέγεθος παραθύρου 41x41 για στατιστική ανάλυση και παρατήρηση επί των εικόνων και μεμονωμένα.

Μετά την προσεκτική παρατήρηση των στατιστικών μεγεθών και του "βέλτιστου" παραθύρου, διαμορφώθηκε ο παρακάτω σχετικά απλός αλγόριθμος υπολογισμός μεγέθους παραθύρου:

1. Εάν υπάρχει τομή εύρους και μέσου όρου τότε το μέγεθος αυτό είναι κατάλληλο.

2. Εάν δεν υπάρχει η παραπάνω τομή τότε το κατάλληλο μέγεθος είναι εκείνο του οποίου η τυπική απόκλιση υπερβαίνει την τιμή 25
3. Εάν δεν υπάρχει μέγεθος που να ικανοποιεί τα δύο προηγούμενα κριτήρια τότε το παράθυρο με μέγεθος που το εύρος του είναι μεγαλύτερο από τον μέσο όρο αυξημένο κατά 40.

Το πρώτο κριτήριο είναι κυρίως εμπειρικό, αφού αυτή η τομή σηματοδοτεί την είσοδο στο παράθυρο ομάδας εικονοστοιχείων διαφορετικής έντασης που επηρεάζει σοβαρά τα στατιστικά μεγέθη. Η ύπαρξη αυτής της νέας ομάδας σηματοδοτείται και από μεταβολή του μέσου όρου, η οποία όμως δεν είναι έντονη όσο η αύξηση του εύρους.

Το δεύτερο κριτήριο στηρίζεται στην τυπική απόκλιση και έχει φυσική έννοια αφού περιγράφει το σύνολο των διαφορών ανάμεσα στα εικονοστοιχεία. Το πρόβλημα βρίσκεται στην επιλογή κατάλληλου κατωφλιού που να μπορεί να λειτουργήσει σε κάθε περίπτωση. Ο έλεγχος που πραγματοποιήθηκε στη συνέχεια (βλ. επόμενο κεφάλαιο) χρησιμοποιεί διαφορετικά κατώφλια ακριβώς γι' αυτό το λόγο.

Το τρίτο κριτήριο είναι το λιγότερο ισχυρό και ρόλος του είναι να επιστρέψει κάποιο παράθυρο, έστω και με χαμηλή αξιοπιστία. Είναι σύνηθες φαινόμενο να μην υπάρχει τομή μέσου όρου και εύρους κυρίως επειδή ο μέσος όρος έχει χαμηλή τιμή. Σε αυτή την περίπτωση η μεγάλη διαφορά μεταξύ εύρους και μέσου όρου σημαίνει ότι το εύρος είναι αρκετά μεγάλο και κατά συνέπεια υπάρχει αρκετή πληροφορία εντός παραθύρου.

Τα κριτήρια αυτά δεν δείχνουν αλληλένδετα μεταξύ τους, ενώ ταυτόχρονα χρησιμοποιούν κατώφλια που ενισχύουν την εικόνα της αυθαιρεσίας. Παρ' όλα αυτά καταφέρνουν να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις παρουσιάζοντας προσαρμογή στις τοπικές συνθήκες, όπως φαίνεται και στην ενότητα 3.1.6.4.

3.1.6.2. Εντροπία

Η εντροπία μετρά το τυχαίο ενός συνόλου τιμών. Εφαρμοσμένη σε μια ψηφιακή εικόνα, η εντροπία εκφράζει την "αταξία" των γκρίζων τόνων και υπολογίζεται ως:

$$H = -\sum_{i=0}^{255} p_i \log_2(p_i) \tag{3.1}$$

όπου, $i=0,1,\ldots 255$ οι πιθανές τιμές έντασης σε μία εικόνα με διαβαθμίσεις του γκρι.

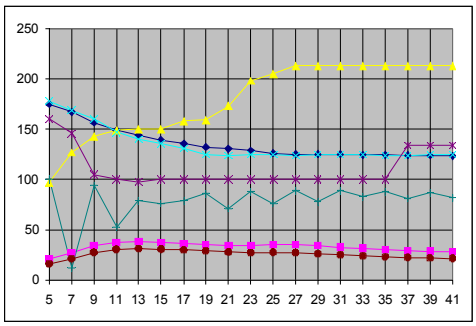
p_i η συχνότητα εμφάνισης της τιμής i στην εικόνα.

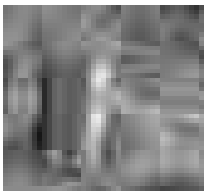
Στην περίπτωση μίας δυαδικής εικόνας με πιθανές τιμές έντασης 0 και 1 και πιθανότητα εμφάνισης 0.5 για την κάθε τιμή, η εντροπία είναι 1. Η γεωμετρία της εικόνας και η γειτνίαση των εικονοστοιχείων δεν παίζει ρόλο. Στο προηγούμενο παράδειγμα δηλαδή, εάν η κατανομή των δύο τόνων ήταν όπως σε μια σκακιέρα ή ήταν όλοι συγκεντρωμένοι δεξιά-αριστερά στην εικόνα, η τιμή της εντροπίας δεν θα είχε καμία διαφορά.

Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι σε εικόνες με 256 τόνους του γκρι, η μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει η εντροπία είναι 8 (2^8=256) εφόσον όλες οι τιμές έχουν πιθανότητα εμφάνισης 1/256. Η εντροπία δεν συμπεριλήφθηκε στην προηγούμενη ανάλυση επειδή λαμβάνει τιμές από 0 έως 8 και κατά συνέπεια δεν είναι άμεσα συγκρίσιμη με τα προηγούμενα στατιστικά μεγέθη. Από την άλλη όμως, η εντροπία έχει φυσική έννοια και κατά συνέπεια είναι πιο εύκολα αντιληπτή από τον άνθρωπο, σε αντίθεση με τα στατιστικά μεγέθη και τις μεταξύ τους σχέσεις της προηγούμενης παραγράφου.

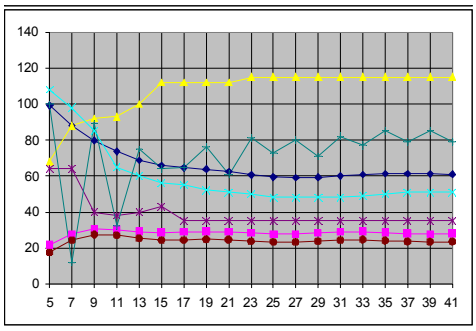
Η εντροπία μπορεί να υπολογιστεί σε όλα τα παράθυρα γύρω από το εικονοστοιχείο ενδιαφέροντος (κατ' αντιστοιχία με την προαναφερθείσα μέθοδο) με μεγέθη από 7x7 και πάνω, μέχρι η εντροπία να ξεπεράσει κάποιο κατώφλι ή η μεταβολή της να είναι αμελητέα και κατά συνέπεια η περαιτέρω αύξηση του παραθύρου να μην έχει καμία πρακτική σημασία. Ως κατώφλι εντροπίας συνήθως χρησιμοποιούνται τιμές στο διάστημα [3, 4.5] γιατί οι μικρότερες τιμές έχουν πολύ λίγη πληροφορία ενώ τιμές πάνω από 5.5 πρακτικά δεν εμφανίζονται. Για την μεταβολή της μπορούν να χρησιμοποιηθούν τιμές στο διάστημα [0.005, 0.025] για κατώφλι.

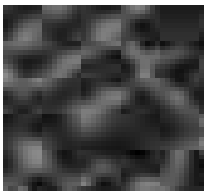
5	174.92	21.01	97	178	160	16.23	2.9416	100		100
7	167.35	27.11	127	169	146	21.25	3.6655			12
9	156.99	34.41	143	160	105	27.62	4.0906		OK	94
11	149.13	37.41	149	147	100	30.76	4.3159			53
13	143.72	38.13	150	140	98	31.42	4.4284	100		79
15	139.53	37.55	150	136	100	30.83	4.4344			76
17	135.67	36.58	158	131	100	30.09	4.4556			79
19	132.47	35.53	159	125	100	29.12	4.4675			86
21	130.61	34.34	173	124	100	27.87	4.5214			71
23	128.84	34.15	198	125	100	27.23	4.6206			88
25	126.37	35.47	205	125	100	27.6	4.7033			76
27	125.04	35.26	213	124	100	27.33	4.7553			89
29	125.11	34.04	213	125	100	26.27	4.7559			78
31	125.04	32.78	213	125	100	25.28	4.7386			89
33	124.66	31.64	213	125	100	24.44	4.7219			83
35	124.37	30.44	213	124	100	23.39	4.6916			88
37	124.21	29.44	213	124	134	22.59	4.6726			81
39	123.88	28.72	213	125	134	21.99	4.6555			87
41	123.38	28.23	213	125	134	21.65	4.648			82



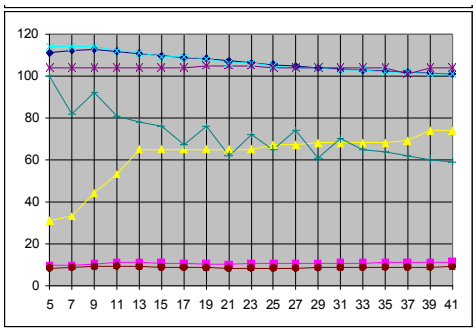


5	99.44	21.62	68	108	64	17.39	2.9207	100		100
7	87.86	27.73	88	98	64	24.29	3.5593	100		12
9	79.69	30.34	92	85	40	27.37	3.8316		OK	89
11	73.69	30.13	93	65	38	26.9	4.0439			32
13	68.74	29.12	100	60	40	25.25	4.1522			75
15	65.81	28.52	112	56	43	24.21	4.234			64
17	64.59	28.84	112	55	35	24.29	4.2753			65
19	63.7	28.95	112	52	35	24.69	4.2872			76
21	62.41	28.75	112	51	35	24.5	4.2859			61
23	60.59	28.16	115	50	35	23.62	4.2923			81
25	59.34	27.72	115	48	35	23.17	4.3044			73
27	59.02	27.77	115	48	35	23.23	4.3218			80
29	59.28	28.17	115	48	35	23.56	4.339			71
31	59.98	28.89	115	48	35	24.2	4.3614			82
33	60.81	29.11	115	49	35	24.56	4.3831			77
35	61.26	28.52	115	50	35	24.02	4.4103			85
37	61.23	27.92	115	51	35	23.44	4.4185			79
39	61.08	27.74	115	51	35	23.28	4.4226			85
41	60.92	27.91	115	51	35	23.42	4.4281			79

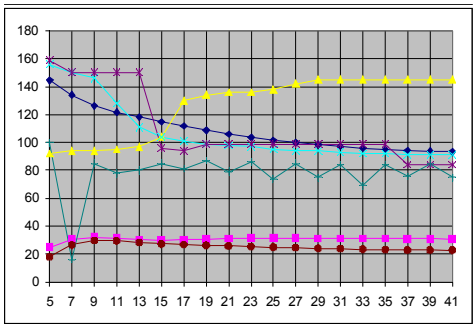


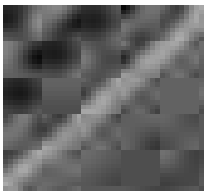


5	111.04	9.49	31	114	104	8.36	2.6197	100		100
7	112.27	9.63	33	114	104	8.66	3.1687			82
9	112.68	10.3	44	114	104	8.94	3.4006		OK	92
11	111.84	11	53	112	104	9.27	3.5489			81
13	110.8	11.04	65	111	104	9.02	3.6239			78
15	109.58	10.78	65	109	104	8.74	3.641			76
17	108.86	10.55	65	109	104	8.61	3.6581			67
19	108.27	10.28	65	108	105	8.4	3.6548			76
21	107.31	10.18	65	106	105	8.23	3.6704			62
23	106.24	10.37	65	106	105	8.31	3.7019			72
25	105.38	10.5	67	105	104	8.34	3.7278			65
27	104.58	10.38	67	104	104	8.25	3.7221			74
29	103.8	10.5	68	104	104	8.39	3.7342			61
31	103.15	10.67	68	103	104	8.56	3.7576			70
33	102.7	10.75	68	103	104	8.63	3.7664			65
35	102.27	10.89	68	102	104	8.77	3.7818			64
37	101.8	10.88	69	102	101	8.75	3.7831			62
39	101.45	10.99	74	101	104	8.82	3.7932			60
41	101.07	11.23	74	101	104	8.99	3.8157			59

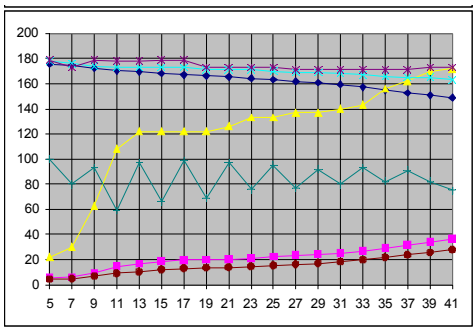


5	144.52	25.09	92	156	159	18.17	2.8652	100		100
7	133.98	30.81	94	150	150	26.6	3.3612			16
9	126.33	32.22	94	146	150	29.7	3.7965			85
11	121.74	31.57	95	128	150	29.52	4.0422			78
13	118.25	30.54	97	111	150	28.23	4.256			80
15	114.83	30.15	104	104	96	27.32	4.3245			85
17	111.75	30.36	130	101	94	26.78	4.3391	100		81
19	108.71	30.88	134	99	99	26.29	4.3782		OK	87
21	105.86	31.29	136	98	99	25.83	4.4479			79
23	103.56	31.55	136	97	99	25.39	4.486			86
25	101.51	31.6	138	95	99	24.92	4.4928			74
27	99.89	31.47	142	94	99	24.43	4.5076			85
29	98.5	31.41	145	94	99	24.06	4.5491			75
31	97.21	31.42	145	93	99	23.77	4.5676			84
33	96.03	31.41	145	92	99	23.52	4.5619			69
35	95.03	31.19	145	92	99	23.22	4.5696			84
37	94.33	31.02	145	91	84	22.96	4.5774			76
39	93.77	30.98	145	91	84	22.91	4.6018			85
41	93.29	30.85	145	91	84	22.82	4.6201			75

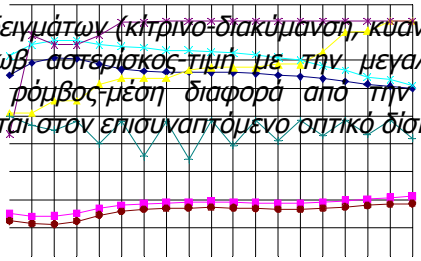




5	175.8	5.69	22	178	179	4.46	2.6434			100
7	174.69	6.08	30	176	173	4.91	2.8393			80
9	172.53	9.42	63	174	179	6.91	3.1317			93
11	170.4	14.63	108	173	178	9.12	3.3634			59
13	169.43	16.82	122	173	178	10.37	3.4812			97
15	168	18.78	122	173	179	12.09	3.6608			66
17	167	19.79	122	173	179	13.18	3.7318		OK	99
19	166.3	19.99	122	171	173	13.57	3.7625			69
21	165.4	20.33	126	171	173	13.9	3.8106			97
23	164.36	21.1	133	171	173	14.64	3.8695			76
25	163.26	22.3	133	170	173	15.53	3.9276			95
27	161.96	23.5	137	169	171	16.43	3.991			77
29	160.74	24.39	137	169	171	17.21	4.0475			92
31	159.25	25.2	140	168	171	18.18	4.1152			80
33	157.21	26.87	143	167	171	19.85	4.1849			93
35	154.92	29.26	156	166	171	21.82	4.2501	100		82
37	152.84	31.71	162	165	171	23.76	4.3041			91
39	150.91	34.2	170	165	173	25.74	4.3524			82
41	148.72	36.65	172	163	173	27.85	4.4109			75



Σχήμα 3.2 Απόσπασμα στατιστικής ανάλυση δειγμάτων (κίτρινο-διακύμανση, κυανό-διάμεσος, μπλε-μέσος όρος, πράσινο-συνταύτισηx100, μωβ-αστερίσκος-τιμή με την μεγαλύτερη εμφάνιση, μωβ τετράγωνο-τυπική απόκλιση, μωβ ρόμβος-μέση διαφορά από την τυπική απόκλιση) [Τα αναλυτικά αποτελέσματα παρατίθονται στον επισυναπτόμενο οπτικό δίσκο].



3.1.6.3. Τροποποίηση αλγορίθμου Förstner

Ο Förstner (1986) πρωτοπαρουσίασε έναν τελεστή για τον εντοπισμό σημείων κατάλληλων για αυτόματη συνταύτιση, σημείων δηλαδή που η συνταύτιση σε αυτά θα ήταν ισχυρή. Γενικά τέτοια σημεία θεωρούνται όσα είναι κυκλικού σχήματος και έχουν έντονη διαφορά έντασης από τα γειτονικά τους. Η ελαχιστοτετραγωνική συνταύτιση επιστρέφει ένα πίνακα μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας από τον οποίο προκύπτει η έλλειψη αβεβαιότητας προσδιορισμού της θέσης. Η έλλειψη αυτή είναι άμεσα συνδεδεμένη με το περιεχόμενο της εικόνας και σε γραμμικά φαινόμενα είναι επιμήκης κατά την διεύθυνση της γραμμής, ενώ σε σημειακά φαινόμενα προσεγγίζει κύκλο.

Σύμφωνα με τις κανονικές εξισώσεις των ελαχίστων τετραγώνων, ο πίνακας μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας μεταξύ δύο συσχετισμένων παραθύρων είναι:

$$\operatorname{cov}\begin{pmatrix}\Delta\hat{x}\\ \Delta\hat{y}\end{pmatrix}=\sigma^2\begin{bmatrix}\sum g_x^2 & \sum g_x g_y\\ \sum g_x g_y & \sum g_y^2\end{bmatrix}^{-1}=\sigma^2 Q=\sigma^2 N^{-1} \tag{3.2}$$

όπου g_x και g_y είναι οι διαφορές στην ένταση στις διευθύνσεις x και y. Από την 3.2 είναι δυνατόν να υπολογισθούν οι παράμετροι της έλλειψης σφάλματος και η σχέση ανάμεσα στις κύριες διευθύνσεις, ήτοι:

$$q=\frac{4\det(N)}{\operatorname{tr}^2(N)}=\frac{4\lambda_1\lambda_2}{(\lambda_1+\lambda_2)^2}=1-\left(\frac{\lambda_1-\lambda_2}{\lambda_1+\lambda_2}\right)^2 \tag{3.3}$$

όπου λ_1 και λ_2 οι ιδιοτιμές του πίνακα N,
det(N) η ορίζουσα του **N** και
tr(N) το ίχνος του **N**.

Το σχήμα ενός καλού σημείου θα πρέπει να είναι όσο γίνεται κυκλικό, δηλαδή το q να πλησιάζει το 1. Επίσης το ίχνος του αντίστροφου **Q** θα πρέπει να είναι το μικρότερο δυνατό (μεγάλες κλίσεις εικόνας) δηλαδή το

$$w=\frac{1}{\operatorname{tr}(Q)}=\frac{\det(N)}{\operatorname{tr}(N)} \tag{3.4}$$

θα πρέπει να είναι μέγιστο.

Από τα δύο υπολογισμένα μέτρα q και w γίνεται η επιλογή των σημείων με κριτήριο προκαθορισμένα κατώφλια. Τα κατώφλια που προτείνονται από τον Yan (1988) είναι:

$$w=\begin{cases} w & \text{if} \quad q>q_{lim} \quad \text{and} \quad w>w_{lim}\\ 0 & \end{cases} \tag{3.5}$$

όπου q_{lim}=0.5÷0.75 και

$$w_{lim}=\begin{cases} f*w_{mean} & f=0.5\div 1.5\\ c*w_{median} & c=5\end{cases}$$

Σκοπός του τελεστή είναι να επιστρέψει τα καλύτερα σημεία για συνταύτιση σε μια υποπεριοχή της εικόνας (ή σε όλη την εικόνα). Σύμφωνα με την πρόταση του Yan (1988) θα πρέπει να υπολογιστούν τα μέτρα q και w για όλα τα εικονοστοιχεία στην περιοχή ενδιαφέροντος με προκαθορισμένο μέγεθος παραθύρου (συνήθως 3x3, 5x5 ή το πολύ 7x7). Στη συνέχεια υπολογίζεται το w_{lim} και στο τέλος εφαρμόζεται η συνθήκη 3.4 για να προκύψουν τα τελικά σημεία. Στην περίπτωση που ο τελεστής ρυθμίζεται για να επιστρέφει το καλύτερο (ή τα καλύτερα) σημεία σε μια υποπεριοχή, τότε ο υπολογισμός του w_{lim} και της συνθήκης 3.4 δεν είναι απαραίτητα, αφού επιστρέφονται τα σημεία με το μεγαλύτερο w.

Κατ' αντιστοιχία των προηγούμενων προτεινόμενων μεθόδων, ελέγχονται τα παράθυρα με κεντρικό το εικονοστοιχείο ενδιαφέροντος και αρχικό μέγεθος 7x7. Όταν το επιλεγμένο μέγεθος παραθύρου έχει δείκτες w και q μεγαλύτερους από τα κατώφλια γίνεται αποδεκτό και χρησιμοποιείται για την ελαχιστοτετραγωνική συνταύτιση.

3.1.6.4. Αρχική αξιολόγηση αλγορίθμων

Η αρχική αξιολόγηση των προτεινόμενων αλγορίθμων κρίνεται απαραίτητη, αφού δεν υπάρχουν στοιχεία στην βιβλιογραφία για κάτι παρόμοιο. Παρ' όλο που βασίζονται σε γνωστά και δόκιμα στατιστικά μεγέθη, η συμπεριφορά τους είναι άγνωστη και μπορεί να επιφέρουν αντίθετα από τα επιθυμητά αποτελέσματα. Έτσι, κρίνεται απαραίτητος ένας αρχικός ποιοτικός έλεγχος των αποτελεσμάτων τους και εν συνεχεία

λεπτομερής ανάλυση με χρήση ελαχιστοτετραγωνικής συνταύτισης ώστε να συγκριθούν σε τελικά αποτελέσματα. Σκοπός του αρχικού ελέγχου είναι να επιβεβαιώσει την συμπεριφορά των αλγορίθμων ως προς το μέγεθος, ανάλογα με την πληροφορία της εικόνας στην γειτονιά κάθε σημείου. Αναμενόμενο είναι να επιστρέφουν μεγάλα παράθυρα σε περιοχές με παρόμοιες τιμές γκρίζου και το αντίθετο.

Για την αρχική αξιολόγηση των αλγορίθμων δημιουργήθηκε κατάλληλο πρόγραμμα σε γλώσσα προγραμματισμού C++, που υπολογίζει σύμφωνα με τα προαναφερθέντατα μεγέθη των παραθύρων για κάθε εικονοστοιχείο της αρχικής εικόνας, και εν συνεχεία τα μετατρέπει σε ένταση του γκρι. Το αποτέλεσμα είναι μια εικόνα όπου οι πιο ανοιχτοί τόνοι αντιστοιχούν σε μεγαλύτερα μεγέθη και οι εντονότεροι σε πιο μικρά. Ο χρήστης εισάγει το μέγιστο μέγεθος παραθύρου, την μέθοδο που επιθυμεί να χρησιμοποιήσει καθώς και τις αντίστοιχες παραμέτρους. Ως μέγιστο μέγεθος παραθύρου χρησιμοποιείται συνήθως το 35x35, που ήδη θεωρείται αρκετά μεγάλο. Στη βιβλιογραφία δεν βρέθηκε αναφορά σε εφαρμογή με χρήση μεγέθους μεγαλύτερο από 31x31 (Veksler, 2001), ενώ ήδη αυτό θεωρείται αρκετά μεγάλο, αφού θέτει σε κίνδυνο την αρχική υπόθεση του αφινικού μετασχηματισμού. Κατά συνέπεια οποιοδήποτε μέγεθος μεγαλύτερο από 35x35 θεωρείται υπερβολή. Οι διαβαθμίσεις της έντασης που χρησιμοποιούνται στην νέα εικόνα είναι ανάλογες των πιθανών μεγεθών. Αν για παράδειγμα το μέγιστο παράθυρο που επιθυμεί ο χρήστης είναι 13x13, τότε το πρόγραμμα μπορεί να επιστρέψει 7x7, 9x9, 11x11, 13x13 και αποτυχία, δηλαδή 5 τιμές, οι οποίες αντιστοιχούνται στις εντάσεις 0, 63, 127, 191 και 255 αντίστοιχα (εικ. 3.2).

Η αξιολόγηση αυτή γίνεται μονοεικονικά με σκοπό την οπτική, σε πρώτη φάση, επαλήθευση της θεωρίας για την αντιμετώπιση των αρχικών προβληματισμών και όχι για την αναλυτική σύγκρισή τους με αριθμητικά στοιχεία, που γίνεται στην ενότητα 4.1.4.3. Χρησιμοποιώντας εικόνες με διαφορετικό περιεχόμενο, διαφορετική ανάλυση, διαφορετικό βαθμό εξομάλυνσης και πληροφορίας μπορούν να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με την συμπεριφορά των αλγορίθμων. Η πρώτη αυτή αξιολόγηση γίνεται με αυθαίρετη επιλογή των εσωτερικών τους παραμέτρων, ενώ είναι δυνατή η περαιτέρω "ρύθμισή" τους ώστε να οδηγηθούν προς μικρότερα ή μεγαλύτερα παράθυρα.

Εικόνα 3.2. Η αρχική εικόνα και η παραγόμενη από τα επιστρεφόμενα μεγέθη παραθύρων, με μέγιστο 35x35. Η μέθοδος υπολογισμού είναι αυτή των στατιστικών μεγεθών. Παρατηρείται καθαρά η αύξηση του μεγέθους (ανοιχτοί τόνοι – μεγάλες τιμές έντασης) σε περιοχές με ομοιογενείς τόνους και η ελλάττωσή του σε περιοχές πλούσιες σε πληροφορία. Επίσης παρατηρείται ευαισθησία του συγκεκριμένου αλγορίθμου στον θόρυβο.

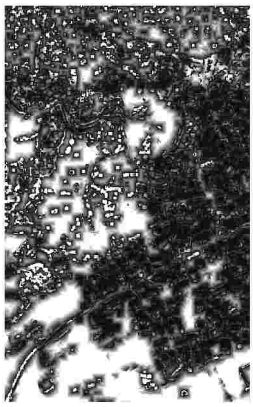
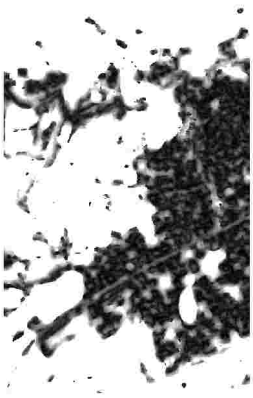
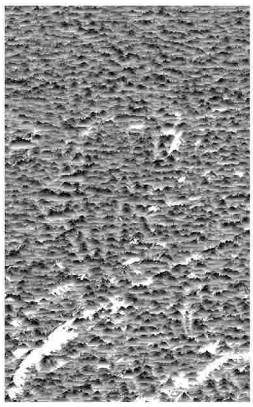
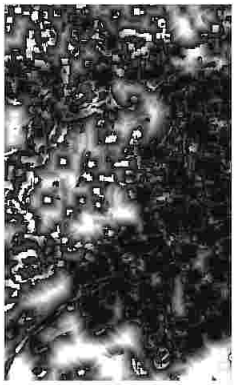
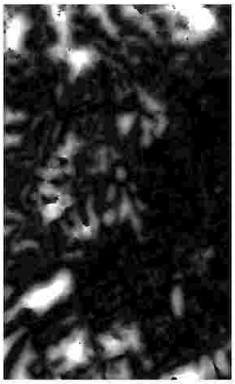
3.1.6.4.1. Εφαρμογή σε εικόνες με διαφορετική ανάλυση

Η γενική αρχή ότι η χρήση εικόνων με έντονες διακυμάνσεις έντασης απαιτεί μικρότερα παράθυρα θα πρέπει να ισχύει και στην αυτόματη μέθοδο. Η μείωση της ανάλυσης με επανασύσταση οδηγεί σε αύξηση του μεγέθους της φυσικής επιφάνειας που καλύπτει κάθε εικονοστοιχείο. Έτσι αυξάνει η πιθανότητα να υπάρχει μεγάλη διαφορά τιμών γκρίζου μεταξύ γειτονικών εικονοστοιχείων.

Η διαπίστωση αυτή είναι γενική και ουσιαστικά επεξηγεί το γεγονός ότι οι χρήστες πακέτων αυτόματων ΨΜΕ επιλέγουν σε δορυφορικές εικόνες μικρότερα μεγέθη παραθύρων από τα αντίστοιχα σε αεροφωτογραφίες. Οι εικόνες μεγάλης κλίμακας (επίγειες λήψεις) έχουν μεγάλες ομάδες εικονοστοιχείων με την ίδια ένταση (πχ. πολυκατοικία στην εικ. 3.9), ενώ οι δορυφορικές εικόνες έχουν περισσότερη υφή

(εικ. 3.3, 3.6 και 3.7). Οι εξαιρέσεις που υπάρχουν σε αυτό το γενικό κανόνα αφορούν μεγάλους υδάτινους όγκους (εικ. 3.7) και ερημοποιημένες περιοχές σε δορυφορικές εικόνες. Άμεσο αποτέλεσμα αυτού του ισχυρισμού είναι ότι οι μεγάλες επιφάνειες με ομοιογενείς τόνους τείνουν να εξαφανισθούν καθώς εξομαλύνονται με την γειτονική πληροφορία όταν η ανάλυση μειώνεται.

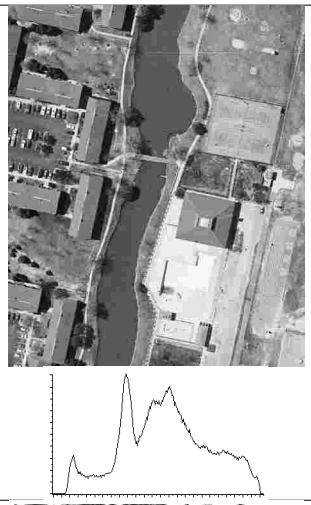
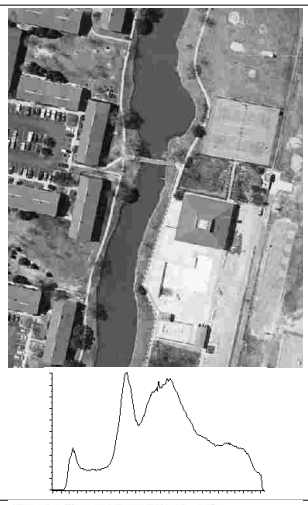
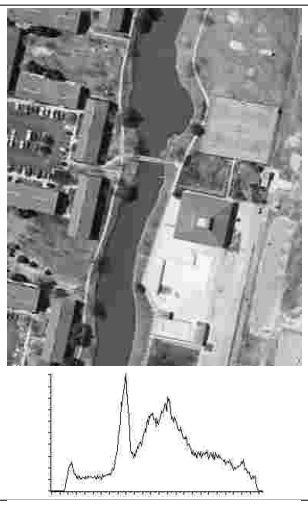
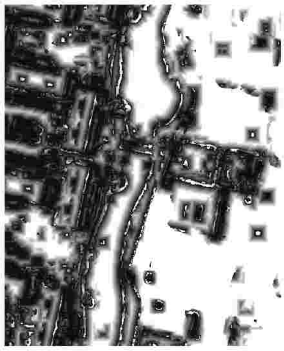
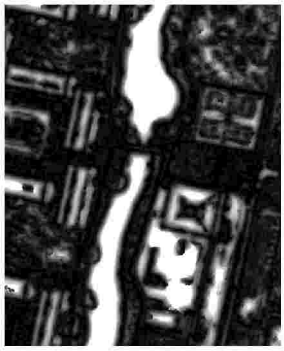
Στην εικόνα 3.4 φαίνεται ένα απόσπασμα αεροφωτογραφίας με μεγάλες περιοχές ομαλής έντασης (ποτάμι, γήπεδα τένις και πισίνα με τον περιβάλλοντα χώρο), καθώς και οι διαδοχικές μειωμένες αναλύσεις με τα αντίστοιχα ιστογράμματα. Χρησιμοποιώντας το προαναφερθέν πρόγραμμα που υπολογίζει το μέγεθος των παραθύρων και το μεταφράζει σε εικόνα γκρίζων τόνων ανάλογα με το προτεινόμενο από την κάθε μέθοδο μέγεθος παραθύρου, δημιουργήθηκαν οι υπόλοιπες εικόνες. Το μέγιστο μέγεθος παραθύρου είναι σε όλες τις περιπτώσεις 35x35, ενώ σε περίπτωση αποτυχίας υπολογισμού κατάλληλου μεγέθους στο εύρος παραθύρων από 7x7 έως 35x35 ο αλγόριθμος επιστρέφει 255, δηλαδή λευκό. Σε αυτή την περίπτωση ανήκει η περιοχή στο κέντρο του ποταμού όπου όλες οι μέθοδοι επιστρέφουν μεγάλες ή καθόλου τιμές, ενώ στις άκρες όπου υπάρχει αντίθεση με τις όχθες το μέγεθος μειώνεται όπως αναμενόταν.

Μέθοδος υπολογισμού παραθύρων		Στατιστική ανάλυση	Εντροπία	Τροποποίηση αλγορίθμου Förstner
Αρχική				
Μειωμένη ανάλυση στο 50%				

Εικόνα 3.3. Λεπτομέρεια δορυφορικής εικόνας IKONOS σε κανονική και μειωμένη ανάλυση, με τα αντίστοιχα αποτελέσματα από τις τρεις προτεινόμενες μεθοδολογίες υπολογισμού μεγέθους παραθύρου. Είναι εμφανής η μετάβαση σε μικρότερα μεγέθη παραθύρων (σκουρότεροι τόνοι) καθώς μειώνεται η ανάλυση και αυξάνει το μέγεθος των εικονοστοιχείων.

Καθώς μειώνεται η ανάλυση, μειώνεται και η απόσταση ανάμεσα στις όχθες σε εικονοστοιχεία, οπότε σωστά μειώνεται και το μέγεθος των προτεινόμενων παραθύρων, καθώς γεφυρώνεται η απόσταση. Από την μείωση της ανάλυσης όμως αμβλύνονται ορισμένα άλλα μικρά χαρακτηριστικά, οδηγώντας περιοχές με λίγη πληροφορία (όπως στην περιοχή του γηπέδου τένις και της πισίνας) να ομογενοποιούνται και να επιστρέφουν, σωστά, μεγαλύτερες τιμές παραθύρων (πιο ανοιχτοί τόνοι). Στις στέγες των σπιτιών (εικ. 3.4) υπάρχουν περιοχές με ανοιχτούς τόνους, αφού το πλάτος τους είναι μεγαλύτερο από 35 εικονοστοιχεία και όταν το 35x35 παράθυρο ελέγχου καλύπτει ομοιογενείς τόνους έντασης επιστρέφει μεγάλες τιμές. Στις χαμηλότερες αναλύσεις όμως, όπου το πλάτος αυτό μειώνεται και το 35x35 υπερκαλύπτει την στέγη και έχει επάρκεια πληροφορίας, τα επιστρεφόμενα μεγέθη μειώνονται και έχουν πιο σκούρους

τόνους. Παρόμοια συμπεριφορά επιδεικνύεται και με τις δορυφορικές εικόνες (εικ. 3.3). Σε γενικές γραμμές, η συμπεριφορά των αλγορίθμων κρίνεται ικανοποιητική και σύμφωνη με τους σκοπούς ανάπτυξής τους, οπότε δικαιολογείται η περαιτέρω διερεύνησή τους. Οι μεγάλες διαφορές ανά αλγόριθμο στις επιστρεφόμενες τιμές αποτελούν αντικείμενο μελέτης των παραμέτρων τους και γενικότερης αξιολόγησής τους (κεφάλαιο 4).

Μέθοδος υπολογισμού παραθύρων	Αρχική	Μειωμένη ανάλυση στο 50%	Μειωμένη ανάλυση στο 25%
			
Στατιστική ανάλυση			
Εντροπία			
Τροποποίηση αλγορίθμου Förstner			

Εικόνα 3.4. Λεπτομέρεια αεροφωτογραφίας σε κανονική και μειωμένες διαδοχικά αναλύσεις, με τα αποτελέσματα από τις τρεις προτεινόμενες μεθοδολογίες δυναμικού υπολογισμού μεγέθους παραθύρου. Είναι εμφανής η μετάβαση σε μικρότερα μεγέθη παραθύρων καθώς μειώνεται η ανάλυση. Κάτι παρόμοιο συμβαίνει και στις δορυφορικές εικόνες.

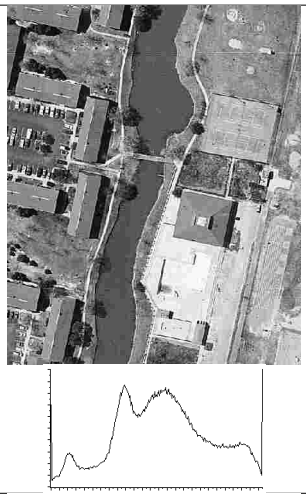
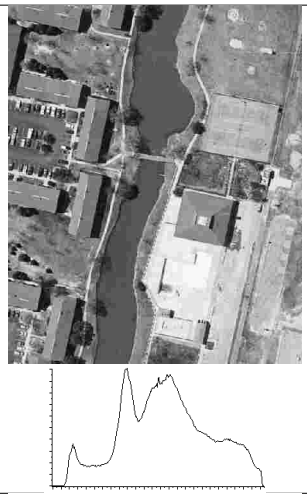
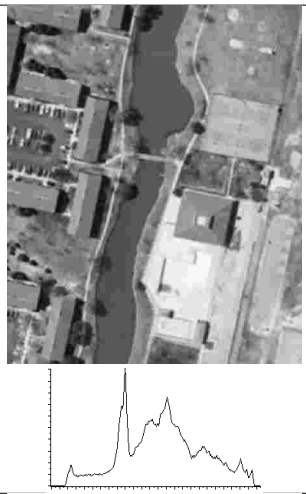
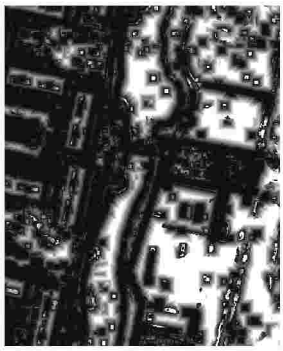
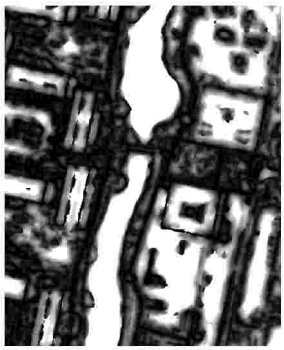
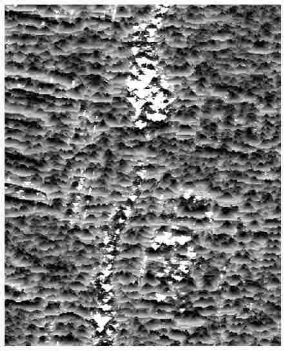
3.1.6.4.2. Εφαρμογή σε εικόνες με διαφορετικό βαθμό εξομάλυνσης.

Η εφαρμογή των αλγορίθμων σε εξομαλυμένες εικόνες αναμένεται να οδηγήσει σε μεγαλύτερα μεγέθη παραθύρων, αφού η περιεχόμενη πληροφορία είναι λιγότερη όσο πιο "ομαλοποιημένη" είναι η εικόνα. Για τον σκοπό αυτό, από την παραπάνω αρχική εικόνα δημιουργήθηκαν δύο νέες εικόνες, μία με εξομάλυνση και μία με ενίσχυση ακμών. Στη συνέχεια για αυτές τις τρεις εικόνες υπολογίστηκαν τα μεγέθη παραθύρων από τους προτεινόμενους αλγορίθμους. Η αρχική υπόθεση επαληθεύεται όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.5, όπου η εξομαλυμένη εικόνα επιστρέφει πιο ανοιχτούς τόνους (μεγαλύτερα παράθυρα) με όλες τις μεθόδους.

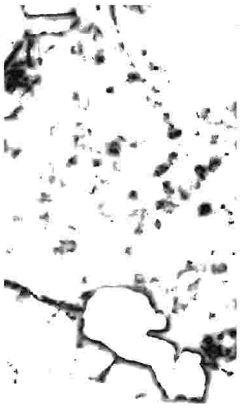
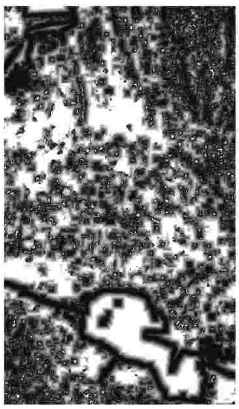
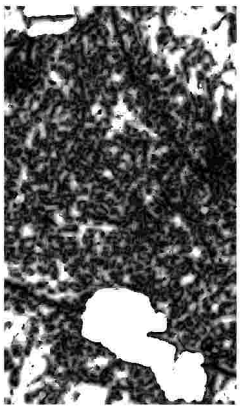
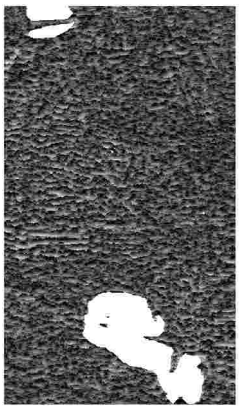
Για τους σκοπούς της ίδιας μελέτης χρησιμοποιήθηκαν και δορυφορικές εικόνες, που κατεξοχήν εμπεριέχουν περισσότερη υφή. Τα αρχικά δορυφορικά αποσπάσματα από IKONOS και LANDSAT που χρησιμοποιήθηκαν έχουν πολύ μικρό εύρος τιμών, όπως φαίνεται και στα ιστογράμματά τους (εικ. 3.6 και 3.7). Η αρχική εικόνα IKONOS υπέστη μείωση του δυναμικού εύρους τιμών από 11bit (2048 τόνοι έντασης) σε 8 bit (256 τόνοι έντασης) προκειμένου να υποστεί επεξεργασία από το πρόγραμμα και προκειμένου να υπάρχει αντιστοιχία. Αμφότερες οι εικόνες υπέστησαν βελτίωση του ιστογράμματος ώστε οι τιμές τους να καλύπτουν όλο το εύρος τιμών και να έχουν καλύτερη αντίθεση. Αναμένεται ότι οι ενισχυμένες εικόνες της αυτής περιεχόμενης πληροφορίας αλλά μεγαλύτερης αντίθεσης θα πρέπει να οδηγήσουν σε μικρότερα παράθυρα. Η εφαρμογή όλων των αλγορίιθμων (εικ. 3.7) επιβεβαιώνει την υπόθεση, αφού οι ενισχυμένες εικόνες επιστρέφουν κατά κανόνα μικρότερα παράθυρα.

Θα πρέπει να σημειωθεί η αδυναμία του τροποποιημένου αλγορίθμου Förstner να ανιχνεύσει τη λίμνη στην αρχική εικόνα LANDSAT, όπου επιστρέφει σχετικά μικρά παράθυρα για συνταύτιση, κάτι που δεν είναι σωστό. Το ίδιο φαινόμενο παρατηρήθηκε και στην ενισχυμένη εικόνα LANDSAT με τις μεθόδους εντροπίας και Förstner. Οι διαδοχικές δοκιμές με διαφορετικές παραμέτρους q_{lim} και w_{lim} στον προτεινόμενο αλγόριθμο οδήγησε στην δημιουργία των τελικών όπου η λίμνη έχει ανιχνευθεί σωστά και στην οποία ο αλγόριθμος επιστρέφει μεγάλα παράθυρα.

Η εικόνα IKONOS και η βελτιωμένη εκδοχή της (εικ. 3.9), επιδεικνύουν την ίδια ακριβώς συμπεριφορά, αποδεικνύοντας ότι οι αλγόριθμοι προσαρμόζουν σωστά το μέγεθος του παραθύρου στο περιεχόμενό του.

Μέθοδος υπολογισμού παραθύρων	Με ενίσχυση ακμών	Αρχική	Με εξομάλυνση
Αρχική			
Στατιστική ανάλυση			
Εντροπία			
Τροποποίηση αλγορίθμου Förstner			

Εικόνα 3.5. Λεπτομέρεια αεροφωτογραφίας, με την αντίστοιχη εικόνα ενισχυμένη και εξομαλυμένη. Η εφαρμογή των προτεινόμενων μεθοδολογιών οδηγεί σε μεγαλύτερα μεγέθη παραθύρων (ανοιχτοί τόνοι) από την ενισχυμένη προς την εξομαλυμένη εικόνα.

Μέθοδος υπολογισμού μεγέθους παραθύρων	Αρχική	Στατιστική ανάλυση	Εντροπία	Τροποποίηση αλγορίθμου Förstner
LANDSAT αρχική				
LANDSAT με βελτιστο-ποιημένο ιστόγραμμα				

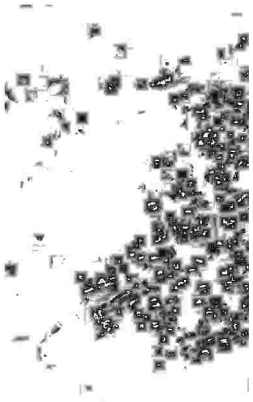
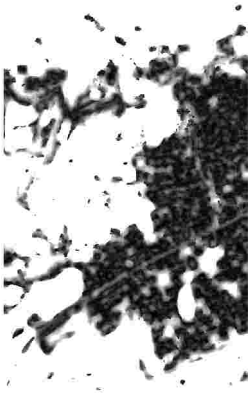
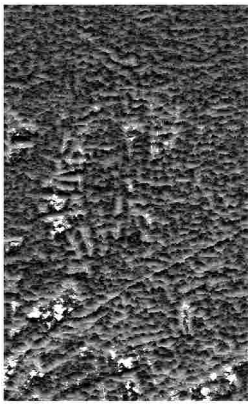
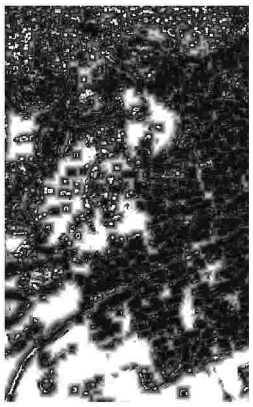
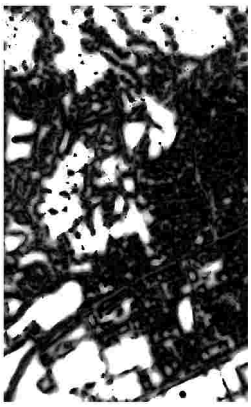
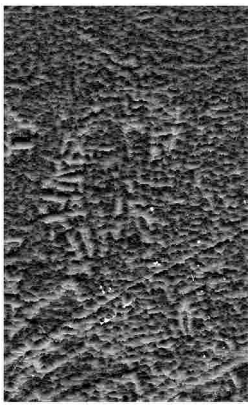
Εικόνα 3.6. Εφαρμογή των προτεινόμενων αλγορίθμων υπολογισμού μεγέθους παραθύρου συνταύτισης σε εικόνα LANDSAT. Η λίμνη και γενικά οι υδάτινες επιφάνειες έχουν ανιχνευθεί σωστά, αλλά χρειάστηκε βελτιστοποίηση των παραμέτρων για να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα. Όλοι οι αλγόριθμοι πάντως επιστρέφουν μικρότερα παράθυρα στην βελτιστοποιημένη εικόνα.

3.1.6.4.3. Εφαρμογή σε εικόνες με διαφορετικά αντικείμενα (μεγάλης κλίμακας)

Ενδιαφέρον παρουσιάζει και η συμπεριφορά των αλγορίθμων σε πιο ιδιάζουσες περιπτώσεις εικόνων. Για το σκοπό αυτό επιλέχθηκαν τρεις χαρακτηριστικές εικόνες. Στην πρώτη απεικονίζεται ένα μαρμάρινο κεφάλι παιδιού (έκθεμα του Πανεπιστημιακού μουσείου του Cambridge) στο οποίο επιχειρήθηκε αυτόματη συνταύτιση με εμπορικό πακέτο λογισμικού και απέτυχε. Η χειροκίνητη εξαγωγή ΨΜΕ αποδείχθηκε εξαιρετικά επίπονη επειδή το μάρμαρο έχει ομοιογενή ένταση, είναι ημιδιαφανές υλικό και οι κρύσταλλοι που περιέχει ανάλογα με την γωνία λήψης αντανακλούν ισχυρά το φως. Η διαφορά θέασης ανάμεσα στην αριστερή και δεξιά εικόνα του ζεύγους δημιουργεί διαφορετικές αντανακλάσεις δυσχεραίνοντας την σκόπευση. Λογικά οι αλγόριθμοι θα πρέπει να κινηθούν σε μεγάλα παράθυρα, εκτός από τις ακμές και τις σκιές.

Η πολυκατοικία ως αντικείμενο φωτογράφησης παρουσιάζει ενδιαφέρον επειδή έχει μεγάλες ομοιογενείς επιφάνειες, αναγκάζοντας τους αλγόριθμους να επιστρέφουν μεγάλες τιμές, ενώ στις ακμές και στις αλλαγές τονικότητας θα πρέπει τα παράθυρα να μικραίνουν.

Τέλος χρησιμοποιήθηκε μια τεχνητή εικόνα με βασική υφή "σκακιέρας", όπου όμως κάθε τετράγωνο στο κέντρο του αλλάζει ένταση δημιουργώντας ένα τοπικό ακρότατο αντίθετης έντασης. Η εικόνα αυτή περιέχει πολλή πληροφορία γεγονός το οποίο αποδεικνύεται και από την μορφή του ιστογράμματός της. Αναμένεται η εικόνα αυτή να οδηγήσει σε πολύ μικρές τιμές παραθύρων.

Μέθοδος υπολογισμού μεγέθους παραθύρων	Αρχική	Στατιστική ανάλυση	Εντροπία	Τροποποίηση αλγορίθμου Förstner
IKONOS αρχική				
IKONOS με βελτιστοποιημένο ιστόγραμμα				

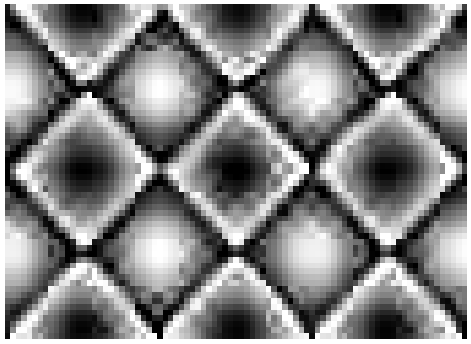
Εικόνα 3.7. Εφαρμογή των προτεινόμενων αλγορίθμων υπολογισμού μεγέθους παραθύρου συνταύτισης σε εικόνα IKONOS. Η αύξηση της αντίθεσης οδηγεί σε μικρότερα παράθυρα από όλους τους αλγορίθμους.

Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή των αλγορίθμων στις παραπάνω φωτογραφίες ακολουθούν σε γενικές γραμμές τις προβλέψεις. Αναλυτικότερα:

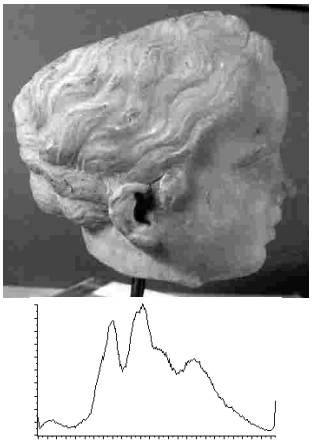
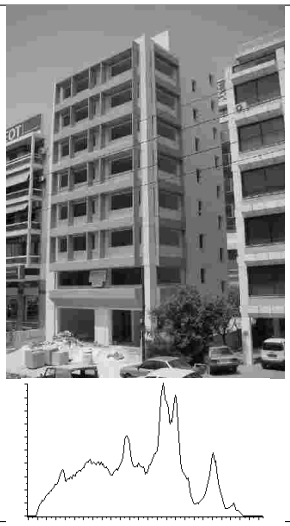
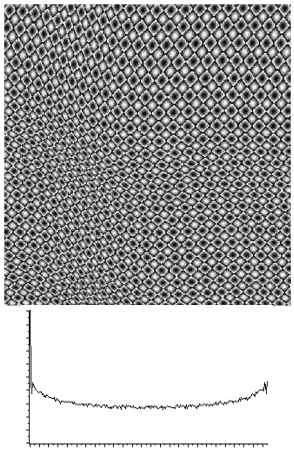
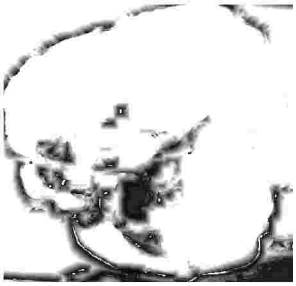
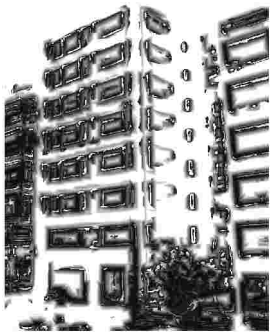
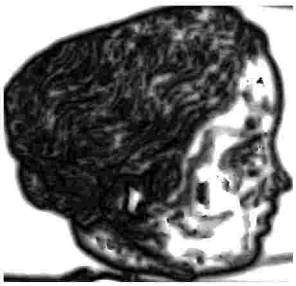
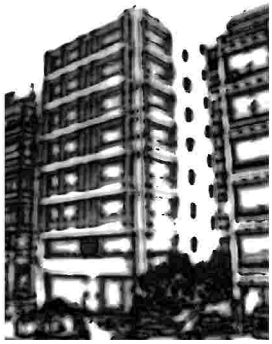
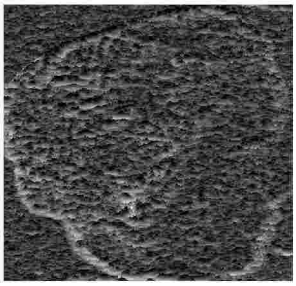
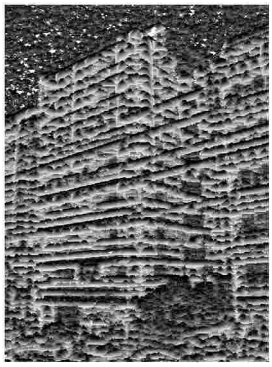
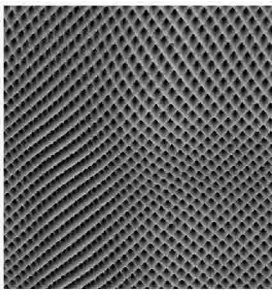
Στο μαρμάρινο κεφάλι η μέθοδος της στατιστικής ανάλυσης επιστρέφει πολύ μεγάλα παράθυρα, όπως αναμενόταν. Οι ακμές, οι λιγοστές σκιές στα μαλλιά και το φόντο έχουν αποδοθεί σωστά. Με καλύτερη ρύθμιση των παραμέτρων του συγκεκριμένου αλγορίθμου ίσως να επιτυγχάνονταν καλύτερα αποτελέσματα. Ο αλγόριθμος της εντροπίας περιγράφει ακόμα καλύτερα τις ομοιογενείς περιοχές και μειώνει σωστά το μέγεθος στα μαλλιά που έχουν περισσότερη υφή. Η τροποποίηση του τελεστή Förstner επιστρέφει πολύ μικρά παράθυρα στο σύνολο της εικόνας και τα αποτελέσματά του δεν εναρμονίζονται με τα αναμενόμενα από την ανθρώπινη αντίληψη μεγέθη παραθύρων, όπως συμβαίνει με τις υπόλοιπες μεθόδους.

Στην εικόνα της πολυκατοικίας οι αλγόριθμοι της στατιστικής ανάλυσης και της εντροπίας παρουσιάζουν πολύ καλά αποτελέσματα. Συμπεριφέρονται σωστά και στον ουρανό και στις μεγάλες επιφάνειες που έχουν ομοιόμορφη ένταση, και στις ακμές αλλαγής έντασης και στο δέντρο που έχει υφή. Η τροποποίηση του τελεστή Förstner δείχνει να συμπεριφέρεται καλά τόσο στον όγκο της πολυκατοικίας όσο και στο δέντρο. Στον ουρανό όμως, επιστρέφει μικρά παράθυρα, που δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα. Η χρήση διαφορετικών παραμέτρων ίσως να οδηγούσε σε καλύτερα αποτελέσματα.

Στην εικόνα με την τεχνητή υφή οι αλγόριθμοι της στατιστικής ανάλυσης και της εντροπίας επιστρέφουν πολύ μικρές τιμές, που στην πλειοψηφία τους είναι παράθυρα 7x7 και μερικά 9x9 που διακρίνονται με δυσκολία ως λίγο πιο ανοιχτές κουκκίδες. Το μέγεθος αυτό εξαρτάται άμεσα από το μέγεθος του επαναλαμβανόμενου προτύπου που χρησιμοποιήθηκε για την δημιουργία της εικόνας (εικ. 3.8). Η τροποποίηση του τελεστή Förstner συμπεριφέρεται εντελώς διαφορετικά, επιστρέφοντας μεγάλο εύρος τιμών, με ίση σχεδόν συχνότητα εμφάνισης μεταξύ τους και με "λογική" κατανομή ως προς την περιεχόμενη πληροφορία στην εικόνα. Το συμπέρασμα που προκύπτει από την συγκεκριμένη εικόνα είναι ότι ο τροποποιημένος αλγόριθμος Förstner είναι πολύ ευαίσθητος και οδηγεί εύκολα σε μεγάλες τιμές, την στιγμή που οι άλλες δύο μέθοδοι είναι πιο σταθερές και οδηγούν σε ποιο λογικοφανή μεγέθη.



Εικόνα 3.8. Επαναλαμβανόμενο πρότυπο που χρησιμοποιήθηκε για την δημιουργία της τεχνητής εικόνας στη εικόνα 3.9. Αποτελείται από πρότυπο τύπου "σκακιέρας" με πλευρές 10 εικονοστοιχείων, στραμμένο κατά 45°. Στο κέντρο κάθε τετράγωνου υπάρχει σημειακό φαινόμενο με αντίθετη ένταση. Στο σύνολο της εικόνας λοιπόν παρουσιάζονται έντονα γραμμικά και σημειακά φαινόμενα, αλλά στην γειτονιά κάθε σημείου υπάρχει πολλή πληροφορία.

Μέθοδος υπολογισμού παραθύρων	Μαρμάρινο κεφάλι με μ ικρή αντίθεση	Πολυκατοικία	Τεχνητή εικόνα
Αρχική			
Στατιστική ανάλυση			
Εντροπία			
Τροποποίηση αλγορίθμου Förstner			

Εικόνα 3.9. Εφαρμογή των προτεινόμενων αλγορίθμων σε εικόνες μεγάλης κλίμακας (μαρμάρινο κεφάλι παιδιού, πολυκατοικία) και μία τεχνητή εικόνα. Άξια προσοχής η απόκριση του αλγορίθμου Förstner στην τεχνητή εικόνα.

3.1.6.4.4. Συμπεράσματα εφαρμογής μεθόδων υπολογισμού μεγέθους παραθύρου συνταύτισης

Σκοπός της εφαρμογής των αλγορίθμων σε διαφορετικές περιπτώσεις εικόνων και περιεχομένου, ήταν ο έλεγχος της θεωρητικής βάσης με την οποία δημιουργήθηκαν οι αλγόριθμοι, δηλαδή κατά πόσο εξυπηρετούν τον σκοπό για τον οποίο δημιουργήθηκαν. Συνοψίζοντας τα αρχικά αυτά αποτελέσματα της εφαρμογής τους, μπορεί κανείς να καταλήξει στα εξής συμπεράσματα:

- Η μέθοδος της στατιστικής ανάλυσης είναι πολύ ευαίσθητη στον θόρυβο με αποτέλεσμα μεμονωμένα εικονοστοιχεία που εκτινάσσουν το εύρος τιμών σε ένα παράθυρο να επιστρέφουν εσφαλμένα μικρά παράθυρα.
- Η μέθοδος της εντροπίας είναι η ταχύτερη και ταυτόχρονα εκείνη της οποίας τα αποτελέσματα συμβαδίζουν περισσότερο με την ανθρώπινη αντίληψη περί μεγέθους παραθύρου.
- Η συμπεριφορά της τροποποιημένης μεθόδου Förstner δεν είναι συμβατή με την ανθρώπινη αντίληψη σχετικά με το αναμενόμενο μέγεθος παραθύρου, ενώ τα αποτελέσματά της διαφέρουν ριζικά από τις άλλες δύο.
- Όλοι οι αλγόριθμοι αντιδρούν θετικά και προς την σωστή κατεύθυνση στις αλλαγές κλίμακας και ανάλυσης.
- Όλοι οι αλγόριθμοι αντιδρούν θετικά και προς την σωστή κατεύθυνση στην αντίθεση των εικόνων

Η μέθοδος της εντροπίας είναι η ταχύτερη στην εφαρμογή, ενώ ταυτόχρονα διατηρεί ευαισθησία σε αλλαγές έντασης και μπορεί να ανιχνεύσει με επιτυχία τις γραμμές του τένις (για παράδειγμα) ακόμα και στην χαμηλότερη ανάλυση (εικ. 3.4). Παράλληλα παρουσιάζει ομοιόμορφη συμπεριφορά στο σύνολο της εικόνας χωρίς να παρασύρεται από έντονες διαφορές γκρίζων τόνων που δημιουργεί ο τοπικός θόρυβος, σε αντίθεση με τις άλλες δύο. Η τροποποίηση του τελεστή Förstner δεν οδηγεί σε οπτικά αποτελέσματα άμεσα ερμηνεύσιμα, κυρίως επειδή λαμβάνει υπόψη και την διεύθυνση, και κατά συνέπεια δεν μπορούν καταρχήν να εξαχθούν συμπεράσματα. Εκείνο που δημιουργεί ερωτηματικά είναι η επιστροφή μικρών τιμών παραθύρων στο ποτάμι και στην εικόνα με την μεγαλύτερη ανάλυση, εκεί δηλαδή που οι άλλες δύο επιστρέφουν λευκούς τόνους και μεγάλα παράθυρα. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να αποδοθεί στις παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν στην προκειμένη υλοποίηση καθώς και στο γεγονός ότι περιοχές με ομοιόμορφη ένταση επιστρέφουν μέτρο q πολύ κοντά στο 1 με συνέπεια να γίνονται εύκολα αποδεκτά.

3.1.7. Προτεινόμενη μεθοδολογία προσδιορισμού σχήματος

3.1.7.1. Θεωρητικό υπόβαθρο

Η ελαχιστοτετραγωνική συνταύτιση επιστρέφει ως λύση τις έξι γεωμετρικές παραμέτρους του αφινικού μετασχηματισμού. Επίσης επιστρέφει τον πίνακα μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας των έξι αγνώστων, δύο εκ των οποίων αφορούν την θέση του σημείου στους δύο άξονες. Η μεταβλητότητα και η συμμεταβλητότητα των δύο αυτών αγνώστων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αναπαρασταθεί με ακρίβεια η έλλειψη της συνταύτισης έντασης (Baltsavias, 1991, Trinder et al., 1995). Στην περίπτωση που το σημείο βρίσκεται πάνω σε ακμή τότε ο κύριος άξονας της έλλειψης είναι προσανατολισμένος κατά μήκος της ακμής, αφού η θέση του ομόλογου σημείου κατά μήκος της ακμής έχει μεγαλύτερη αβεβαιότητα από την αντίστοιχη σε κάθετη διεύθυνση. Όσο πιο καλά ορισμένη είναι αυτή η ακμή τόσο μεγαλώνει ο κύριος άξονας και τελικά καταλήγει σε απροσδιοριστία της θέσης επί αυτής της διεύθυνσης.

Η αποτυχία του αλγορίθμου συνταύτισης, τόσο λόγω λανθασμένου σημείου όσο και λόγω αδυναμίας σύγκλισης κατά μήκος ακμών, ήταν βασική παρατήρηση των πρώτων δοκιμών (εικ. 3.10). Ο τρόπος για να επιλυθεί αυτό το πρόβλημα ήταν η χρήση περισσότερης πληροφορίας κατά την διεύθυνση που ο ίδιος ο αλγόριθμος επισήμαινε. Η μορφή της έλλειψης είναι ιδανική γι' αυτό το σκοπό.

Η έλλειψη έχει και ένα ακόμα πλεονέκτημα. Περικλείοντας μικρότερη επιφάνεια και συγκεντρωμένη κοντά στην ακμή μειώνονται τα πιθανά γεωμετρικά προβλήματα με την απεικόνιση δύο διαφορετικών επιπέδων του χώρου στο ίδιο παράθυρο και κατ' επέκταση η πιθανή αποτυχία του αλγορίθμου λόγω γεωμετρικής ανεπάρκειας του αφινικού μετασχηματισμού να τα συνταιριάξει.

Ταυτόχρονα με την παρούσα μελέτη εξελισσόταν άλλη μία με παρόμοια λογική και σκοπούς. Αμφότερες οι μελέτες αγνοούσαν η μία την άλλη και πρωτοπαρουσιάστηκαν στην Κωνσταντινούπολη το 2004 (Skarlatos asnd Georgopoulos, 2004, και Pateraki and Baltsavias, 2004). Σκοπός της μελέτης των Pateraki and Baltsavias (2004) ήταν η βελτίωση του αλγορίθμου ελαχιστοτετραγωνικής συνταύτισης για την

προσαρμογή του στην γεωμετρία της Leica ADS40 με γραμμικούς σαρωτές. Η επιπολική γεωμετρία στις συγκεκριμένες φωτογραφίες δεν υλοποιείται με γραμμή αλλά με καμπύλη, γεγονός που δυσκολεύει την χρήση της. Στην μελέτη τους χρησιμοποιούνται ορθογώνια παράθυρα, προσανατολισμένα παράλληλα με την ακμή. Για τον προσανατολισμό γίνεται ανάλυση σήματος (ανίχνευση της ακμής) και το παράθυρο τοποθετείται παράλληλα. Το μήκος του χρησιμοποιούμενου παραθύρου δεν διευκρινίζεται, ενώ για το πλάτος αναφέρουν ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα σταθερό μέγεθος (πχ. 5 εικονοστοιχεία) ή από την ανάλυση των τόνων της "ράμπας" της ακμής να υπολογισθεί ένα κατάλληλο μέγεθος. Αναφέρουν ως κύριο λόγο της συγκεκριμένης επιλογής σχήματος την ικανότητά του να περικλείει σήμα μόνο από την ακμή και όχι από τον περιβάλλοντα χώρο, που μπορεί να εμπεριέχει θόρυβο ή να είναι μερικώς καλυμμένος (αόρατη περιοχή). Χωρίς να γίνεται σαφής αναφορά, αφήνεται να εννοηθεί ότι η συγκεκριμένη μέθοδος του ορθογωνίου παραθύρου εφαρμόζεται μόνο σε ακμές, ενώ στα υπόλοιπα χρησιμοποιείται το τετράγωνο.

Οι διαφορές ανάμεσα στην προαναφερθείσα μελέτη και την παρούσα αφορούν στο σχήμα του παραθύρου συνταύτισης (έλλειψη-ορθογώνιο) και στον τρόπο προσδιορισμού του προσανατολισμού των σχημάτων, καθώς και την σχέση ανάμεσα στις δύο διευθύνσεις. Μία ακόμα βασική διαφορά αφορά στον τρόπο προσδιορισμού του εμβαδού των σχημάτων. Επίσης, στην μελέτη των Pateraki et al. (2004), η διεύθυνση και η σχέση ανάμεσα στις πλευρές του ορθογωνίου επιλέγονται αρχικά με μετρήσεις των γκρίζων τόνων και διατηρούνται σταθερές καθ' όλη την διάρκεια των επαναλήψεων.

Εικόνα 3.10. Ελλείψεις σφάλματος στον προσδιορισμό ομόλογων σημείων με ελαχιστοτετραγωνική συνταύτιση. Το μέγεθος της έλλειψης υπολογίζεται με βάση την στατιστική μέθοδο.

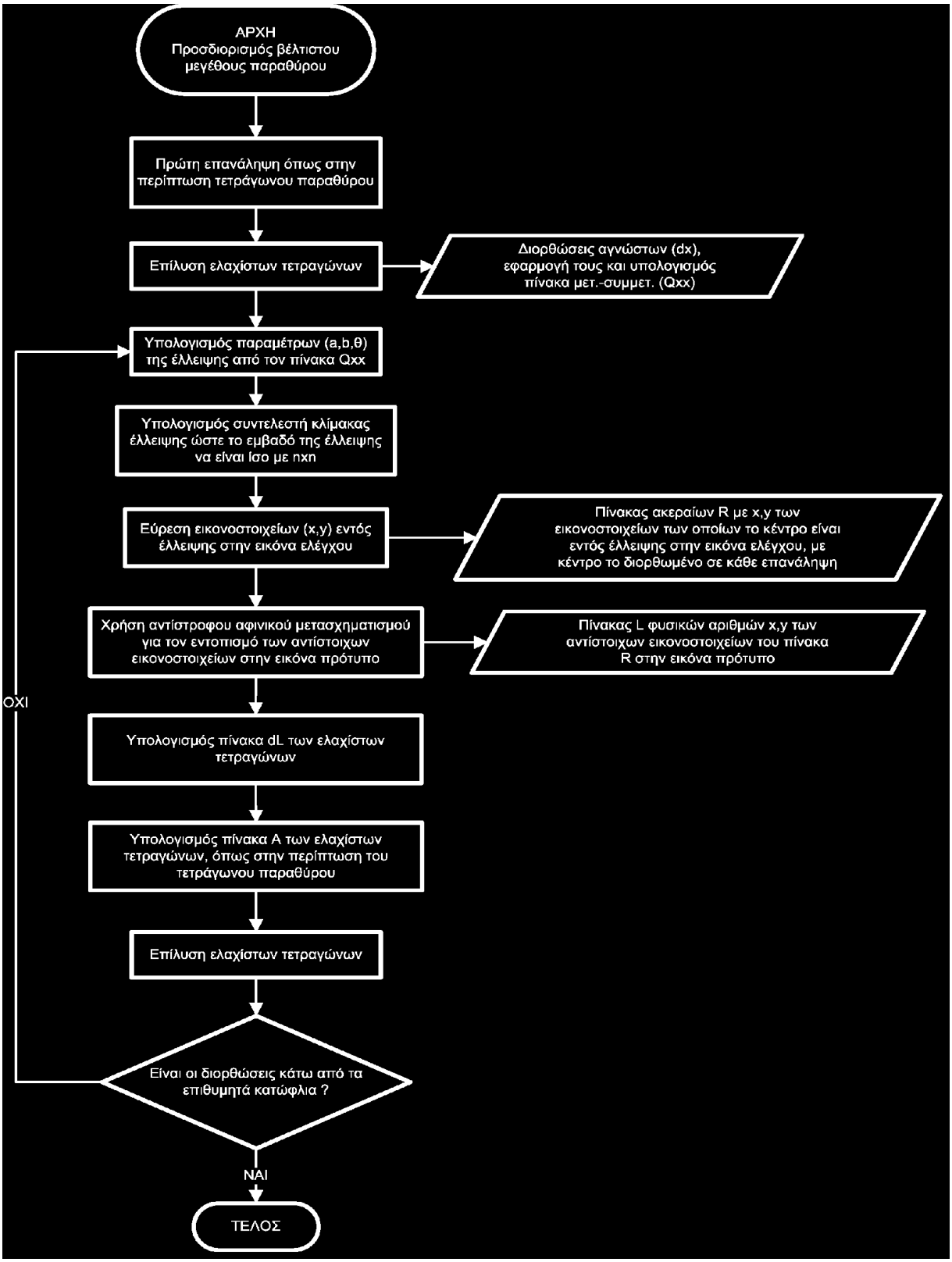
3.1.7.2. Μαθηματικό μοντέλο

Παρόλο που η ιδέα της έλλειψης είναι απλή στη σύλληψή της, κατά την εφαρμογή της σε υπολογιστικό μοντέλο παρουσιάζονται ορισμένα προβλήματα. Για λόγους ευκολίας, η αριστερή εικόνα ορίζεται ως πρότυπο και η δεξιά ως εικόνα αναζήτησης (template & search image ή master & slave image στην διεθνή βιβλιογραφία). Η βασική ιδέα χρήσης του πίνακα μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας για δημιουργία έλλειψης προκαλεί δύο βασικές διαφορές από την μέθοδο του τετραγώνου:

- το παράθυρο-πρότυπο δεν παραμένει σταθερό κατά την διάρκεια των επαναλήψεων γιατί εξαρτάται άμεσα από το σχήμα της έλλειψης,

- η επαναδειγματοληψία ουσιαστικά λαμβάνει χώρα στην εικόνα πρότυπο, και όχι στην εικόνα ελέγχου.

Το διάγραμμα ροής της μεθόδου φαίνεται στο σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.3. Διάγραμμα ροής προτεινόμενης μεθόδου ελαχιστοτετραγωνικής συνταύτισης με ελλειπτικό παράθυρο.

Επειδή οι παράμετροι του αφινικού μετασχηματισμού αναφέρονται στο παράθυρο ελέγχου, ο πίνακας

μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας καθώς και η έλλειψη αναφέρονται στην ίδια εικόνα. Από τον πίνακα μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας των δύο παραμέτρων θέσης και μόνο μπορεί κανείς να υπολογίζει τα βασικά μεγέθη της έλλειψης, ονομαστικά τον μικρό και μεγάλο ημιάξονα, καθώς και την στροφή. Η διαδικασία είναι απλή και περιγράφεται στη βιβλιογραφία της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων. Η γωνία δίνεται από τον τύπο:

$$\tan(2\theta) = \frac{2\sigma_{xy}}{\sigma_x^2 - \sigma_y^2} \quad \text{ή} \quad \tan(2\alpha) = \frac{2\sigma_{xy}}{\sigma_y^2 - \sigma_x^2} \tag{3.6}$$

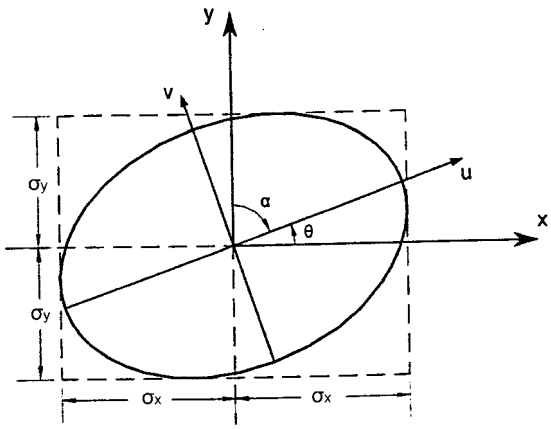
όπου τα μεγέθη φαίνονται στο σχήμα 3.4. Εάν υποτεθεί ότι θ_{max}, θ_{min} και α_{max}, α_{min} είναι οι διευθύνσεις του κύριου και του δευτερεύοντα ημιάξονα αντίστοιχα ισχύει:

$\sigma_x > \sigma_y$	$\sigma_{xy} > 0$	$\theta_{max} = \theta$	$\alpha_{max} = \alpha + 100^g$
$\sigma_x > \sigma_y$	$\sigma_{xy} < 0$	$\theta_{max} = \theta + 200^g$	$\alpha_{max} = \alpha + 100^g$
$\sigma_x < \sigma_y$	$\sigma_{xy} > 0$	$\theta_{max} = \theta + 100^g$	$\alpha_{max} = \alpha$
$\sigma_x < \sigma_y$	$\sigma_{xy} < 0$	$\theta_{max} = \theta + 100^g$	$\alpha_{max} = \alpha + 200^g$
$\sigma_x = \sigma_y$	$\sigma_{xy} > 0$	$\theta_{max} = 50^g$	$\alpha_{max} = 50^g$
$\sigma_x = \sigma_y$	$\sigma_{xy} < 0$	$\theta_{max} = 150^g$	$\alpha_{max} = 100^g$

Το μέγεθος των ημιαξόνων υπολογίζεται από τις:

$$\sigma_{\max}^2 = \sigma_u^2 = \frac{1}{2}\left[\left(\sigma_x^2 + \sigma_y^2\right) + \sqrt{\left(\sigma_x^2 - \sigma_y^2\right) + 4\sigma_{xy}^2}\right] \tag{3.7}$$

$$\sigma_{\min}^2 = \sigma_v^2 = \frac{1}{2}\left[\left(\sigma_x^2 + \sigma_y^2\right) - \sqrt{\left(\sigma_x^2 - \sigma_y^2\right) + 4\sigma_{xy}^2}\right] \tag{3.8}$$



Σχήμα 3.4. Χαρακτηριστικές τιμές της έλλειψης.

Το εμβαδόν της έλλειψης που υπολογίζεται με αυτούς τους ημιάξονες είναι μικρότερο από τη μονάδα, γεγονός αναμενόμενο, αφού οι τελικές αβεβαιότητες είναι περίπου 0.1 του εικονοστοιχείου ή και μικρότερες. Κατά συνέπεια πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένας συντελεστής για να μεγαλώσει η έλλειψη και να καλύψει ικανό αριθμό εικονοστοιχείων. Το εμβαδό που πρέπει να καλύπτουν τα εικονοστοιχεία, δίνεται από μια εκ των μεθόδων που περιγράφονται στην παράγραφο 3.1.6, και εφαρμόζεται πριν την ελαχιστοτεραγωνική συνταύτιση. Το εμβαδόν της έλλειψης υπολογίζεται από τον τύπο

$$E_{\text{έλλειψης}} = \pi \text{ a b} = \pi\, \sigma_{\min}\sigma_{\max} \tag{3.9}$$

όπου a,b ο μικρός και μεγάλος ημιάξονας αντίστοιχα. Κατά συνέπεια ο ζητούμενος συντελεστής με τον οποίο πρέπει να πολλαπλασιαστούν οι ημιάξονες για να ισούται το εμβαδόν της έλλειψης με το επιθυμητό εμβαδόν είναι $\sqrt{\frac{\text{νέο_εμβαδό}}{\pi \cdot \sigma_{\min}\sigma_{\max}}}$.

Επόμενο βήμα είναι ο προσδιορισμός των εικονοστοιχείων που ανήκουν στην διευρυμένη έλλειψη. Προκειμένου να ανήκει ένα εικονοστοιχείο στην έλλειψη θα πρέπει ποσοστό 50% της επιφάνειάς του να είναι εντός της έλλειψης. Ο υπολογισμός αυτός είναι αρκετά περίπλοκος, οπότε για λόγους ταχύτητας και

χωρίς να θίγεται η βασική ιδέα της μεθόδου, επιλέγονται τα εικονοστοιχεία των οποίων το κέντρο βρίσκεται εντός της έλλειψης.

Για το σκοπό αυτό υπολογίζονται οι δύο εστίες της έλλειψης e_1 και e_2 (σχ. 3.5). Οι εστίες βρίσκονται εκατέρωθεν του κέντρου της έλλειψης, επί του μεγάλου ημιάξονα σε απόσταση $\gamma = \sqrt{\sigma_{\max}^2 - \sigma_{\min}^2}$. Οι εστίες έχουν συντεταγμένες στο σύστημα της έλλειψης (±γ,0) και εφόσον στραφούν κατά γωνία θ και μετατεθούν κατά X_o και Y_o, όπου (X_o,Y_o) το κέντρο της έλλειψης

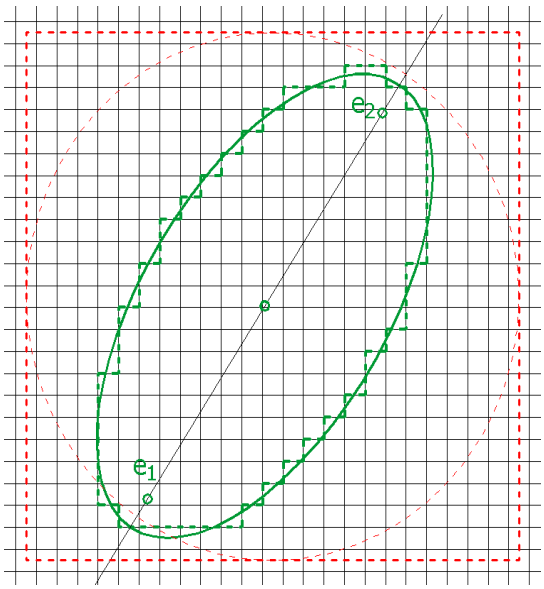
$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix}_{e_1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}_{e_1} + \begin{bmatrix} X_o \\ Y_o \end{bmatrix}_{\text{κέντρο_της_έλλειψης}} \tag{3.10}$$

αποκτούν συντεταγμένες στο τοπικό σύστημα οπου λαμβάνει χώρα η συνταύτιση. Για να ανήκει ένα σημείο (το κέντρο ενός εικονοστοιχείου) στην έλλειψη, θα πρέπει να ισχύει:

$$dist(e_1, p) + dist(e_2, p) < 2a \tag{3.11}$$

όπου a ο μεγάλος ημιάξονας και p το σημείο υπό έλεγχο.

Ο έλεγχος αυτός γίνεται για όλα τα εικονοστοιχεία που βρίσκονται στο τετράγωνο με μήκος πλευράς το διπλάσιο του μεγάλου άξονα της έλλειψης και κέντρο το πλησιέστερο εικονοστοιχείο στο κέντρο της έλλειψης. Η διαδικασία αυτή είναι απλή και έχει μικρό σχετικά υπολογιστικό κόστος. Μοναδικό μειονέκτημα είναι ότι το πλήθος των επιλεγμένων εικονοστοιχείων δεν αντιστοιχεί πλήρως στο επιθυμητό. Από στατιστικά δεδομένα προκύπτει ότι οι διαφορές αυτές δεν ξεπερνούν το ±2% στο 99% των περιπτώσεων. Είναι φυσικό ότι για μικρές ελλείψεις το ποσοστό αυτό είναι μεγαλύτερο, ενώ για μεγάλες μειώνεται. Σε καμμία περίπτωση όμως αυτές οι διαφορές δεν επηρεάζουν την βασική ιδέα της μεθόδου.



Σχήμα 3.5. Η έλλειψη με την αντίστοιχη περιοχή ελέγχου (κόκκινη διακεκομμένη) και τα τελικώς επιλεγμένα εικονοστοιχεία (πράσινη διακεκομμένη). Εμβαδόν έλλειψης 221 και πολυγώνου 218, αντιστοιχώντας σε ποσοστιαία διαφοροποίηση <1.5%.

Το επόμενο βήμα είναι η αντιστροφή του αφινικού μετασχηματισμού, ώστε τα επιλεγμένα εικονοστοιχεία στην εικόνα ελέγχου να αποκτήσουν συντεταγμένες στην εικόνα πρότυπο. Οι 3.3 εάν λυθούν ως προς x_o και y_o δίνουν:

$$\begin{aligned} x_o &= \frac{a_{21}b_{11} - b_{21}a_{11} + b_{21}x - a_{21}y}{u} \\ y_o &= \frac{b_{12}a_{11} - a_{12}b_{11} - b_{12}x + a_{12}y}{u} \end{aligned} \tag{3.12}$$

όπου $u = a_{12}b_{21} - a_{21b_{12}}$. Πρόκειται για έναν ακόμα αφινικό μέσω του οποίου οι ακέραιες τιμές των εικονοστοιχείων της εικόνας ελέγχου μετασχηματίζονται σε πραγματικούς αριθμούς στην εικόνα πρότυπο, γεγονός που σημαίνει ότι πρέπει να εφαρμοστεί επαναδειγματοληψία. Στην προκειμένη εφαρμογή χρησιμοποιείται δι-γραμμική παρεμβολή επειδή έχει την καλύτερη σχέση ποιότητας-ταχύτητας. Εν

συνεχεία σχηματίζονται οι πίνακες **A** και **d**l όπως και στην παράγραφο 2.7.4.

3.2. Στρατηγική συνταύτισης

Η επιλογή της στρατηγικής συνταύτισης ήταν απλή διαδικασία γιατί υπήρχαν δύο μόνο βασικές περιπτώσεις (ενότητα 2.8). Σκοπός ήταν η δημιουργία ενός απλού εργαλείου συνταύτισης όλης της εικόνας, ώστε να είναι εφικτή η συλλογή σημείων σε όλο το μοντέλο και να μην περιοριστεί η σύγκριση τετραγωνικού και ελλειπτικού παραθύρου σε μερικές μεμονωμένες περιπτώσεις. Η στρατηγική συνταύτισης που εφαρμόστηκε τελικά βασίζεται στη μέθοδο Otto & Chau (1989). Η μέθοδος αυτή επιλέχθηκε ως βάση επειδή είναι απλούστερη στην εφαρμογή, μπορεί να δουλέψει πάνω στις αρχικές εικόνες χωρίς την ανάγκη δημιουργίας πυραμίδων και καταφέρνει να απομονώνει περιοχές με ομοιόμορφους τόνους έντασης. Μειονέκτημά της είναι η ανάγκη συλλογής αρχικών σημείων σε όλες τις "ανεξάρτητες" περιοχές. "Ανεξάρτητες" περιοχές είναι εκείνες που έχουν μεγάλη διαφορά παράλλαξης x μεταξύ τους, όπως το δέντρο στο σχήμα 2.13, που χωρίζει την εικόνα σε τρεις ανεξάρτητες περιοχές με διαφορετική παράλλαξη x. Ανάλογες "ανεξάρτητες" περιοχές είναι και εδάφη που χωρίζονται πλήρως από υδάτινους όγκους.

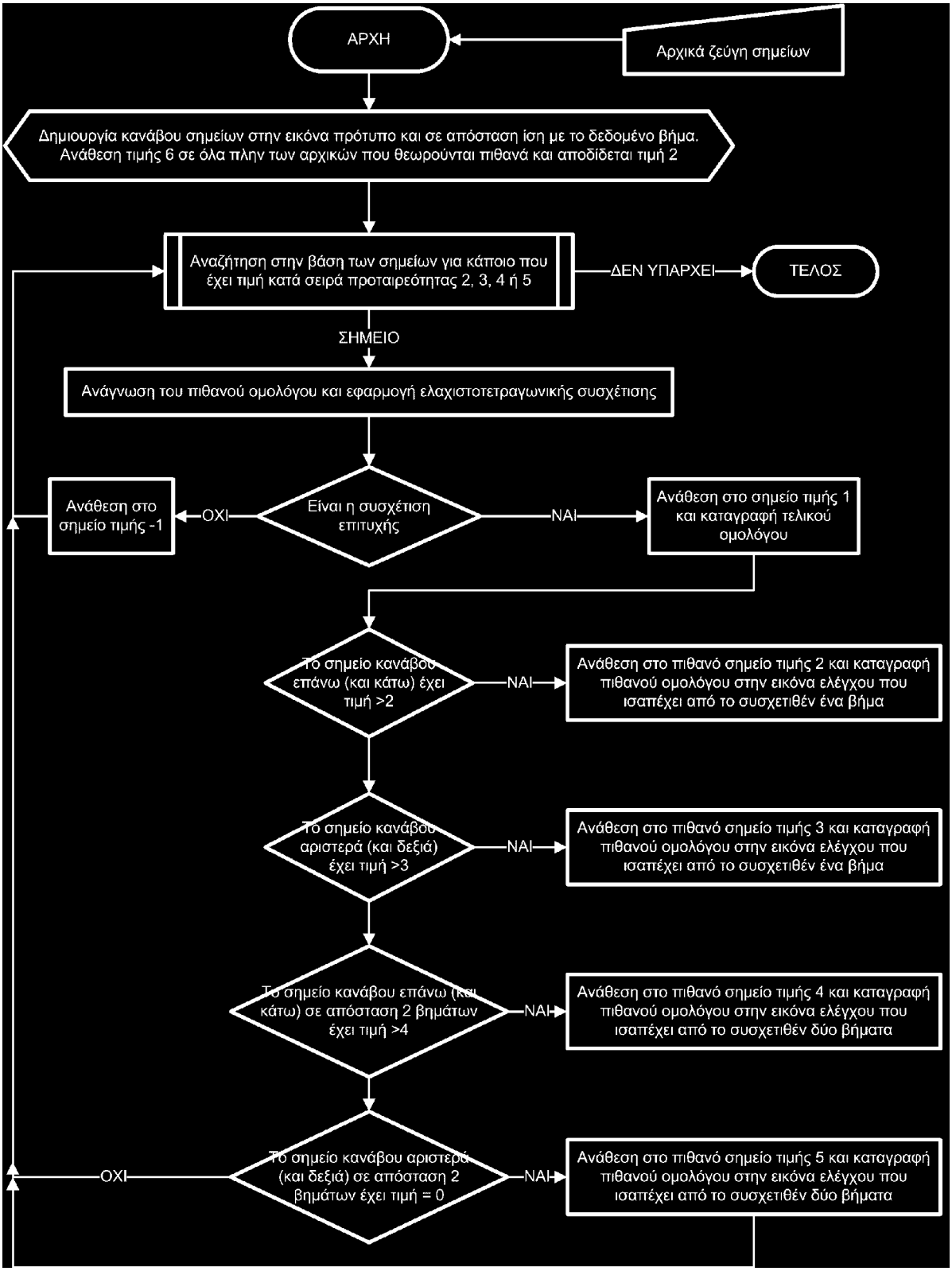
3.2.1. Προτεινόμενη στρατηγική συνταύτισης

Η στρατηγική συνταύτισης που εφαρμόστηκε βασίζεται στην βασική ιδέα που περιγράφεται από τους Otto & Chau (1989). Σε αυτή χρησιμοποιούνται μερικά αρχικά ζεύγη ομολόγων σημείων, από τα οποία ξεκινάει η συνταύτιση και εξαπλώνεται στα γειτονικά, εφόσον συσχετισθούν επιτυχώς. Τα σημεία αυτά έχουν την λογική ότι είναι σημεία ενδιαφέροντος, δηλαδή ξεχωρίζουν αρκετά από το περιβάλλον ώστε η πιθανότητα αποτυχίας της συνταύτισης να είναι μικρή. Τέτοια σημεία πρέπει να συλλέγονται χειρωνακτικά σε όλες τις "ανεξάρτητες" περιοχές του μοντέλου (παρ. 2.8.2).

Από τις πρώτες εφαρμογές του μοντέλου παρατηρήθηκε ότι περιοχές με ομοιόμορφους τόνους απορρίπτονται από τον αλγόριθμο συνταύτισης και κατά συνέπεια η στρατηγική συνταύτισης αποτυγχάνει αφού δεν επεκτείνεται πέρα από εκείνες τις περιοχές. Έτσι, ομοιόμορφες περιοχές δεν έχουν συσχετισθέντα σημεία, γεγονός που όμως είναι ευπρόσδεκτο αφού αναγκάζει εκ των υστέρων τον παρατηρητή να επισκεφτεί τις εν λόγω περιοχές και να συλλέξει σημεία εάν μπορεί. Δεν πρέπει να ξεχνάμε ότι σε αυτές τις περιοχές υπάρχει πραγματικό πρόβλημα που ακόμα και έμπειροι χειριστές δεν μπορούν να ξεπεράσουν (πχ. σημεία σε αμμώδεις εκτάσεις).

Παρατηρήθηκε επίσης ότι σε ορισμένες περιπτώσεις πολύ μεγάλα τμήματα της α/φ δεν καλύπτονται από συσχετισμένα σημεία (εικ. 3.12, αριστερή), χωρίς να υπάρχει προφανής λόγος. Παράλληλα με μικρή αύξηση του βήματος συλλογής οι περιοχές αυτές διαφοροποιούνται ελαφρώς και η κάλυψη αυξάνει. Η παρατήρηση αυτή οδηγεί στο συμπέρασμα ότι ορισμένα χαρακτηριστικά, εφόσον το μέγεθός τους ξεπερνά το βήμα του κανάββου, δημιουργούν πρόβλημα στην ομαλή συνέχεια της μεθόδου. Προκειμένου να ξεπεραστεί το εν λόγω πρόβλημα επινοήθηκε διαδικασία η οποία προβλέπει την προσθήκη περισσοτέρων πιθανόν σημείων και σε πολλαπλάσια του ζητούμενου βήματος συλλογής, αλλά με βάρος, εξασφαλίζοντας έτσι ότι η συνταύτιση θα συνεχίσει με τα πιο πιθανά ομόλογα σημεία. Παράλληλα δίνεται προτεραιότητα στα πιθανά ομόλογα κατά την διεύθυνση y. Η προτίμηση αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι οι μεταβολές κατά y είναι παρόμοιες και στις δύο α/φ, ενώ κατά την διεύθυνση x η παράλλαξη λόγω αναγλύφου μπορεί να επιφέρει μεγάλες μεταβολές. Η συγκεκριμένη υπόθεση έχει ισχύ μόνο σε αεροφωτογραφίες, αλλά τροποποιείται εύκολα ώστε να έχει εφαρμογή σε δορυφορικές λήψεις με κατά μήκος κάλυψη.

Έτσι, για κάθε συσχετισθέν σημείο ορίζονται τέσσερα πιθανά (πρώτου επιπέδου) σε απόσταση ίση με το βήμα συλλογής. Από αυτά τα κατά την διεύθυνση y έχουν μεγαλύτερη προτεραιότητα (βαθμός προτεραιότητας 2) και εκείνα κατά x μικρότερη (3). Επίσης ορίζονται άλλα τέσσερα (δεύτερου επιπέδου) σε απόσταση ίση με το διπλάσιο του βήματος συλλογής. Τα σημεία αυτά έχουν χαμηλότερη προτεραιότητα σε σχέση με τα αντίστοιχα του πρώτου επιπέδου και παράλληλα διατηρούν την μεταξύ τους σχέση που θέλει τα σημεία στη διεύθυνση y πιο πιθανά. Έτσι τους αποδίδονται βαθμοί προτεραιότητας 4 και 5. Ομοίως μπορεί να προστεθεί και τρίτο επίπεδο με αντίστοιχες προτεραιότητες 6 και 7. Σε κάθε περίπτωση δεν επιτρέπεται ανάθεση βαθμού προτεραιότητας σε πιθανά ομόλογα σημεία που η συνταύτιση έχει ήδη εφαρμοστεί (και έχει αποτύχει ή επιτύχει) καθώς και σε σημεία που έχουν χαμηλότερη προτεραιότητα. Έτσι εξασφαλίζεται ότι οι συντεταγμένες του πιθανού ομολόγου δεν θα χειροτερέψουν από επιτυχή συνταύτιση που έγινε σε κάποιο δυσμενέστερο σημείο.



Σχήμα 3.6. Διάγραμμα ροής προτεινόμενης στρατηγικής.

Το πλήθος των επιπέδων εξαρτάται από το βήμα συλλογής. Μεγάλο βήμα συλλογής δεν μπορεί να δικαιολογήσει πολλά επίπεδα, αφού η τριπλάσια απόσταση είναι πολύ μεγάλη για να ισχύουν οι υποθέσεις των Otto & Chau (1989). Ο καλύτερος συνδυασμός είναι μικρό βήμα (περίπου 15-20) συλλογής και το πολύ τρία επίπεδα. Μια παραλλαγή του αλγορίθμου εφαρμόζεται με οκτώ διευθύνσεις. Η παραλλαγή αυτή σε συνδυασμό με την χρήση πολλαπλών επιπέδων βήματος κανάβου εγκυμονεί κινδύνους για τα διαγώνια σημεία που απομακρύνονται ακόμα περισσότερο από το συσχετισθέν σημείο. Κατά συνέπεια δεν

προτείνεται η παράλληλη χρήση τους.

Εικόνα 3.11. Συλλεχθέντα σημεία με την απλή μέθοδο (αριστερή) και την τροποποιημένη με δύο επίπεδα (δεξιά). Αμφότερες με βήμα συλλογής 30 εικονοστοιχεία.

3.2.1.1. Αξιολόγηση στρατηγικής συνταύτισης

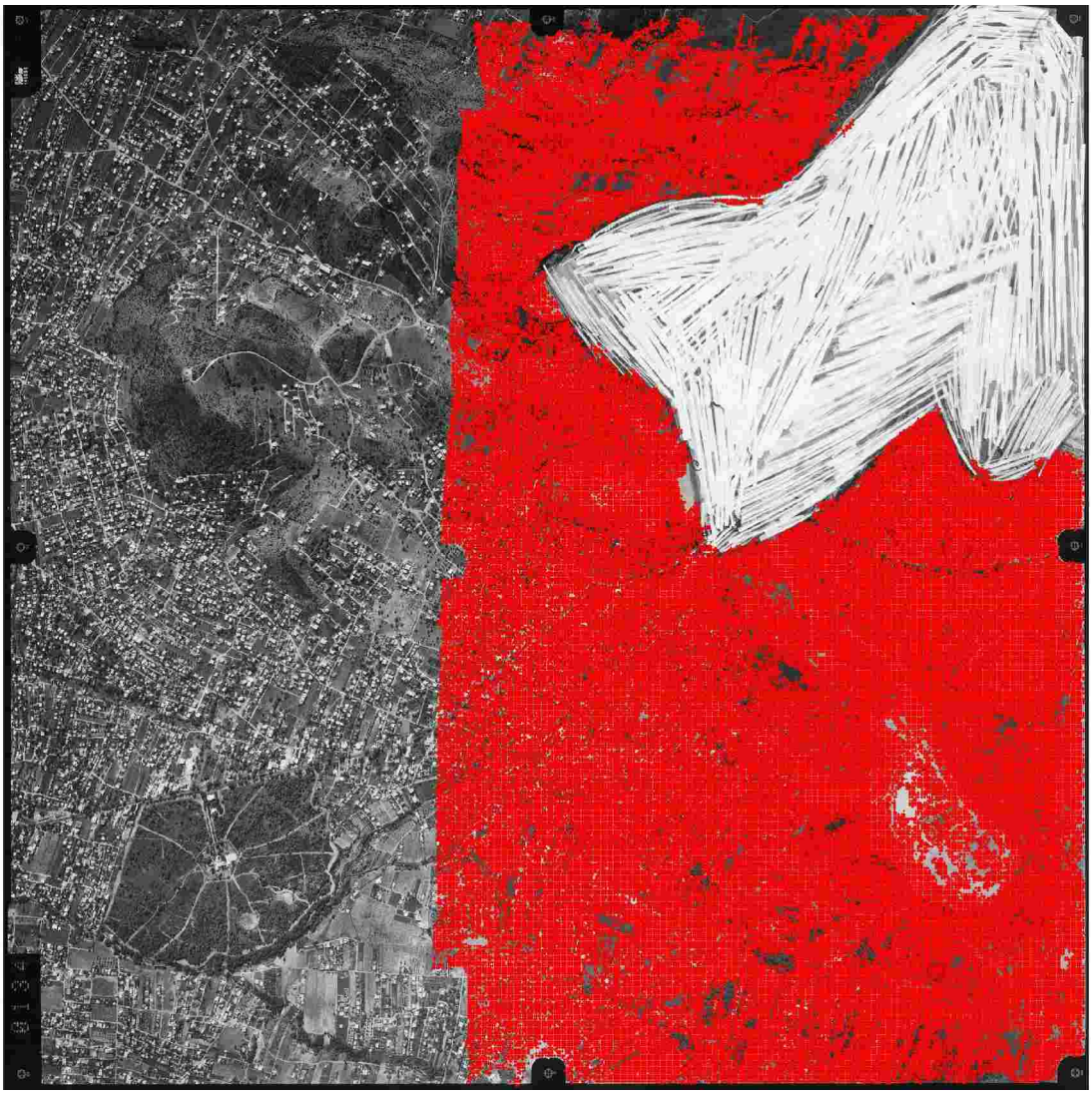
Βασικός στόχος της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση και πρόταση βελτιώσεων στην ελαχιστοτετραγωνική συνταύτιση και όχι η δημιουργία ενός συνολικά καλύτερου αλγορίθμου συνταύτισης, κάτι που δεν εμπίπτει στις προθέσεις αυτής της διδακτορικής διατριβής. Κύριο μέλημα στην παρούσα υλοποίηση ήταν μία απλή και λειτουργική στρατηγική συνταύτισης για αεροφωτογραφίες κυρίως και δευτερευόντως δορυφορικές λήψεις που όλο και περισσότερο αξιοποιούνται από την φωτογραμμετρία. Άλλωστε και η ψηφιακή φωτογραμμετρική μηχανή Leica ADS40 είναι γραμμικός σαρωτής όπως ακριβώς και οι εμπορικοί δορυφόροι.

Οι βασικές παραδοχές της αρχικής μεθόδου, που είχε εφαρμογή σε δορυφορικές εικόνες αλλά ισχύουν και σε αεροφωτογραφίες, είναι οι εξής:

1. *Η περιοχή είναι γενικά συνεχής και απότομες αλλαγές κλίσης είναι σπάνια φαινόμενα*: Ισχύει γενικά και στις αεροφωτογραφίες ανάλογα με την κλίμακά τους. Απότομες αλλαγή κλίσης ίσως οδηγήσουν σε αποτυχία σύγκλισης και θέσουν σε κίνδυνο την συνέχεια των σημείων
2. *Υπάρχουν περιοχές όπου δεν είναι δυνατή η εξαγωγή πληροφορίας επειδή καλύπτονται από σύννεφα ή έχουν ομοιόμορφους τόνους και η στερεοσκοπική παρατήρηση (και κατά επέκταση υψομετρική μέτρηση) δεν είναι δυνατή όπως λίμνες, θάλασσα, κλπ.*: Η παραδοχή αυτή ισχύει ως προς το δεύτερο σκέλος και στις αεροφωτογραφίες, ενώ το πρώτο κομμάτι που αφορά σύννεφα συναντάται μόνο σε αεροφωτογραφίες μικρής κλίμακας.
3. *Τα χαρακτηριστικά που εικονίζονται είναι εν γένει μικρά στην εικόνα και τα μεγάλα χαρακτηριστικά είναι σπάνια, γεγονός που σημαίνει ότι σε μικρά παράθυρα υπάρχει αρκετή πληροφορία*: Αυτό δεν ισχύει γενικά στην περίπτωση των α/φ, αλλά ο αλγόριθμος δυναμικού μεγέθους βοηθάει για την υπέρβαση του εν λόγω προβλήματος.
4. *Οι γεωμετρικές διαφορές μεταξύ των εικόνων είναι σημαντικές λόγω μεγάλης γωνίας λήψης*: Μεγάλες γωνίες λήψης δεν υπάρχουν στις α/φ, αλλά οι κλίσεις λόγω αναγλύφου είναι εντονότερες, οπότε σχεδόν εξισώνονται.
5. *Οι παραλλάξεις στις δορυφορικές λήψεις είναι εν γένει μικρές*: Η συγκεκριμένη υπόθεση δεν ισχύει γενικά σε όλες τις αεροφωτογραφίες. Στην περίπτωση μεγάλης υψομετρικής διαφοράς και μεγάλης μεταβολής της παράλλαξης x, ο αλγόριθμος πιθανόν θα αποτύχει να συνεχίσει με γειτονικά κατά την διεύθυνση x ομόλογα σημεία. Το ίδιο όμως ενδεχομένως δεν ισχύει κατά την διεύθυνση y. Έτσι

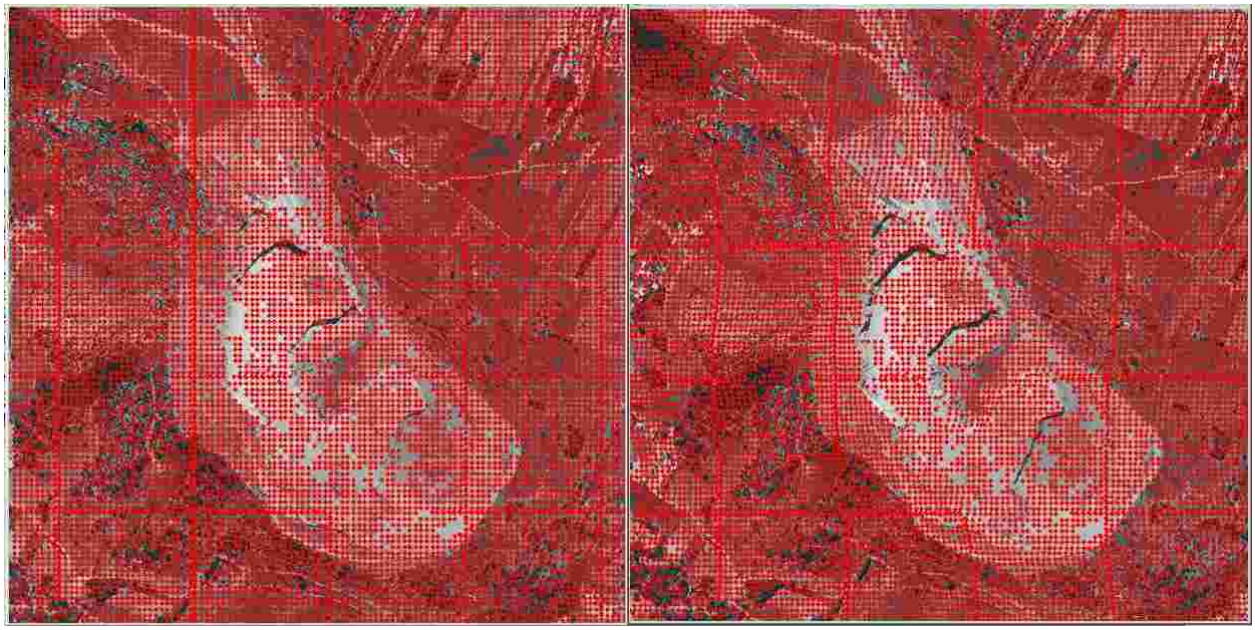
είναι πιθανόν από γειτονικά ομόλογα σημεία κατά την διεύθυνση y να εξασφαλισθεί η απαραίτητη συνέχεια της επιφάνειας και να καλυφθεί πλήρως η περιοχή ενδιαφέροντος (περίπτωση λατομείου, εικ. 3.13).

6. *Ακριβή στοιχεία για τον προσανατολισμό της κάμερας δεν υπάρχουν*: Στις α/φ υπάρχουν, αλλά δεν μας ενοχλεί η συγκεκριμένη παραδοχή και μάλιστα λειτουργεί υπέρ της γενικότητας της μεθόδου
7. *Επιπολική γεωμετρία δεν μπορεί να εφαρμοστεί λόγω του γραμμικού αισθητήρα που έχει ο SPOT, και μόνο επαναληπτικές διαδικασίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν*: Σκοπός ήταν η δημιουργία ενός αλγορίθμου που να μην βασίζεται στην επιπολική γεωμετρία γιατί αυτή δεν εξασφαλίζεται σε όλες τις περιπτώσεις (κάμερα με διαστροφή – δορυφόροι) και ως εκ τούτου πληρεί καλύτερα τα κριτήρια της συγκεκριμένης εργασίας.



Εικόνα 3.12. Κάλυψη στρατηγικής συνταύτισης και πλεονεκτήματα μεθόδου. Αναγνωρίζονται περιοχές α) που έχουν ομοιόμορφους τόνους και έχουν μείνει κενές (δασικές εκτάσεις και λατομείο) β) που εξαιρούνται επειδή δεν εμφανίζονται στην δεξιά εικόνα (εικονοσήματα και διαβαθμισμένες περιοχές).

Η μέθοδος επιτυγχάνει πλήρη κάλυψη των στερεομοντέλων (εικ. 3.12, 3.13), ενώ ταυτόχρονα αποφεύγει "ύποπτες" περιοχές (με μεγάλη μάλιστα ασφάλεια), με αποτέλεσμα ο χρήστης να γνωρίζει τις περιοχές με προβλήματα και να επεμβαίνει με χειρωνακτική συλλογή σημείων. Επίσης οι αρχικές χειρωνακτικές τιμές δίνουν πληροφορία για την κάλυψη και την στροφή ανάμεσα στις δύο εικόνες, παρέχοντας αρχική πληροφορία και για την στροφή κ μεταξύ των εικόνων και κατά συνέπεια για τις αρχικές τιμές του αφινικού.



Εικόνα 3.13. Συμπεριφόρα απλής στρατιγικής συνταύτισης στην περιοχή λατομείου με απότομες μεταβολές της παράλλαξης x, και η πλήρης κάλυψη χωρίς απώλεια συνέχειας.

Για τα σημεία κατά την διεύθυνση x αποδίδεται χαμηλότερη τιμή ως πιθανό ομόλογο σημείο, ενώ τα πιθανά κατά y τοποθετούνται μπροστά στη λίστα αναμονής. Κατά συνέπεια δίδεται σαφής προτίμηση στην διεύθυνση y, αφού δεν υπάρχουν μεγάλες διαφορές σε αυτή, ενώ η πιθανή απόκλιση κατά x μπορεί να είναι πολύ μεγάλη, δεν είναι σταθερή και εξαρτάται από το άγνωστο ανάγλυφο.

3.3. Μεθοδολογίες ελέγχου ΨΜΕ

Είναι κοινώς αποδεκτό ότι σε πληθώρα περιπτώσεων απαιτείται ο έλεγχος και η αποτίμηση της ποιότητας ΨΜΕ. Τέτοιες περιπτώσεις είναι ο έλεγχος νέων μεθόδων συλλογής ΨΜΕ, ο εσωτερικός έλεγχος από τους μελετητές, ο έλεγχος παραλαβής από δημόσιους οργανισμούς και χρήστες. Ιδανική περίπτωση είναι η ύπαρξη ΨΜΕ αναφοράς ή η ύπαρξη ενός ικανού αριθμού σημείων ελέγχου (Fox et al., 2001, Baltsavias et al., 1998). Αυτό είναι ανέφικτο στην πλειονότητα των περιπτώσεων.

Πράγματι, οι πιο διαδεδομένες διαδικασίες που χρησιμοποιούνται στην περίπτωση ελέγχου νέων μεθόδων συνταύτισης είναι τα ΨΜΕ αναφοράς ή περιορισμένος αριθμός σημείων ελέγχου ή ακόμα πιο απλά ένας οπτικός στερεοσκοπικός έλεγχος. Τα δεδομένα αναφοράς είναι δυσεύρετα και δεν μπορούν να αφορούν πολλά στερεοσκοπικά μοντέλα, περιορίζοντας έτσι τον έλεγχο. Στην δεύτερη περίπτωση, εξαιτίας του κόστους συλλογής σημείων ελέγχου που στις περισσότερες περιπτώσεις είναι σημεία GPS, ο έλεγχος είναι ελλιπής ή και ανύπαρκτος. Η τελευταία μέθοδος ελέγχου είναι η πλέον διαδεδομένη, αλλά είναι φυσικά η πλέον χρονοβόρα.

Οι περισσότεροι εμπορικοί αλγόριθμοι έχουν κάποια εσωτερικά μέτρα αξιολόγησης σημείων, που έχουν συλλεγεί αυτόματα, σε κατηγορίες, οι οποίες όμως σε σημαντικό ποσοστό δεν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα (Fox et al., 2001, Baltsavias et al., 1998), άρα δεν μπορεί ο χρήστης να βασιστεί σε αυτούς για έλεγχο και διόρθωση των προτεινόμενων περιοχών. Οι Otto & Chau (1989) αναφέρουν μερικά συνολικά μέτρα εσωτερικής αξιολόγησης των αλγορίθμων συνταύτισης, χωρίς όμως να μπορούν να εστιάσουν στις προβληματικές περιοχές ή να ποσοτικοποιήσουν τις υψομετρικές διαφορές. Τελικά ο μοναδικός ρεαλιστικός τρόπος αξιολόγησης ενός ΨΜΕ θεωρείται ότι είναι με χρήση σημείων ελέγχου (Fox et al., 2001).

Στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν πολλές αναφορές σε μεθόδους ελέγχου και αξιολόγησης αλγορίθμων συνταύτισης με δεδομένα αναφοράς. Η ευρύτερη ίσως αξιολόγηση βρίσκεται στον Guelch (1988) με έμφαση στις τοπογραφικές εφαρμογές και στους Scharstein & Szeliski (2001) με έμφαση στις επίγειες λήψεις. Από τις μεθοδολογίες ελέγχου χωρίς δεδομένα αναφοράς ξεχωρίζει εκείνη του Norvelle (1992, 1994, 1996), η οποία θα συζητηθεί στην συνέχεια.

3.3.1. Χρήση ΨΜΕ αναφοράς

Μια εργασία σύγκρισης των αλγορίθμων κυκλώπειας γεωμετρίας (Pollard et al., 1980, Barnard & Thompson 1985) με την ελαχιστοτετραγωνική συνταύτιση έντασης (Guen, 1985) είναι αυτή των Day and Muller (1988). Η μέθοδος των Barnard & Thompson χρησιμοποιείται παρέχοντας αρχικές τιμές στην ελαχιστοτετραγωνική συνταύτιση, αφού ο αλγόριθμος από μόνος του δεν μπορεί να πετύχει ακρίβεια καλύτερη από ένα εικονοστοιχείο. Η εφαρμογή γίνεται σε εικόνες SPOT, ενώ το ΨΜΕ αναφοράς έχει συλλεχθεί χειρωνακτικά από αεροφωτογραφίες 1:30000 της ίδιας περιοχής με βήμα 30m. Ο αεροτριγωνισμός έχει γίνει με ανεξάρτητα φωτοσταθερά και η τυπική απόκλιση της μίας μέτρησης εκτιμήθηκε μετά από επανειλημμένες μετρήσεις σε μεμονωμένα σημεία σε ±1.837m. Τα δύο μέτρα που χρησιμοποιεί είναι η αξιοπιστία, δηλαδή το ποσοστό των σημείων με σφάλμα μεγαλύτερο από 3σ, και η πυκνότητα συνταύτισης, δηλαδή το ποσοστό επιτυχών συσχετίσεων αναλογικά με τις αναμενόμενες. Η εκτίμηση της ακρίβειας γίνεται με τρεις τρόπους:

1. **Προβολή των σημείων αναφοράς στις εικόνες**. Στη συνέχεια γίνεται έλεγχος ομόλογων σημείων του αυτόματου αλγορίθμου που βρίσκονται σε απόσταση μέχρι N εικονοστοιχεία από το ομόλογο αναφοράς, και δεν έχουν διαφορά παράλλαξης από το αναφοράς μεγαλύτερη από M εικονοστοιχεία. Η σύγκριση αυτή είναι γρήγορη και απλή. Χρησιμοποιούνται δύο κριτήρια N και M για την σύγκριση, που δεν καθορίζονται από τους συγγραφείς αλλά μπορούν να εκτιμηθούν από την κλίμακα των αεροφωτογραφιών.
2. **Σύγκριση των υπολογισθέντων σημείων με τα σημεία αναφοράς**. Σε αυτή την περίπτωση υπολογίζονται οι γεωδαιτικές συντεταγμένες των ομόλογων σημείων (επίλυση εμπροσθοτομίας) και συγκρίνονται με το υψόμετρο του πλησιέστερου σημείου από το ΨΜΕ αναφοράς, η απόσταση του οποίου όμως δεν ξεπερνά ένα κατώφλι. Όσο μικραίνει αυτό το κατώφλι τόσο λιγότερα σημεία συγκρίνονται, ενώ όσο μεγαλώνει αυξάνει ο κίνδυνος να διαφοροποιείται αισθητά το υψόμετρο και ουσιαστικά η σύγκριση να χάνει την σημασία της. Η ανάγκη χρήσης κατωφλίου επηρεάζει τα αποτελέσματα και μόνο πολύ μικρά κατώφλια, πάντα σε σχέση με την κλίμακα των εικόνων, μπορούν να γίνουν αποδεκτά.
3. **Γραμμική παρεμβολή στα σημεία του αυτόματου ΨΜΕ στις θέσεις των σημείων του ΨΜΕ αναφοράς**. Αυτή η σύγκρισή μοιάζει να είναι η καλύτερη, αλλά υπεισέρχεται και το σφάλμα της γραμμικής παρεμβολής που επιδεινώνει έμμεσα τα αποτελέσματα του αυτόματου ΨΜΕ.

Οι συγγραφείς (Day and Muller) εκφράζουν τον προβληματισμό τους σχετικά με το γεγονός ότι ουσιαστικά ελέγχονται μόνο όσα σημεία επιλέξει να επιστρέψει ο αλγόριθμος συνταύτισης. Έτσι είναι δυνατόν θέτοντας πολύ αυστηρά κριτήρια να περάσουν το εσωτερικό στάδιο ελέγχου μόνο τα πολύ αξιόπιστα σημεία. Αυτό βέβαια έχει αντίκτυπο στο πλήθος των σημείων και την επάρκειά τους για περιγραφή της επιφάνειας. Η μέθοδος της κυκλώπειας γεωμετρίας είναι δυνατόν να επιστρέψει μόλις 100 σημεία σε όλο το στερεομοντέλο, αλλά με μεγάλη βεβαιότητα. Τα σημεία αυτά θα μπορούσαν κάλλιστα να χρησιμοποιηθούν για σχετικό προσανατολισμό, αλλά σε καμία περίπτωση δεν επαρκούν για ΨΜΕ. Ακόμα και εάν ο αλγόριθμος ρυθμιστεί έτσι ώστε να επιστρέψει περισσότερα σημεία, δεν είναι βέβαιο ότι η κάλυψη του μοντέλου θα είναι ομοιόμορφη. Η σύγκριση ενός ΨΜΕ που θα έχει δημιουργηθεί από τέτοια σημεία δεν μπορεί να συγκριθεί απευθείας με το ΨΜΕ αναφοράς, αφού σε ορισμένες περιοχές με αραιή κάλυψη σημείων οι αποκλίσεις θα είναι μεγάλες. Ουσιαστικά οι συγγραφείς θέτουν το ζήτημα ότι η απόδοση ενός αλγορίθμου συνταύτισης εξαρτάται άμεσα με την χρήση του προϊόντος της συνταύτισης.

Οι Scharstein et al. (2002) χρησιμοποιούν δύο μέτρα για τον έλεγχο, πάντα με χρήση ΨΜΕ αναφοράς. Το πρώτο είναι το μέσο τετραγωνικό σφάλμα των διαφορών της παράλλαξης x και το δεύτερο το ποσοστό των λανθασμένων συσχετίσεων με όριο το ένα εικονοστοιχείο παράλλαξης x. Η σύγκριση αυτή πραγματοποιείται σε τρεις κατηγορίες περιοχών. Σε περιοχές χωρίς υφή, σε 'αόρατες' περιοχές και σε περιοχές κοντά σε ακμές με απότομη αλλαγή παράλλαξης x. Οι περιοχές με το βασικό πρόβλημα είναι οι τελευταίες.

Στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν πολλές ακόμα εργασίες που χρησιμοποιούν ΨΜΕ αναφοράς, όπως των Ley (1988), Kaeser et al. (1998) όπου κατηγοριοποιούνται οι αποκλίσεις των σημείων, Fox et al. (2001), όπου χρησιμοποιείται μοντέλο από αναλυτικό όργανο για έλεγχο κ.λπ.

Η Kostkova (2002) προσεγγίζοντας περισσότερο θεωρητικά το πρόβλημα της σύγκρισης προτείνει διάφορα μέτρα αξιολόγησης ενός ΨΜΕ, όπως:

- ποσοστό λανθασμένων συσχετίσεων
- ομόλογα σημεία σε "αόρατες" περιοχές (false positives)
- περιοχές χωρίς σημεία ενώ φαίνονται στερεοσκοπικά (false negatives)
- λάθος σημεία σε περιοχές (mismatches):
  - χωρίς πληροφορία
  - "αόρατες" περιοχές (περιοχές που απεικονίζονται μόνο στην μία εικόνα λόγω έντονου αναγλύφου)
  - ακμές με έντονη αλλαγή βάθους

Το πρόβλημα σε αυτές τις περιπτώσεις είναι ότι εκτός από το απαραίτητο ΨΜΕ αναφοράς πρέπει να σημειώνονται αυστηρά οι παραπάνω περιοχές. Η συγγραφέας αναφέρει μια σειρά δείκτες που πράγματι οδηγούν σε αναλυτικό έλεγχο του υπό εξέταση ΨΜΕ. Παρ΄ όλα αυτά τα προτεινόμενα μέτρα δεν υιοθετήθηκαν σε ανάλογες έρευνες της διεθνούς κοινότητας, πιθανότατα επειδή ο έλεγχος είναι διεξοδικός και χρονοβόρος και καταλήγει με πολλά στοιχεία που κάνουν την σύγκριση και εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων δύσκολη.

3.3.2. Με χρήση σημείων ελέγχου

Η μέθοδος χρήσης ενός περιορισμένου αριθμού σημείων ελέγχου εφαρμόστηκε την πρώτη περίοδο εφαρμογής της συνταύτισης γκρίζων τόνων και σκοπός της ήταν να πείσει για την ακρίβειά της την φωτογραμμετρική κοινότητα που μέχρι τότε χρησιμοποιούσε χειριστές.

Ο Fox et al. (2001) χρησιμοποιούν ένα μεγάλο πλήθος από σημεία ελέγχου που έχουν συλλεχθεί γεωδαιτικά και προέρχονται από αναλυτικό όργανο. Οι αεροφωτογραφίες που χρησιμοποιούν είναι κλίμακας 1:30000 και τα υπόλοιπα των σημείων ελέγχου από το υπό έλεγχο ΨΜΕ ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες <±5, μεταξύ ±5 και ±15 και >±15 m. Τα κατώφλια αυτά εξαρτώνται φυσικά από την κλίμακα των αεροφωτογραφιών και την ακρίβεια του αεροτριγωνισμού. Στην συνέχεια αυτές οι ομάδες κωδικοποιούνται χρωματικά και γίνεται επίθεσή τους σε μία ορθοφωτογραφία προκειμένου να ελεγχθεί η συσχέτισή τους με το είδος εδάφους. Χρησιμοποιώντας μέγεθος παραθύρου 9x9 καταλήγει σε ποσοστά 57.8%, 24.0% και 18.2% για τις άνω κατηγορίες σφαλμάτων. Σημαντικό είναι ότι το μέσο τετραγωνικό σφάλμα είναι πολύ μεγάλο (±26.5 m) και το μέγιστο σφάλμα 186.2 m. Τα μεγάλα αυτά μεγέθη δικαιολογούνται από το γεγονός ότι η μελέτη αφορά αεροφωτογραφίες παγετώνων. Οι συγγραφείς δοκίμασαν πολλές διαφορετικές παραμέτρους πριν καταλήξουν σε αυτά τα αποτελέσματα. Σημειώνουν δε ότι από παρόμοιες μελέτες με το συγκεκριμένο πρόγραμμα παρατήρησαν ότι οι παράμετροι δεν διαφοροποιούν σημαντικά το αποτέλεσμα σε περιπτώσεις που η συνταύτιση δουλεύει καλά. Αντίθετα παίζουν ρόλο όσο η περίπτωση γίνεται πιο δύσκολη. Μοναδική εξαίρεση το μέγεθος του παραθύρου το οποίο όσο μειώνεται βελτιώνει πολύ τα αποτελέσματα σε απόκρημνες περιοχές. Αυξάνοντας το μέγεθος του παραθύρου σε 12x12 παρατήρησαν μικρή βελτίωση, ενώ με μέγεθος 20x20 τα αποτελέσματα παρουσίασαν σημαντική κάμψη.

Άξιο παρατήρησης είναι το γεγονός ότι μόνο 57.8% των σημείων ήταν "καλά". Επίσης η επίθεση των έγχρωμων σημείων στην ορθοφωτογραφία μπορεί να αποδίδει την ποιότητα της συνταύτισης ανάλογα με το έδαφος, αλλά δεν μπορεί να δικαιολογήσει το μέγεθος των αποχών που μπορεί να φτάσουν ακόμα και 186.2 m.

Οι πρόσφατες προδιαγραφές της Κτηματολόγιο Α.Ε. για τα δύο μεγάλα έργα παραγωγής ορθοφωτογραφιών στο σύνολο της επικράτειας φαίνονται στον πίνακα 1.1. Σε αυτές "δεν προσδιορίζεται, παρά μόνον εμμέσως ίσως, η κλίμακα αεροφωτογράφησης" (Απαντητικό έντυπο σχολιασμού της Ελληνικής Εταιρείας Φωτογραμμετρίας και Τηλεπισκόπισης, 9-6-2005). Η απαγκίστρωση των προδιαγραφών από την κλίμακα αεροφωτογράφησης, αν και απολύτως θεμιττή σύμφωνα με τις τεχνολογικές εξελίξεις των σύγχρονων φωτομηχανών, αφήνει μεγάλα περιθώρια και δημιουργεί δυσαρμονία μεταξύ πρωτογενών δεδομένων και παραδοτέων, γεγονός που επισημαίνεται και στο απαντητικό έντυπο της ΕΕΦΤ με την πρότασή της "... να καθοριστεί ελάχιστη κλίμακα αεροφωτογράφησης και να μειωθεί το επιτρεπόμενο μέγεθος του πρωτογενούς εικονοστοιχείου σε πχ. 0.15m τουλάχιστον" αλλά και την φράση "... ότι οι σύγχρονες δυνατότητες της φωτογραμμετρικής μεθοδολογίας επιτρέπουν την επίτευξη υψομετρικών ακριβειών σε αναλογία 1.6 - 2.0 φορές των αντίστοιχων οριζοντιογραφικών. Προτείνεται η αντίστοιχη προσαρμογή της τιμής RMSEz σε 0.40m (το πολύ) για το DSM των VLSO."

	VLSO [m]	**LSO [m]**
Μέγεθος εικονοστοιχείου στο έδαφος πρωτογενών προϊόντων φωτοληψιών τα οποία έχουν προκύψει είτε από σάρωση αναλογικών προϊόντων (φιλμ/διαθετικά) είτε απευθείας από ψηφιακούς δέκτες	<=0.20	<=0.50
Μέγεθος εικονοστοιχείου στο έδαφος (GSD)	0.20	0.50
Διάσταση κανάβου	0.80	5.00
$RMSE_z$ όπως αυτό προκύπτει από τη σύγκριση σημείων με γνωστά υψόμετρα με αυτά τα οποία προκύπτουν από το DEM για τα ίδια σημεία.	<=0.60	<=2.00
Υψομετρική Ακρίβεια	<=1.18 , για επίπεδο εμπιστ. 95%	<=3.92 , για επίπεδο εμπιστ. 95%

Πίνακας 3.1. Απόσπασμα προδιαγραφών της Κτηματολόγιο Α.Ε (έτους 2005) για την παραγωγή ορθοφωτοχαρτών.

3.3.3. Άλλοι τρόποι ελέγχου

Οι Fox et al. (2001)ι βασισμένοι στην παρατήρηση ότι τα σωστά συσχετισμένα ομόλογα σημεία δεν είναι ευαίσθητα στις αλλαγές των παραμέτρων, προτείνουν μια μεθοδολογία εντοπισμού περιοχών για έλεγχο και διόρθωση. Σύμφωνα με αυτή δημιουργούν αυτόματα δύο ΨΜΕ με διαφορετικές παραμέτρους και τα συγκρίνουν. Τις διαφορές τις κατατάσσουν σε τρεις κατηγορίες:

1. Περιοχές με περίπου μηδενικές διαφορές που αντιστοιχούν σε καλά συσχετισμένα σημεία
2. Περιοχές με μεγάλες διαφορές που χρήζουν ελέγχου και διόρθωσης
3. Περιοχές με έντονη κλίση όπου το λογισμικό έχει βρει τα υψόμετρα με γραμμική παρεμβολή. Τα σημεία αυτά πρέπει να αντιμετωπίζονται το λιγότερο ως ύποπτα

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της προτεινόμενης μεθόδου με τα αποτελέσματα από τα σημεία ελέγχου, καταλήγουν ότι το 93% των σημείων ταξινομούνται σωστά ως επιτυχή ή ανεπιτυχή. Παρόλα αυτά ένα 25% των σημείων που θεωρούνται ανεπιτυχή από τα σημεία ελέγχου ταξινομούνται από την μέθοδο ως σωστά, επιτρέποντάς τους να συμμετέχουν στην δημιουργία ΨΜΕ. Η τάση σήμερα είναι οι αλγόριθμοι να έχουν όσο γίνεται λιγότερες παραμέτρους και να είναι αυτόματοι στις περισσότερες. Κατά συνέπεια η μέθοδος αυτή απευθύνεται κυρίως σε εμπορικά πακέτα που πράγματι έχουν πολλές παραμέτρους και ο χρήστης μπορεί να αλλάξει μερικές από αυτές χωρίς να αλλάξει την γενική ιδέα.

Ένας ενδιαφέρον τρόπος ελέγχου της ελαχιστοτετραγωνικής συνταύτισης και έμμεσα του ΨΜΕ αναφέρεται από τους Hannah (1988) και Guelch (1988). Μόλις βρεθεί το ομόλογο σημείο της αριστερής εικόνας στην δεξιά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί το σημείο της δεξιάς ως πρότυπο για να γίνει αναζήτηση του ομόλογού του στην αριστερή. Με αυτό τον τρόπο αντιστρέφονται οι ρόλοι των εικόνων. Απόκλιση του τελικού από το αρχικό σημείο επί της εικόνας πρότυπο σημαίνει ότι η συνταύτιση είναι λάθος και το σημείο απορρίπτεται. Από δοκιμές που έγιναν με αυτή τη διαδικασία παρατηρήθηκε ότι το κατώφλι απόκλισης από το αρχικό σημείο για την αποδοχή ή όχι ενός σημείου ως σωστό είναι ιδιαίτερα σημαντικό.

3.4. Προτεινόμενη μεθοδολογία ελέγχου ΨΜΕ χωρίς δεδομένα αναφοράς

Η μεθοδολογία που προτείνεται για τον έλεγχο και την βελτίωση ΨΜΕ βασίστηκε στην μέθοδο του Norvelle που πρωτοπαρουσιάστηκε το 1992 ως αλγόριθμος αυτόματων ΨΜΕ. Παρακάτω θα παρουσιαστεί αναλυτικά η μέθοδος Norvelle, που αποτελεί την βάση για την προτεινόμενη μεθοδολογία και εν συνεχεία η νέα μέθοδος.

3.4.1. Η μέθοδος Norvelle

Η μέθοδος αυτή παρουσιάστηκε από τον Norvelle το 1992 (Norvelle 1992, 1994, 1996) ως αλγόριθμος δημιουργίας αυτόματου ΨΜΕ. Ξεκινώντας από ένα ΨΜΕ δημιουργημένο από εικόνες μειωμένης ανάλυσης, χρησιμοποιεί την μέθοδο "βελτίωσης μέσω επαναληπτικών ορθοφωτογραφιών" (Iterative Orthophoto refinments) για να καταλήξει σε ένα ΨΜΕ υψηλής ποιότητας. Η διαδικασία περιγράφεται σε βήματα ως εξής:

1. Ελάττωση της ανάλυσης των αρχικών εικόνων τέσσερις φορές
2. Δημιουργία ενός προσεγγιστικού ΨΜΕ με χρήση συντελεστή συνταύτισης
3. Δημιουργία ορθοφωτογραφιών από τις εικόνες πλήρους ανάλυσης
4. Συνταύτιση έντασης επί των ορθοφωτογραφιών με χρήση συντελεστή συσχέτισης
5. Ενημέρωση του ΨΜΕ με τις διορθώσεις που υπολογίζονται από το προηγούμενο βήμα
6. Επιστροφή στο βήμα 3.

Αδιευκρίνιστα στην πρώτη εργασία ήταν η σχέση μεγέθους των εικονοστοιχείων των ορθοφωτογραφιών σε σχέση με τις αεροφωτογραφίες, η σχέση που μετατρέπει την διαφορά θέσης επί των ορθοφωτογραφιών σε υψομετρική διόρθωση και τα κριτήρια για την έξοδο από την επαναληπτική διαδικασία, αν και από το κείμενο διαφαίνεται ότι για τα αποτελέσματα δεν χρειάστηκε παρά μία εφαρμογή χωρίς καμμία επανάληψη

Στα αποτελέσματα της μεθόδου με μία επανάληψη ο αλγόριθμος φαίνεται ικανός να περιγράψει την κορυφή δέντρων σε δάσος από αεροφωτογραφίες κλίμακας 1:40000 και ανάλυσης 50μm. Ο συγγραφέας υποστηρίζει ότι τα αποτελέσματα ήταν πολύ καλά και η μέθοδος καταφέρνει να βελτιώσει σημαντικά το αρχικό αραιό ΨΜΕ. Αναφέρει επίσης ότι στον στερεοσκοπικό έλεγχο που πραγματοποιήθηκε δεν υπήρχαν χονδροειδή σφάλματα με εξαίρεση ορισμένα σημεία σε "αόρατες" περιοχές. Είναι φανερό ότι ο αλγόριθμος δεν μπορεί να διορθώσει περιοχές που στις εικόνες έχουν ομοιογενή ένταση, όπως λίμνες. Σε αυτές τις περιπτώσεις βέβαια η συνταύτιση γκρίζων τόνων αποτυγχάνει, η συνταύτιση χαρακτηριστικών δεν μπορεί να λειτουργήσει, ενώ και οι χειριστές δεν μπορούν να προσδιορίσουν με ακρίβεια. Το καλύτερο που μπορεί κανείς να περιμένει από ένα αλγόριθμο συνταύτισης είναι να δώσει περιμετρικά σημεία και να αφήσει την περιοχή εντός της λίμνης χωρίς ομόλογα σημεία. Ειδικά στις περιπτώσεις που πρόκειται για λίμνες ή θάλασσα δεν δημιουργείται κανένα πρόβλημα, γιατί τα σημεία στις όχθες είναι αρκετά για να αποδώσουν ένα ακριβές ΨΜΕ.

Η επιτυχία της μεθόδου αποδίδεται σε τρεις παράγοντες:

- στην απαλοιφή των μεγάλων γεωμετρικών διαφορών μεταξύ των ορθοφωτογραφιών με αποτέλεσμα ο αφινικός μετασχηματισμός να λειτουργεί καλύτερα
- στις καλύτερες αρχικές τιμές της συνταύτισης
- στην δυνατότητα εφαρμογής του συντελεστή συσχέτισης με μικρότερα παράθυρα (από 15x15 σε 9x9) και περιορισμό της περιοχής ελέγχου.

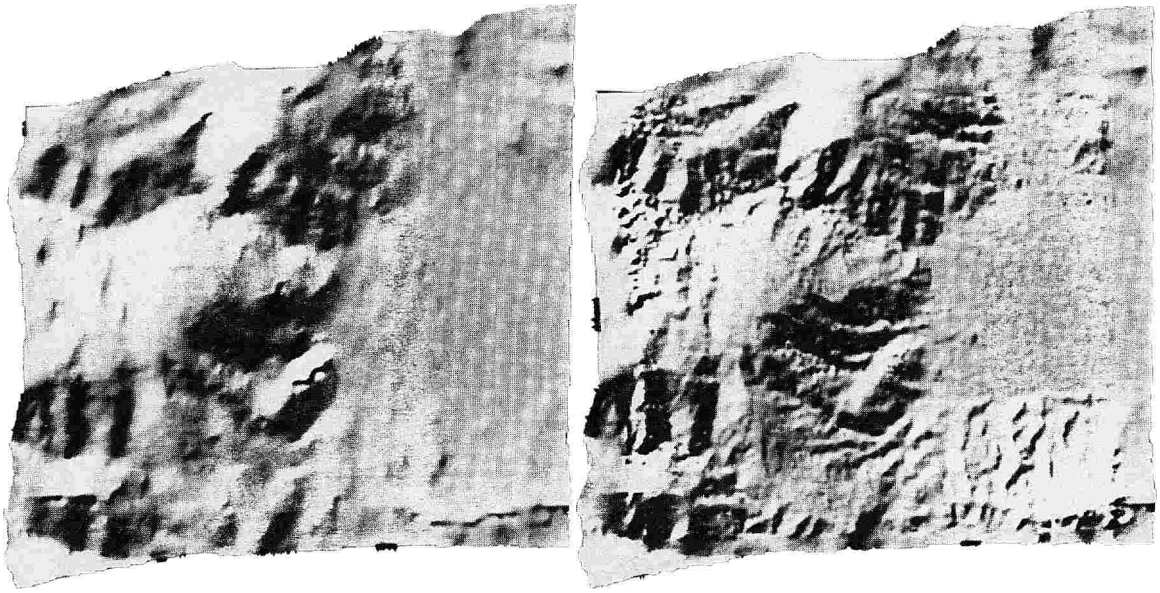
Με αυτό τον τρόπο βελτιώνεται η ταχύτητα ενώ είναι καλύτερη η ακρίβεια συνταύτισης οδηγώντας σε πιο λεπτομερή ΨΜΕ. Σύμφωνα με τον συγγραφέα, η μέθοδος είναι πολύ αποτελεσματική, ακριβής και γρήγορη για δημιουργία ή διόρθωση ΨΜΕ. Η βελτίωση της ταχύτητας οφείλεται στην χρήση μικρότερων παραθύρων στις επαναλήψεις καθώς και στο ότι οι αρχικές τιμές είναι πολύ κοντά στις αληθείς οπότε δεν χρειάζονται πολλές επαναλήψεις.

Κατόπιν ο Norvelle, συνεχίζοντας της ερευνά του, παρουσίασε το 1994 και εν συνεχεία το 1996 μια ωριμότερη εκδοχή της μεθοδολογίας του, εστιασμένη στην βελτίωση ΨΜΕ και όχι στην δημιουργία τους. Σε αυτήν τονίζει ότι εφόσον το ΨΜΕ αντιπροσωπεύει την πραγματική επιφάνεια την στιγμή της λήψης, τότε δύο ορθοφωτογραφίες που παράγονται από αυτές τις αεροφωτογραφίες πρέπει να είναι πανομοιότυπες, εάν κανείς εξαιρέσει τον θόρυβο και ραδιομετρικές διαφορές λόγω διαφορετικής γωνίας ανάκλασης του φωτός. Τυχόν γεωμετρικές διαφορές στις ορθοφωτογραφίες αντιστοιχούν σε ανωμαλίες στο ΨΜΕ και ως εκ τούτου μπορούν να μετατραπούν σε διορθώσεις του ΨΜΕ. Ο Norvelle, προκειμένου να μετατρέψει σε διορθώσεις τις διαφορές ανάμεσα στις ορθοφωτογραφιές, χρησιμοποιεί την προσεγγιστική σχέση:

$$dh = dx \frac{H}{B} \tag{3.13}$$

όπου	dh	η διόρθωση του υψομέτρου
	dx	η απόσταση ανάμεσα στα δύο ομόλογα σημεία επί των δυο ορθοφωτογραφιών σε μονάδες εδάφους
	B	η βάση του ζεύγους
	H	το ύψος πτήσης

Παρόλο που η σχέση (1.14) είναι προσεγγιστική, τα αποτελέσματα ήταν πολύ καλά (σχ. 3.7). Μετά το 1996, όπου ουσιαστικά επανέλαβε την εργασία του 1994, δεν παρουσιάστηκε κάποια άλλη μελέτη επί του θέματος και κανείς άλλος ερευνητής δεν συνέχισε την εργασία του Norvelle.



Σχήμα 3.7. Βελτίωση ενός προσεγγιστικού ΨΜΕ με την μέθοδο που προτείνεται από τον συγγραφέα (Norvelle, 1994).

Η μέθοδος βασίζεται σε μια πρωτότυπη ιδέα και φαίνεται ότι μπορεί να λειτουργήσει με καλά αποτελέσματα. Μοναδικό μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι υποθέτει ότι όλες οι ατέλειες μεταξύ των ορθοφωτογραφιών οφείλονται σε ατέλειες του ΨΜΕ, κάτι που βέβαια δεν ισχύει αυστηρά αλλά μπορεί να υποστηριχθεί ότι ισχύει με ικανοποιητική προσέγγιση. Βασικά πλεονέκτηματα της μεθόδου είναι:

1. δεν χρειάζεται δεδομένα αναφοράς
2. η κάλυψη του ΨΜΕ είναι πλήρης με πάρα πολλές μετρήσεις και όχι με περιορισμένο αριθμό σημείων
3. μπορεί να έχει πολλές εφαρμογές, όπως ο έλεγχος ΨΜΕ, η βελτίωση ΨΜΕ και η ενημέρωση παλαιών ΨΜΕ από νέες αεροφωτογραφίες.

Τα στοιχεία αυτά την καθιστούν ελκυστική για περαιτέρω διερεύνηση.

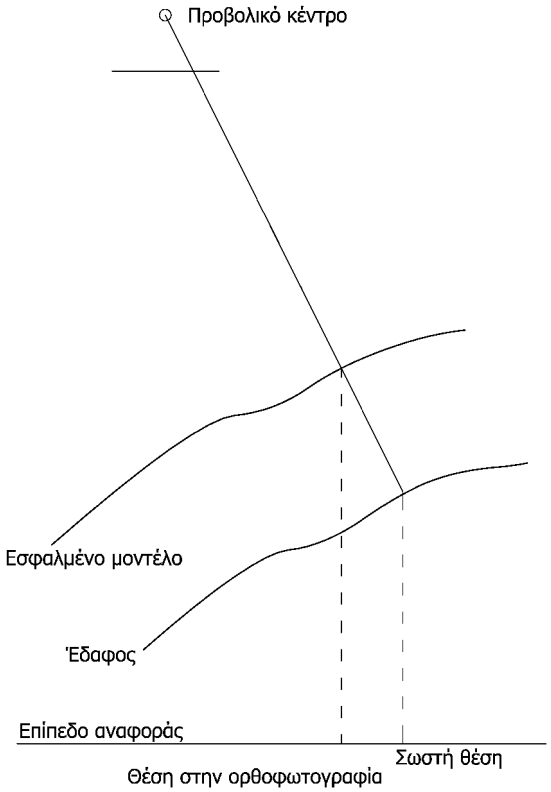
3.4.2. Προτεινόμενη τροποποίηση μεθόδου Norvelle για έλεγχο ΨΜΕ

Το ζητούμενο είναι ο υπολογισμός του μεγέθους και της θέσης της υψομετρικής διόρθωσης ΨΜΕ από την ασυμφωνία οριζοντιογραφικής θέσης ενός σημείου σε δύο ορθοφωτογραφίες. Ο αλγόριθμος ξεκινά κάνοντας συνταύτιση ανάμεσα στις δύο ορθοφωτογραφίες. Στην περίπτωση που τα ομόλογα σημεία συμπίπτουν ακριβώς στην γεωδαιτική τους θέση δεν υπάρχει κανένα πρόβλημα στο ΨΜΕ. Στην περίπτωση που έχουν διαφορά είναι προφανές ότι ούτε το ένα ούτε το άλλο είναι σωστά απεικονισμένα και κατά συνέπεια δεν χρησιμοποιήθηκε το σωστό υψόμετρο κατά την παραγωγή των ορθοφωτογραφιών. Στην περίπτωση χρήσης λανθασμένου υψομέτρου, η μετατόπιση του σημείου είναι ακτινική ως προς το ναδίρ της κάθε φωτογραφίας. Η λύση του προβλήματος έχει δυο στάδια: τον υπολογισμό του μεγέθους και της θέσης εφαρμογής της διόρθωσης.

3.4.2.1. Υπολογισμός οριζοντιογραφικής θέσης εφαρμογής διόρθωσης

Στην περίπτωση που τα δύο συσχετισθέντα σημεία στις ορθοφωτογραφίες δεν συμπίπτουν στο έδαφος (σε γεωδαιτικές συντεταγμένες), τότε αμφότερα είναι λανθασμένα. Η μοναδική περίπτωση στην οποία δεν ισχύει αυτό είναι όταν ένα από τα δύο σημεία βρίσκεται στο ναδίρ αεροφωτογραφίας. Σε αυτή την περίπτωση το υψόμετρό του σημείου δεν επηρεάζει την θέση εμφάνισής του.

Για τον υπολογισμό της σωστής θέσης του σημείου βασικό στοιχείο είναι ότι, ως γνωστόν, τυχόν υψομετρική διαφορά επιφέρει ακτινική μετάθεση ως προς την οριζοντιογραφική θέση του προβολικού κέντρου της αντίστοιχης αεροφωτογραφίας (Kraus, 1992). Πιο συγκεκριμένα, όταν το υψόμετρο ενός σημείου έχει ληφθεί μεγαλύτερο από το σωστό τότε το σημείο απεικονίζεται στην ορθοφωτογραφία πλησιέστερα στο προβολικό κέντρο και ανάποδα (σχ. 3.8).



Σχήμα 3.8. Ακτινική μετατόπιση ανάλογα με το υψομετρικό σφάλμα.

Σε κάθε περίπτωση όμως η σωστή θέση του σημείου βρίσκεται επί της ευθείας που ενώνει το σημείο με το προβολικό κέντρο της αντίστοιχης αεροφωτογραφίας και αυτό ισχύει και για τα δύο συσχετισθέντα σημεία. Με αυτό τον τρόπο ορίζονται δύο τεμνόμενες ευθείες, η τομή των οποίων είναι η ζητούμενη σωστή θέση του σημείου επί του εδάφους (σχ. 3.9).

Αναλυτικότερα, εάν το ελεγχόμενο σημείο έχει γεωδαιτικές συντεταγμένες $(X,Y)_L$ στην ορθοφωτογραφία από αριστερή αεροφωτογραφία με προβολικό κέντρο το $(X_o,Y_o,Z_o)_L$, τότε το σωστό σημείο στην ο/φ βρίσκεται επί της ευθείας που ορίζεται από τα $(X,Y)_L$ και $(X_o,Y_o)_L$. Ομοίως και για την άλλη ορθοφωτογραφία, καταλήγοντας ότι σωστό σημείο ανήκει στην ευθεία που ορίζεται από τα $(X,Y)_R$ και $(X_o,Y_o)_R$ (σχ. 3.6).

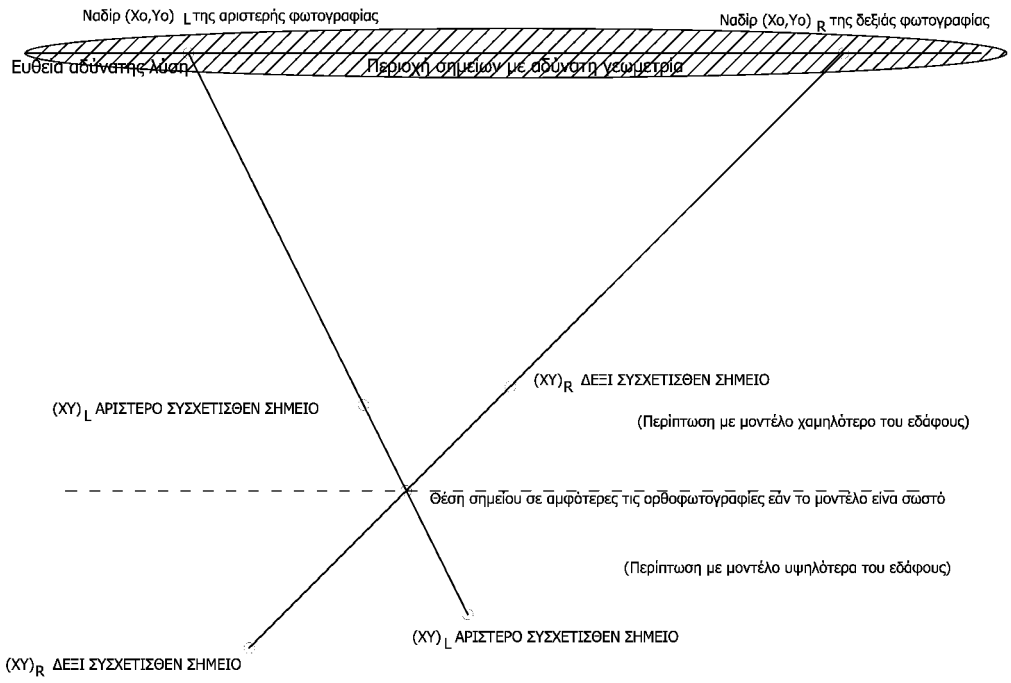
Έτσι οι οριζοντιογραφικές συντεταγμένες του προβολικού κέντρου έκαστης φωτογραφίας με ένα αλλοιωμένο σημείο επί της αντίστοιχής ορθοφωτογραφίας ορίζουν μία ευθεία. Ομοίως ορίζεται μια ευθεία από τα αντίστοιχα σημεία της άλλης αεροφωτογραφίας. Εκφράζοντας αναλυτικά τις σχέσεις για τις δύο ευθείες προκύπτει ότι το σωστό σημείο είναι το:

$$(X,Y)=\left(\frac{\beta}{\alpha},\frac{Y_{OR}-Y_R}{X_{OR}-X_R}\frac{\beta}{\alpha}+Y_R-X_R\frac{Y_{OR}-Y_R}{X_{OR}-X_R}\right) \tag{3.14}$$

όπου, $\alpha=\frac{Y_{OR}-Y_R}{X_{OR}-X_R}-\frac{Y_{OL}-Y_L}{X_{OL}-X_L}$ και

$$\beta=Y_L-X_L\frac{Y_{OL}-Y_L}{X_{OL}-X_L}-Y_R+X_R\frac{Y_{OR}-Y_R}{X_{OR}-X_R}$$

Όπως είναι προφανές υπάρχει αδύνατη περίπτωση για όλα τα σημεία που βρίσκονται επί της ευθείας που ενώνει τα δύο προβολικά κέντρα, ενώ παράλληλα τα σημεία κοντά σε αυτή την ευθεία έχουν ασθενή λύση. Πρόβλημα ασθενούς γεωμετρικής λύσης δημιουργείται για σημεία πολύ κοντά στην ευθεία των προβολικών κέντρων, γιατί τα τρίγωνα που σχηματίζονται είναι αμβλυγώνια. Οι περιοχές αυτές μπορούν να εξαιρεθούν του ελέγχου, ώστε να μην προκύψουν σημεία αμφίβολης αξιοπιστίας.



Σχήμα 3.9. Η οριζοντιογραφία της λύσης με τις θέσεις των συσχετισμένων σημείων και των προβολικών κέντρων.

3.4.2.2. Υπολογισμός μεγέθους διόρθωσης

Ο υπολογισμός του μεγέθους της διόρθωσης είναι καθοριστικός. Η γεωμετρία της λύσης φαίνεται στο σχήμα 3.6, ενώ τα βασικά μεγέθη είναι:

L,R	τα προβολικά κέντρα των φωτογραφιών που χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή των ορθοφωτογραφιών – γνωστά από τον εξωτερικό προσανατολισμό των φωτογραφιών
NL, NR	τα ναδίρ των προβολικών κέντρων στο επίπεδο αναφοράς (προβολής) – γνωστά από τον εξωτερικό προσανατολισμό
Acorr	το αληθές σημείο. Η οριζοντιογραφική του θέση είναι γνωστή από το προηγούμενο βήμα και ζητείται η διόρθωση του ΨΜΕ σε αυτό το σημείο
A′,A″	είναι οι εικόνες του Acorr στις δύο ορθοφωτογραφίες, που δεν είναι στην σωστή οριζοντιογραφικά θέση. Τα σημεία αυτά έχουν μόνο οριζοντιογραφικές συντεταγμένες, ενώ είναι γνωστά από την διαδικασία συνταύτισης
M′,M″	φανταστικά σημεία στον τρισδιάστατο χώρο που αντιπροσωπεύουν τα λανθασμένα υψόμετρα των A′ και A″. Τα υψόμετρα αυτά είναι γνωστά αφού μπορούν να υπολογιστούν με παρεμβολή από το υπό έλεγχο ΨΜΕ.
M	φανταστικό σημείο στον τρισδιάστατο χώρο που αντιπροσωπεύει το λανθασμένο υψόμετρο του Acorr. Γνωστό αφού μπορεί να υπολογισθεί με παρεμβολή στο υπάρχον ΨΜΕ
Dh	η ζητούμενη διαφορά ή διόρθωση που πρέπει να επιβληθεί στο ΨΜΕ. Αποτελεί το βασικό ζητούμενο μέγεθος εάν γίνεται έλεγχος στο ΨΜΕ
Dh′	υψομετρική διαφορά του Acorr από το M′, άγνωστο
Dh″	υψομετρική διαφορά του Acorr από το M″, άγνωστο

Αφού τα υψόμετρα των M′ και M″ μπορούν να υπολογισθούν από το ΨΜΕ με παρεμβολή, ο υπολογισμός των Dh′ και Dh″ αρκεί για τον προσδιορισμό του υψομέτρου του Acorr. Από τα όμοια τρίγωνα R2″M″ και M″1″Acorr του σχήματος 3.6, προκύπτει:

$$\frac{R2''}{M''2''} = \frac{Dh''}{1''Acorr} \Leftrightarrow Dh'' = \frac{R2''}{M''2''} 1''Acorr \qquad (3.15)$$

Όπου

M″2″	απόσταση που μπορεί να υπολογισθεί από την δεξιά ορθοφωτογραφία και ισούται με την απόσταση R1 της κάτοψης του σχήματος 3.6
1″Acorr	απόσταση που μπορεί να υπολογισθεί από την δεξιά ορθοφωτογραφία και ισούται με r1 της

κάτοψης του σχήματος 3.6

R2″ το υψόμετρο του δεξιού προβολικού κέντρου μείον το εσφαλμένο υψόμετρο του M″, που χρησιμοποιήθηκε στον υπολογισμό της θέσης του σημείου A″ στην δεξιά ορθοφωτογραφία

Κατά συνέπεια είναι δυνατός ο υπολογισμός της διαφοράς Dh″ και αντιστοίχως της Dh′. Ο τελικός προσδιορισμός του υψομέτρου του Acorr, μπορεί να γίνει με δύο τρόπους:

$$M'+Dh' = Acorr = M''+Dh'' \qquad (3.16)$$

Είναι αναμενόμενο το αριστερό και το δεξί μέρος της εξίσωσης (3.1) να μην συμφωνούν απόλυτα, λόγω παραγόντων όπως η παρεμβολή για την παραγωγή ορθοφωτογραφίας, η ακρίβεια συνταύτισης, η αδυναμία του ΨΜΕ να μοντελοποιήσει πλήρως της φυσική επιφάνεια με δειγματοληψία. Είναι ασφαλές να χρησιμοποιηθεί ο μέσος όρος των δύο υπολογισθέντων υψομέτρων του Acorr ως η τελική τιμή του (Skarlatos & Georgopoulos, 2004, Georgopoulos & Skarlatos, 2003).

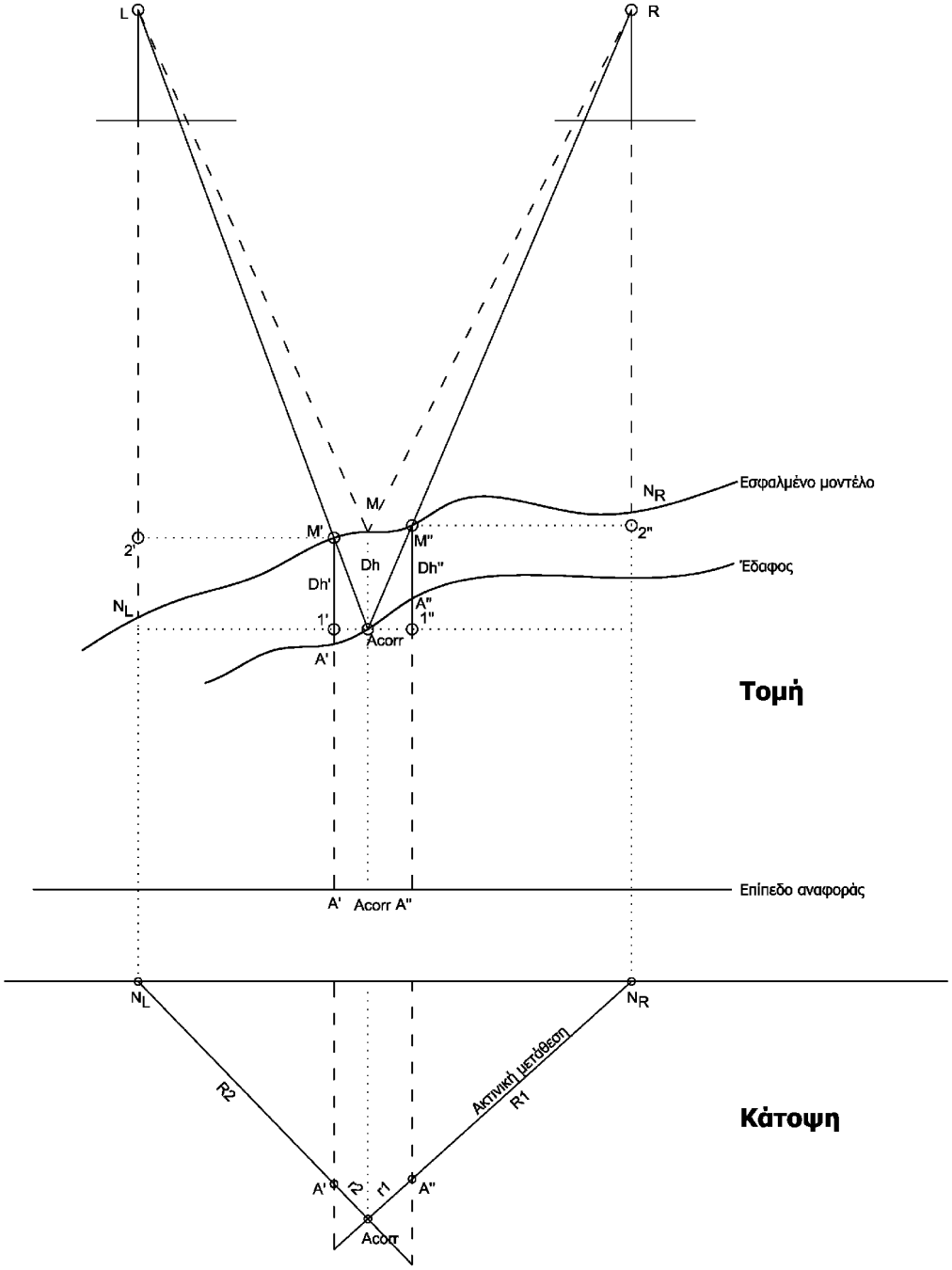
3.4.3. Σχόλια σχετικά με την προτεινόμενη μέθοδο

Το βασικό μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι βασίζεται στην υπόθεση ότι οι γεωμετρικές διαφορές ανάμεσα σε δύο ορθοφωτογραφίες οφείλονται αποκλειστικά και μόνο σε ατέλειες του ΨΜΕ. Η υπόθεση αυτή δεν ισχύει αυστηρά, αλλά είναι πολύ κοντά στην πραγματικότητα. Ο εξωτερικός προσανατολισμός αποτελεί πάντα μία βασική πηγή σφαλμάτων, αλλά είναι σχετικά εύκολο να ελεγχθεί και να οριστικοποιηθεί σε μία πολύ καλή λύση. Αντίθετα το ΨΜΕ δεν μπορεί να είναι ποτέ αρκετά πυκνό ή ακριβές ώστε να περιγράφει ακριβώς την επιφάνεια. Η επαναδειγματοληψία που χρειάζεται για την δημιουργία των ορθοφωτογραφιών μπορεί να θεωρηθεί ως μία ακόμα πηγή σφαλμάτων που δεν μπορεί να αποφευχθεί. Είναι λογικό και αναμενόμενο η προτεινόμενη μεθοδολογία να ανιχνεύει και διαφορές οι οποίες οφείλονται σε ελλειπή μοντελοποίηση του εδάφους λόγω αραιής δειγματοληψίας (αραιός κάναβος).

Η προτεινόμενη μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για σημεία που φαίνονται και στις δύο εικόνες που χρησιμοποιούνται για ο/φ. Οι εικόνες αυτές όμως δεν είναι απαραιτήτως εκείνες που χρησιμοποιήθηκαν για την δημιουργία του υπό έλεγχο ΨΜΕ.

Με βάση τις παραπάνω σκέψεις η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για έλεγχο ΨΜΕ ή για διόρθωσή του, αλλά είναι άσκοπο να γίνουν επαναλήψεις, αφενός γιατί η προτεινόμενη μέθοδος είναι άμεση και αφετέρου οι πολλαπλές επαναλήψεις στην περίπτωση Norvelle αναγκάζουν το ΨΜΕ να "αναλάβει" τα σφάλματα από όλες τις πιθανές πηγές.

Βασικές εφαρμογές της μεθόδου αποτελούν η βελτίωση ΨΜΕ και ορθοφωτογραφιών καθώς και ο έλεγχος ΨΜΕ χωρίς δεδομένα αναφοράς. Μία ακόμα εφαρμογή είναι η αυτοματοποίηση της ενημέρωσης χαρτών και χωρικών βάσεων δεδομένων με χρήση σύγχρονων αεροφωτογραφιών. Το παλαιό ΨΜΕ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ορθοφωτογραφιών από τις πρόσφατες αεροφωτογραφίες και την εφαρμογή της μεθόδου για την ενημέρωση του ΨΜΕ και την εκ νέου παραγωγή σωστών σύγχρονων ορθοφωτογραφιών.



Σχήμα 3.10. Διάγραμμα υπολογισμού της υψομετρικής διόρθωσης σε τομή και κάτοψη.

Τα εγγενή μειονεκτήματα της συνταύτισης εικόνων, όπως αυτή εφαρμόζεται στις α/φ για την δημιουργία ΨΜΕ, εξακολουθούν να ισχύουν και στην περίπτωση χρήσης συνταύτισης ο/φ για τον έλεγχο ΨΜΕ. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται το εύλογο ερώτημα πως είναι δυνατόν να αναμένονται καλύτερα και πιο αξιόπιστα αποτελέσματα της ίδιας μεθόδου (συνταύτιση) όταν αυτή εφαρμόζεται στις πρωτογενείς α/φ και στις παραγόμενες ο/φ. Οι διαφορές της συνταύτισης ο/φ σε σχέση με την συνταύτιση α/φ, οι οποίες την καθιστούν απλούστερη, είναι:

- η απουσία των μεγάλων γεωμετρικών διαφορών των αρχικών α/φ από τις ο/φ, με αποτέλεσμα οι αρχικές προσεγγίσεις να είναι πολύ καλές και να μην υπεισέρχονται από αυτές χονδροειδή σφάλματα (παρόμοια με την χρήση αρχικού ΨΜΕ)
- η απουσία των τοπικών γεωμετρικών διαφορών με αποτέλεσμα τα δύο παράθυρα, πρότυπο και

ελέγχου, να μην διαφέρουν πολύ και οι παράμετροι του αφινικού να είναι πολύ κοντά στις αρχικές τιμές, γεγονός που αυξάνει την ταχύτητα και αποφεύγει τα χονδροειδή σφάλματα, όπως αυτά εμφανίζονται σε περιοχές με έντονη κλίση

- η δυνατότητα χρήσης μικρότερων παραθύρων, αφού οι διαφορές από τις αρχικές τιμές δεν αναμένονται μεγάλες (στην περίπτωση χρήσης αλγορίθμου χωρίς δυναμικά μεταβαλλόμενα παράθυρα συνταύτισης)

Φυσικά σε κάθε περίπτωση το τελικό ΨΜΕ περιγράφει την επιφάνεια που απεικονίζεται στις φωτογραφίες και όχι την φυσική γήινη επιφάνεια χωρίς δέντρα ή κατασκευές. Εργασίες που ξεκινούν με την ύπαρξη ενός καλού ΨΜΕ και συνεχίζουν με διάφορες τακτικές να αφαιρέσουν ανθρωπογενείς παρεμβάσεις και δέντρα (Baillard et al., 1999) μπορούν ίσως να θεωρηθούν εφαρμογές που έπονται της παρούσας εργασίας.

4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ

4.1. Εισαγωγή

Στην παρούσα ενότητα θα γίνει η εφαρμογή των προτεινόμενων μεθόδων, με σκοπό την επαλήθευση της λειτουργίας τους, την βελτίωση ή μη προβλημάτων που σχεδιάστηκαν να αντιμετωπίσουν, καθώς και την ποσοτικοποίηση της τυχόν βελτίωσης. Αναλυτικότερα αυτά αφορούν:

1. την βελτίωση της ακρίβειας και αξιοπιστίας μέσω δυναμικού υπολογισμού του μεγέθους του παραθύρου,
2. την βελτίωση της ακρίβειας και αξιοπιστίας μέσω ελλειπτικού σχήματος παραθύρου,
3. την δυνατότητα αξιολόγησης και εν συνεχεία βελτίωσης ΨΜΕ από τον προτεινόμενο αλγόριθμο.

Τα παραπάνω αντιμετωπίζονται ξεχωριστά το καθένα με σκοπό την επικέντρωση και επαλήθευση των επιμέρους και όχι συνολικά, οπότε θα ήταν δυσκολότερο να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα για την συμπεριφορά του καθενός.

4.2. Αυτόματη επιλογή μεγέθους παραθύρου

Στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάστηκαν τρεις προτεινόμενες μέθοδοι αυτόματης επιλογής μεγέθους παραθύρου συνταύτισης, από τις οποίες θα πρέπει να επιλεγεί τελικά μία για περαιτέρω χρήση. Η αρχική αξιολόγηση (ενότητα 3.1.6.4) αφορούσε την εφαρμογή των μεθόδων σε εικόνες διαφορετικού περιεχομένου και τα αποτελέσματα ήταν μόνο ποιοτικά, χωρίς να παρέχουν δεδομένα για το εάν και πόσο διευκολύνουν την συνταύτιση. Σε αυτή την ενότητα γίνεται προσπάθεια σύνδεσης των αποτελεσμάτων της συνταύτισης με το αποτέλεσμα των αλγορίθμων αυτόματης προσαρμογής μεγέθους παραθύρου. Για τον σκοπό αυτό θα πρέπει να απομονωθούν όλες οι υπόλοιπες παράμετροι της συνταύτισης, ώστε το αποτέλεσμα να είναι άμεσα εξαρτημένο από το προτεινόμενο μέγεθος παραθύρου.

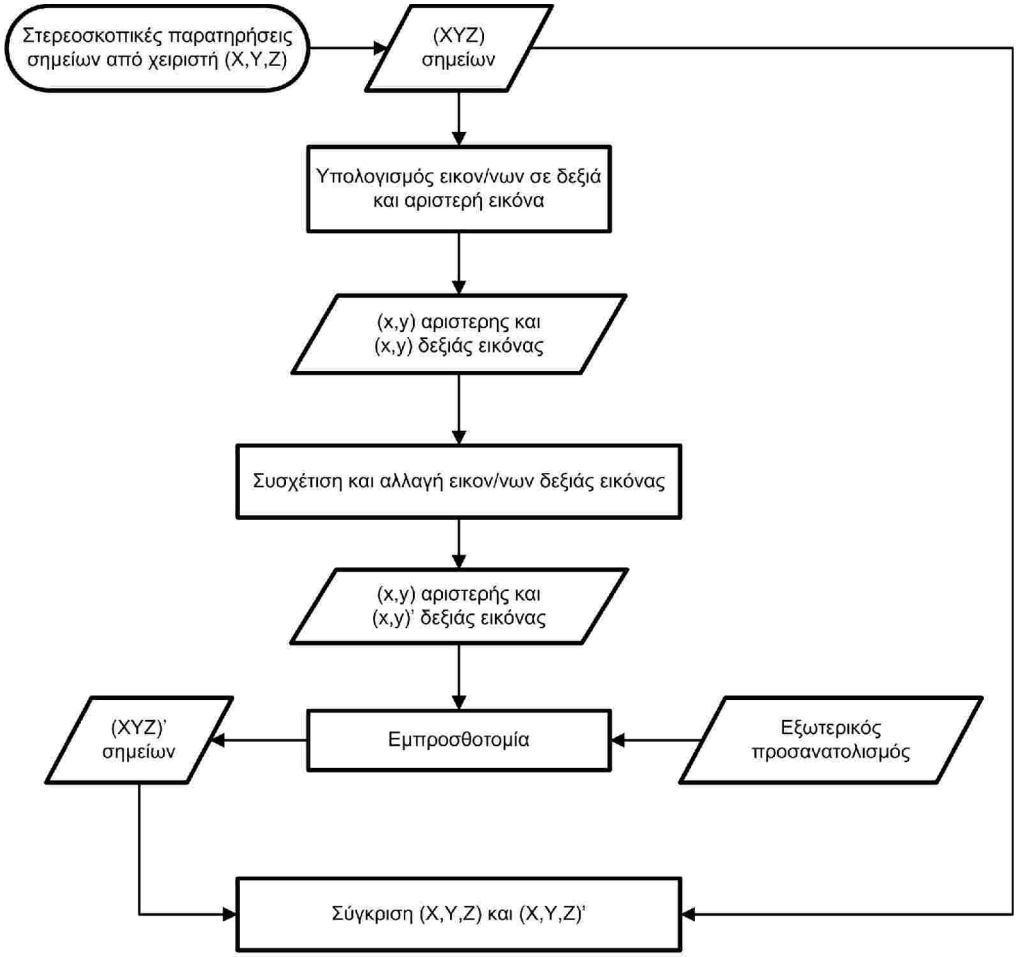
Οι βασικές παράμετροι που πρέπει να απομονωθούν είναι οι αρχικές τιμές σε δεξιά και αριστερή εικόνα ώστε να είναι κοινές για όλες τις μεθόδους. Οι τιμές στην δεξιά εικόνα θα πρέπει να συγκριθούν με τις αληθείς. Οι αληθείς αυτές τιμές θα πρέπει να προκύψουν από κάποιες παρατηρήσεις "αναφοράς" που εδώ, ως συνήθως, προέρχονται από κάποιο χειριστή.

Με την λογική αυτή, σημεία που έχουν συλλεγεί χειρωνακτικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αρχικές τιμές σε δεξιά και αριστερή εικόνα, να γίνει ελαχιστοτετραγωνική συνταύτιση με το προτεινόμενο από τον εκάστοτε αλγόριθμο μέγεθος παραθύρου και οι τελικές τιμές να συγκριθούν με τις αρχικές που θεωρούνται αληθείς. Έτσι, σε ψηφιακό σταθμό συλλέχθηκε χειροκίνητα ΨΜΕ σε ζεύγος αεροφωτογραφιών κλίμακας περίπου 1:17000. Το λογισμικό του συγκεκριμένου οργάνου δεν επιστρέφει εικονοσυντεταγμένες στα συλλεχθέντα σημεία ΨΜΕ (όπως άλλωστε και τα περισσότερα εμπορικά πακέτα), παρά μόνο τα εγγράφει σε πραγματικό χρόνο σε αρχείο CAD. Οι συντεταγμένες των σημείων αυτών μπορούν να ανακληθούν από το αρχείο CAD ως γεωδαιτικές συντεταγμένες και να μετατραπούν σε εικονοσυντεταγμένες μέσω των εξωτερικών και εσωτερικών προσανατολισμών, ώστε να χρησιμοποιηθούν ως αρχικές τιμές. Είναι προφανές βέβαια ότι οι προβολές των γεωδαιτικών συντεταγμένων (που είναι προϊόν εμπροσθοτομίας, δηλαδή συνόρθωσης) θα είναι διαφορετικές από τις μετρημένες εικονοσυντεταγμένες. Οι διαφορές όμως αυτές θα είναι αμελητέες εάν οι προσανατολισμοί θεωρηθούν ακριβείς. Στην συνέχεια η ελαχιστοτετραγωνική συνταύτιση με το προτεινόμενο μέγεθος παραθύρου θα αλλάξει ελαφρώς τις εικονοσυντεταγμένες στην δεξιά εικόνα (slave, search image) και θα ξαναϋπολογισθούν οι γεωδαιτικές συντεταγμένες του σημείου. Αυτές οι συντεταγμένες μπορούν να συγκριθούν με τις αρχικές (σχ. 4.1). Η σύγκριση αυτή θεωρείται καταλληλότερη από την αντίστοιχη των εικονοσυντεταγμένων, αφού γίνεται στον χώρο του αντικειμένου.

Τα πρώτα αποτελέσματα με αυτή την διαδικασία έδειξαν σοβαρές αποκλίσεις μεταξύ οριζοντιογραφικής και υψομετρικής ακρίβειας της συνταύτισης. Μετά από αναλυτικό έλεγχο (ενότητα 4.2.1) αποδείχθηκε ότι η επαναληψιμότητα και η υποκειμενικότητα του χειριστή δεν μπορούν να εξασφαλίσουν επαρκώς ακριβείς μετρήσεις αναφοράς από α/φ ίδιας κλίμακας.

Η λύση δόθηκε με την δημιουργία και χρήση τεχνητών δεδομένων με "πραγματική" υφή για τους σκοπούς της μελέτης. Επειδή σε αυτή την περίπτωση οι αρχικές τιμές θα ήταν ίδιες με τις αληθείς, προστέθηκαν τυχαία σφάλματα ώστε να είναι πιο ρεαλιστική η εφαρμογή του αλγορίθμου συνταύτισης.

Έτσι, η αρχική μεθοδολογία ελέγχου τροποποιήθηκε όπως φαίνεται στο σχ. 4.2. Με τον τρόπο αυτό υπάρχει πλήρης έλεγχος του υψομέτρου των σημείων, των προσανατολισμών, του υπολογισμού των αρχικών τιμών για συνταύτιση, ενώ ταυτόχρονα εξαλείφονται όλα τα προβλήματα θορύβου, οι δύσκολες περιοχές πίσω από κτήρια που φαίνονται μόνο σε μία εικόνα και οι απότομες αλλαγές κλίσης που επίσης δημιουργούν προβλήματα στον αφινικό μετασχηματισμό. Τα δεδομένα αυτά αποτέλεσαν δεδομένα αναφοράς για όλη την διατριβή και χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο του μεγέθους του παραθύρου συνταύτισης, για τον έλεγχο της έλλειψης ως σχήμα παραθύρου, αλλά και σε άλλους ελέγχους. Η σύγκριση των προτεινομένων μεθοδολογιών δυναμικής επιλογής μεγέθους παραθύρου γίνεται με κριτήριο την τελική ακρίβεια, συνάρτηση της οποίας είναι και η ακτίνα σύγκλισης.



Σχήμα 4.1. Αρχικό διάγραμμα μεθοδολογίας για τη σύγκριση αποτελεσμάτων με τα δεδομένα αναφοράς.

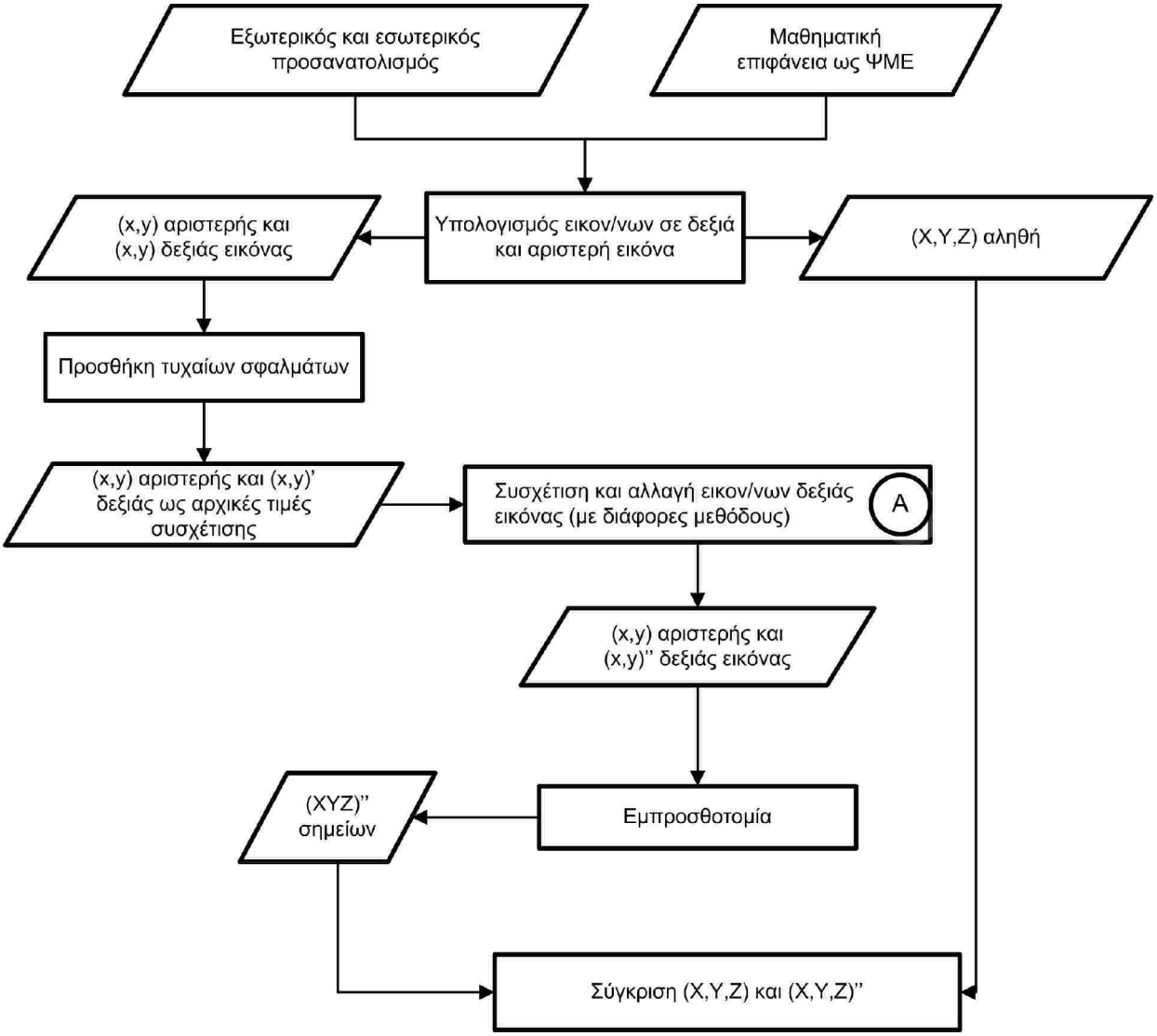
Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται επίσης και η σύγκριση μεταξύ τετραγώνου και έλλειψης ως παραθύρων της αυτόματης συνταύτισης. Ο έλεγχος αυτός γίνεται με τρία βασικά κριτήρια, κατά σειρά σημασίας, την ακτίνα σύγκλισης, την ακρίβεια και την ταχύτητα. Τα αποτελέσματα παρατίθενται τόσο συνολικά όσο και αναλυτικά στα παραρτήματα.

4.2.1. Ακρίβεια παρατηρητή.

Για την διαδικασία ελέγχου που περιγράφεται παραπάνω (ενότητα 4.2) χρησιμοποιήθηκε ζεύγος έγχρωμων αεροφωτογραφιών στην περιοχή των Σπάτων μέσης κλίμακας 1:17000. Η λήψη έγινε με RMK TOP15 σταθεράς μηχανής 153.183 mm. Οι φωτογραφίες σαρώθηκαν σε φωτογραμμετρικό σαρωτή Leica-Helava DSW100, μέσου τετραγωνικού σφάλματος 3μm, με ανάλυση 1200 dpi (=21 μm) και βάθος χρώματος 24 bits/pixel. Οι φωτογραφίες μετατράπηκαν σε ασπρόμαυρες με βάθος 8 bits/pixel για την ελαχιστοτετραγωνική συνταύτιση.

Η σύγκριση έγινε για 24 παραλλαγές των τριών προτεινόμενων μεθόδων δυναμικού υπολογισμού του

μεγέθους του παραθύρου, και τα αποτελέσματα σε όλες τις περιπτώσεις είχαν συστηματικά σφάλματα ως προς Z περίπου 0.40 m (μέσος όρος διαφορών από 0.37 έως 0.42 m). Οι αντίστοιχες τιμές ως προς X και Y ήταν περίπου 0.03 και 0.05 m αντίστοιχα. Όπως προκύπτει από την ενότητα 4.1.3, στις τυπικές περιπτώσεις αεροφωτοφράφησης ο λόγος μεταξύ υψομετρικής και οριζοντιογραφικής ακρίβειας κυμαίνεται μεταξύ 1.6 και 2.6. Ο Kraus (1997) αναφέρει ότι για μηχανές 23x23 cm, στην περίπτωση φακών 0.153 m και επικάλυψης 60% ο λόγος είναι περίπου 1:2. Ως εκ τούτου, η διαφορά ανάμεσα στην οριζοντιογραφική και την υψομετρική ακρίβεια είναι αδικαιολόγητα μεγάλη. Οι εξωτερικοί προσανατολισμοί ήταν ακριβώς ίδιοι σε όλες τις φάσεις, ενώ οι εσωτερικοί τηρήθηκαν όπου αυτό ήταν εφικτό, οπότε δεν επηρεάζουν τις διαφορές στην ακρίβεια.



Σχήμα 4.2. Τελικό διάγραμμα μεθοδολογίας σύγκρισης αποτελεσμάτων με τα δεδομένα αναφοράς.

Κατά συνέπεια, η μοναδική πηγή σφάλματος στην οποία μπορεί να αποδοθεί αυτή η απόκλιση είναι το ψηφιακό μοντέλο εδάφους και κατ' επέκταση ο ανθρώπινος παράγοντας. Η αξιοπιστία του χειριστή που συνέλεξε τα δεδομένα αναφοράς εξετάστηκε και η αξιολόγηση έγινε αρχικά από τον ίδιο με επαναλαμβανόμενες μετρήσεις σε 19 σημεία, καλώς και κακώς προσδιορισμένα, με προσέγγιση από διαφορετικές διευθύνσεις. Η επαναληψιμότητα, που εκφράζεται από την τυπική απόκλιση των μετρήσεων, ήταν κατά μέσο όρο 0.14 m (πίνακας 4.1) και κρίνεται ικανοποιητική για την κλίμακα των αεροφωτογραφιών (βλ. ενότητα 4.1.3). Όμως η ικανότητά του παρατηρητή να σκοπεύει σωστά το ίδιο σημείο σε επαναλαμβανόμενες μετρήσεις δεν εξασφαλίζει ότι αυτό το σημείο είναι αληθές (ορθότητα). Προκειμένου να αξιολογηθεί η ορθότητα του παρατηρητή, πρέπει να υπάρχουν μετρήσεις πεδίου μεγάλης ακρίβειας, που να μπορούν να θεωρηθούν αληθείς. Σε αυτή την περίπτωση όμως υπεισέρχονται και άλλοι

παράγοντες, όπως η ακρίβεια των προσανατολισμών, περιπλέκοντας την κατάσταση.

	Πλήθος σκοπεύσεων	Μέσος όρος υψομέτρου [m]	Μέση απόλυτη διαφορά [m]	Τυπική απόκλιση [m]
	15	136,628	0,046	0,061
	13	144,182	0,109	0,137
	21	144,940	0,066	0,087
	14	144,629	0,122	0,152
	17	156,278	0,072	0,089
	14	145,293	0,085	0,104
	14	128,790	0,119	0,151
	13	146,350	0,233	0,300
	14	145,847	0,063	0,081
	14	88,568	0,164	0,199
	14	106,211	0,107	0,132
	15	81,246	0,102	0,129
	15	75,221	0,064	0,096
	16	71,496	0,306	0,347
	14	76,492	0,048	0,063
	13	68,222	0,140	0,174
	15	136,715	0,066	0,100
	13	140,792	0,108	0,124
	13	136,352	0,053	0,067
Μέσος όρος	14,58		0,11	0,16
Τυπική απόκλιση			0,07	

Πίνακας 4.1. Ακρίβεια σκοπεύσεων χειριστή.

Για τον έλεγχο της αξιοπιστίας του παρατηρητή κρίθηκε σκόπιμο να γίνουν παρατηρήσεις και από άλλους παρατηρητές για να ελεγχθεί τυχόν συστηματικό σφάλμα. Το φαινόμενο της σταθερής υψομετρικής απόκλισης μεταξύ των παρατηρητών άλλωστε είναι γνωστό (McGlone, 2004) και αντιμετωπίζεται με κατάλληλες διορθώσεις από τα πακέτα λογισμικού (αναλυτικών και ψηφιακών) οργάνων. Για τον έλεγχο του παραπάνω ισχυρισμού, τέσσερις παρατηρητές (ΔΣ, ΑΓ, ΣΣ, ΧΙ), συμπεριλαμβανομένου και του αρχικού, σκόπευσαν 20 σημεία από μία φορά. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων φαίνονται στον πίνακας 4.2.

Από τις μετρήσεις αυτές προκύπτει ότι οι διαφορές μεταξύ των παρατηρητών έχουν μέση τυπική απόκλιση ±0.35 m (η συστηματική απόκλιση των παρατηρητών από τον μέσο όρο έφτανε έως και 0.34 m). Το δείγμα των παρατηρητών είναι μικρό και δεν μπορούν να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα για την ακρίβεια σκόπευσης στις συγκεκριμένες φωτογραφίες, αλλά δεν αντιβαίνουν προς την παρατηρούμενη συστηματική υψομετρική διαφορά των 0.40 m από τα αποτελέσματα της ελαχιστοτετραγωνικής συνταύτισης. Κατά συνέπεια δεν είναι δυνατό να γίνει έλεγχος της ακρίβειας της ψηφιακής συνταύτισης με δεδομένα αναφοράς από παρατηρητή σε α/φ της ίδιας κλίμακας, παρά μόνο για λόγους σύγκρισης μεταξύ τους.

Είναι προφανές λοιπόν ότι τα δεδομένα αναφοράς που θα χρησιμοποιηθούν για ελέγχους θα πρέπει να έχουν βαθμό αξιοπιστίας και ορθότητας πολύ μεγάλο και μάλιστα καλύτερο από 0.04 m, που είναι ο μέσος όρος της οριζοντιογραφικής ακρίβειας. Για να καλυφθούν αυτές οι ανάγκες ακρίβειας από αεροφωτογραφίες, θα πρέπει αυτές να είχαν κλίμακα 1:2500 ή μεγαλύτερη. Ακόμα και έτσι όμως, η δειγματοληψία του ΨΜΕ θα ήταν ανεπαρκής και θα δημιουργούσε προσθετα προβλήματα. Ο μοναδικός τρόπος για να επιτευχθεί η επιθυμητή ακρίβεια χωρίς να υπάρχει αβεβαιότητα στους προσανατολισμούς και να υπάρχει γνωστό υψόμετρο σε κάθε πιθανό σημείο του κοινού επικαλυπτόμενου είναι τα τεχνητά δεδομένα.

Μετρήσεις υψομέτρου					
Z ΔΣ	**Α ΑΓ**	**Z ΣΣ**	**Z ΧΙ**	**Μέσος όρος [m]**	**σ [m]**
136.69	136.10	136.68	136.13	136.40	0.33
144.32	143.65	144.21	143.93	144.03	0.30
144.99	144.39	144.82	144.84	144.76	0.26
156.38	155.77	156.34	156.34	156.21	0.29
145.69	145.00	145.21	145.67	145.39	0.34
128.91	128.35	128.84	128.65	128.69	0.25
146.18	144.82	146.23	145.71	145.74	0.65
145.78	145.78	145.79	145.57	145.73	0.11
88.89	88.52	88.68	88.01	88.52	0.38
106.29	105.55	106.21	105.66	105.93	0.38
81.28	80.80	81.02	80.23	80.83	0.45
75.27	74.33	75.10	74.44	74.78	0.47
72.70	71.66	72.51	72.73	72.40	0.50
76.52	75.94	76.37	76.56	76.35	0.28
68.23	67.06	68.12	68.31	67.93	0.59
136.72	136.43	136.76	136.78	136.67	0.16
140.81	140.70	140.76	140.77	140.76	0.05
136.46	136.10	136.52	136.31	136.34	0.19
161.99	161.90	162.00	161.95	161.96	0.05
156.46	156.04	156.38	156.42	156.32	0.19
		Συνολική τυπική απόκλιση			**0.35**

Πίνακας 4.2. Σύγκριση υψομετρικών μετρήσεων από τέσσερις παρατηρητές (ΑΓ, ΧΙ, ΣΣ, ΔΣ).

4.2.2. Περιγραφή δημιουργίας τεχνητών δεδομένων

Σκοπός της διαδικασίας ήταν η δημιουργία ενός ζεύγους εικόνων με γνωστούς προσανατολισμούς, γνωστό ΨΜΕ και όσο γίνεται πιο ρεαλιστική υφή ώστε να είναι δυνατόν να δοκιμαστούν οι προτεινόμενες μέθοδοι. Οι βασικοί στόχοι για την δημιουργία του ζεύγους ήταν η ρεαλιστική υφή, η υψηλή ανάλυση των 1200 dpi, η επικάλυψη κατά 60% και η σταθερά μηχανή των 150 mm. Οι παράμετροι αυτές χρησιμοποιούνται ευρύτατα στην σύγχρονη φωτογραμμετρική πρακτική. Η επιλογή της κλίμακας εξαρτήθηκε κυρίως από τις διαθέσιμες σαρωμένες αεροφωτογραφίες. Τελικά επιλέχθηκε μία φωτογραφία χωρίς διαβαθμισμένες περιοχές, με ποικιλία χαρακτηριστικών κλίμακας 1:12000 και αρχική ανάλυση σάρωσης 1800 dpi σε φωτογραμμετρικό σαρωτή DSW 100.

4.2.2.1. Δημιουργία ΨΜΕ

Για το ΨΜΕ υπήρχαν δύο περιπτώσεις:

- η χρήση διακριτών τιμών, γεγονός που επιτρέπει την εισαγωγή τεχνητών κατασκευών σε αυτό, αλλά για ενδιάμεσες τιμές κανάβου δεν εξασφαλίζει την απαιτούμενη ακρίβεια
- ή η χρήση μίας συνεχούς μαθηματικής επιφάνειας τύπου Z=f(X,Y), που εξασφαλίζει γνωστή τιμή για κάθε πιθανό σημείο.

Η δεύτερη θεωρήθηκε καταλληλότερη, αφού το υψομέτρου είναι γνωστό με ακρίβεια σε κάθε σημείο και όχι μόνο σε διακριτές και συγκεκριμένες θέσεις, αναγκάζοντας σε παρεμβολή σε ασυνεχή επιφάνεια.

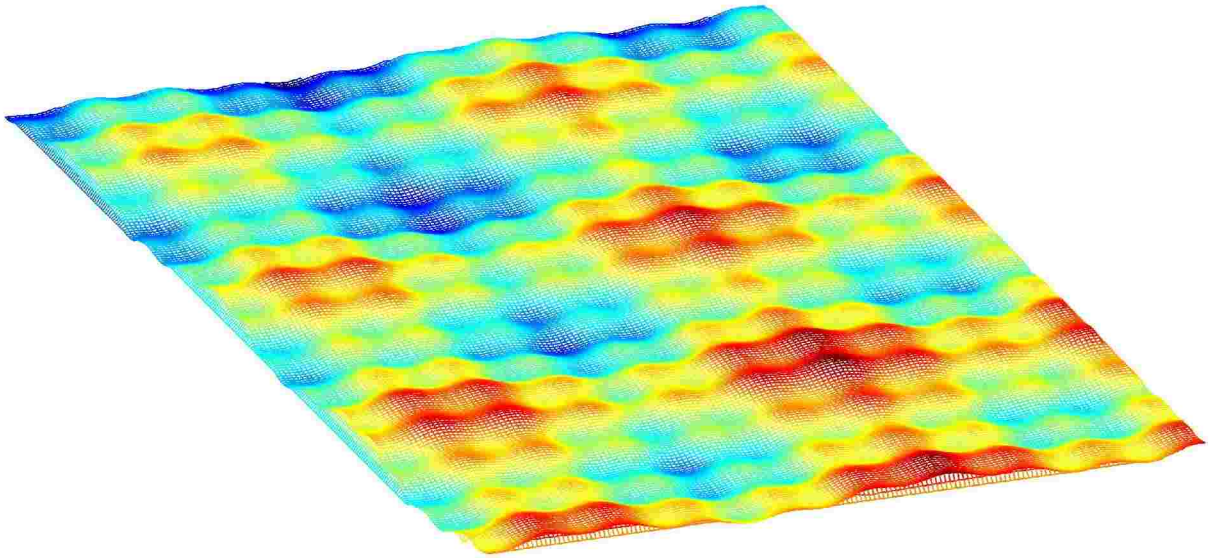
Για το σκοπό αυτό υιοθετήθηκε ένα κεκλιμένο επίπεδο με μικρή κλίση, πάνω στο οποίο προστέθηκαν δύο ημιτονοειδείς συναρτήσεις, μία με μεγάλη περίοδο και πλάτος και μία με μικρότερα αντίστοιχα μεγέθη. Η περίοδος της μεγάλης δεν είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της μικρής, ώστε να μην συντονίζονται. Το άθροισμα των παραπάνω κατέληξε στην σχέση:

$$\begin{aligned} Z = f(X,Y) = {} & Z_s + (X - X_s)*k - (Y - Y_s)*k \\ & + a_1 * \sin((X - X_s)*p_1) + a_1 * \sin((Y - Y_s)*p_1) \\ & + a_2 * \sin((X - X_s)*p_2) + a_2 * \sin((Y - Y_s)*p_2) \end{aligned} \tag{4.1}$$

με παραμέτρους X_s, Y_s, Z_s = 10552,10000,100 m
k = 0.01
a_1 = 15 m

a_2 = 6 m
p_1 = π/400
p_2= π/90.

Το ΨΜΕ που δημιουργείται στην περιοχή του στερεομοντέλου φαίνεται στην εικόνα 1.1. Έχει μέγιστο και ελάχιστο ύψος 148.38 και 42.19 m αντίστοιχα, δηλαδή εύρος 106.19 m. Το εύρος είναι αρκετά μεγάλο, ειδικά σε συνδυασμό με την κλίμακα (ενότητα 4.2.2.2). Το μέσο υψόμετρο της ίδιας περιοχής είναι 99.13 m. Η μέγιστη κλίση του συγκεκριμένου ΨΜΕ είναι ±11.06%. Η μέση τετραγωνική απόκλιση από το μέσο επίπεδο είναι ±17.41 m, ενώ ο λόγος αυτής της απόκλισης προς το ύψος πτήσης είναι 1.1%. Η επιφάνεια είναι συνεχής χωρίς απότομες αλλαγές κλίσεων. Για τον σκοπό ελέγχου μεγέθους παραθύρου το συγκεκριμένο ΨΜΕ είναι επαρκές, αφού αποτελεί σχετικά απλή περίπτωση.

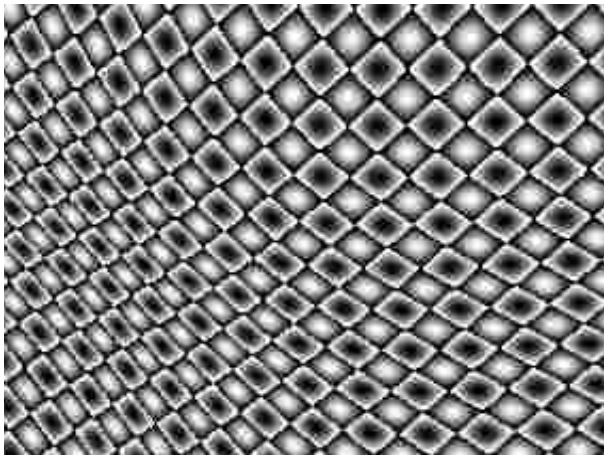


Εικόνα 4.1. Τεχνητό ΨΜΕ με μέγιστο και ελάχιστο υψόμετρο 148.38 και 42.19 m αντίστοιχα, μέσο 99.13 m και εύρος 106.19 m.

4.2.2.2. Δημιουργία Εικόνων με "ρεαλιστική" υφή

Η δημιουργία της τεχνητής εικόνας γίνεται με τρόπο αντίστροφο της διαδικασίας δημιουργίας ορθοφωτογραφίας. Για κάθε εικονοστοιχείο, με δεδομένο εσωτερικό και εξωτερικό προσανατολισμό, υλοποιείται μία γραμμή στο χώρο, η οποία τέμνει την μαθηματική επιφάνεια που ορίστηκε ως ΨΜΕ σε ένα σημείο με γεωδαιτικές συντεταγμένες $(X,Y,Z)_a$. Η τιμή της έντασης που πρέπει να αποδοθεί σε εκείνο το εικονοστοιχείο (εφόσον πρόκειται για ψηφιακή μηχανή) είναι ο μέσος όρος του ανακλώμενου φωτός της επιφάνειας της φυσικής γήινης επιφάνειας που καλύπτει αυτό το εικονοστοιχείο. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να αντιμετωπισθεί με δύο τρόπους.

Η δημιουργία μιας συνάρτησης έντασης για κάθε οριζοντιογραφική θέση (αντίστοιχα με την συνάρτηση του ΨΜΕ, αλλά με τιμές στο εύρος 0-255) οδηγεί σε μία εικόνα με υφή τύπου "σκακιέρας" (εικόνα 1.2), καθόλου ενδεικτική με το τι πρόκειται να αντιμετωπίσει ο αλγόριθμος μεγέθους παραθύρου στην πραγματικότητα. Με αυτό το κριτήριο η εφαρμογή τέτοιου είδους υφής αποκλείστηκε.



Εικόνα 4.2 Τεχνητή υφή.

Καλύτερη λύση είναι η χρήση της υφής μιας υπάρχουσας αεροφωτογραφίας, ώστε να απεικονίζονται πραγματικά αντικείμενα και η επιλογή μεγέθους παραθύρου να γίνεται με βάση ρεαλιστικά δεδομένα. Η σαρωμένη αεροφωτογραφία θα έπρεπε να είναι υψηλής ανάλυσης ώστε να αποφευχθούν προβλήματα κατά την επανασύσταση της εικόνας. Επίσης δεν θα έπρεπε να περιέχει διαβαθμισμένες (λευκές) περιοχές. Από τις υπάρχουσες φωτογραφίες αρχείου που κάλυπταν αυτά τα κριτήρια, επιλέχθηκε μία αεροφωτογραφία που καλύπτει πλήρως ένα δασώδη λόφο, καλλιεργημένες περιοχές και μικρό τμήμα ημιαστικού ιστού. Από αυτή την εικόνα επιλέχθηκε για τεχνητή υφή το κομμάτι εντός των εικονοσημάτων (ώστε αυτά να μην απεικονίζονται στις νέες εικόνες). Στην εικόνα αυτή έγινε εφαρμογή αφινικού μετασχηματισμού ώστε να αποκτήσει "γεωαναφορά" και να καλύπτει το αναμενόμενο κοινό επικαλυπτόμενο των δύο τεχνητών αεροφωτογραφιών. Οι παράμετροι του αφινικού που χρησιμοποιήθηκε για γεωαναφορά είναι (9412.94, 0.169, 0, 11286.09, 0, -0.169). Το μέγεθος του εικονοστοιχείου επί του εδάφους υπολογίζεται εύκολα από την ανάλυση σάρωσης και την μέση κλίμακα της αεροφωτογραφίας ως 0.169 m, και χρησιμοποιείται για να δώσει κλίμακα στην εικόνα. Έτσι τα δεδομένα που θα χρησιμοποιηθούν ως τεχνητή υφή έχουν την πραγματική κλίμακα, ώστε και οι εικόνες που θα δημιουργηθούν από αυτά θα την διατηρήσουν. Με τον τρόπο αυτό η υπάρχουσα φωτογραφία χρησιμοποιείται ως "ορθοφωτογραφία", δίνοντας πληροφορίας έντασης σε κάθε οριζοντιογραφική θέση στην περιοχή ενδιαφέροντος. Έτσι έγινε δυνατό να αποδοθούν σε κάθε (X,Y) συγκεκριμένες τιμές έντασης και εν συνεχεία να μεταφερθούν στην τεχνητή εικόνα. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι δημιουργία ορθοφωτογραφίας με χρήση του μαθηματικού μοντέλου του ΨΜΕ με οποιαδήποτε από τις δύο τεχνητές εικόνες οφείλει να καταλήξει στην αρχική που χρησιμοποιείται σε αυτό το στάδιο ως υφή. Αυτό είναι μια χρήσιμη ιδιότητα που προκύπτει από την διαδικασία δημιουργίας τους, αφού επιτρέπει να υπάρχει ορθοφωτογραφία "αναφοράς" για το ζεύγος των τεχνητών αεροφωτογραφιών.

Η σταθερά μηχανή της μηχανής τέθηκε 150 mm και ο αφινικός μετασχηματισμός των εικόνων περιγράφεται τις παραμέτρους [-115, 0.02116694275722, 0, 115, 0, -0.02116694275722] (μετατροπή εικονοστοιχείων σε χιλιοστά).

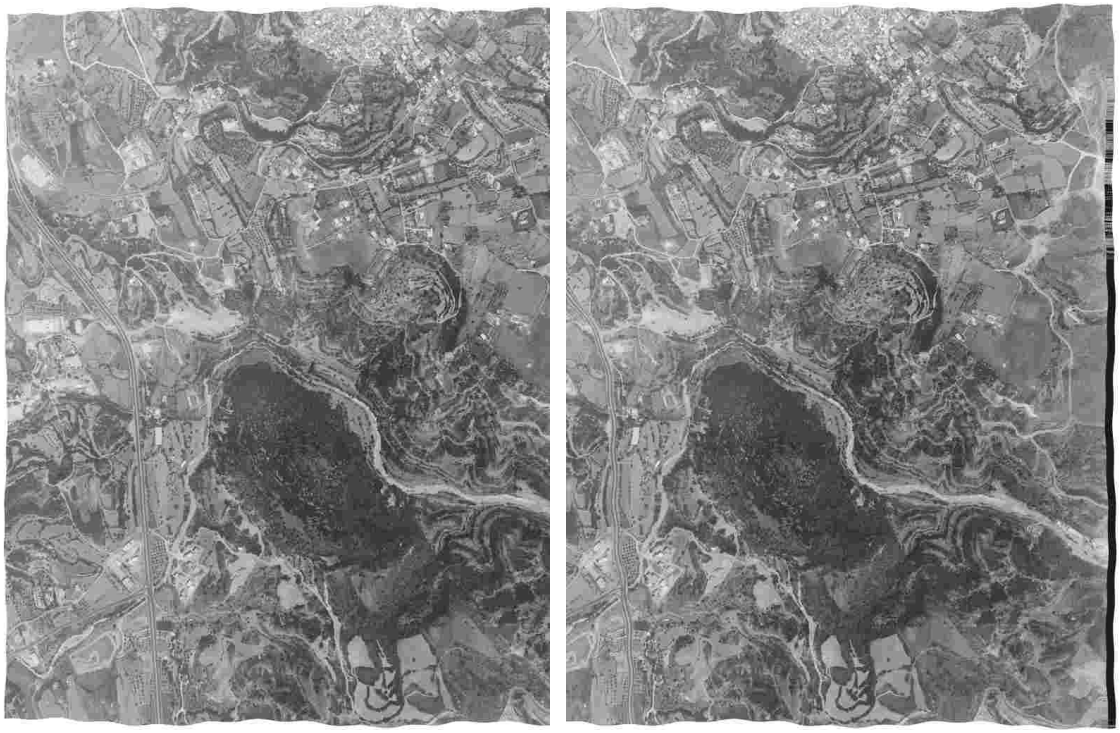
Οι εξωτερικοί προσανατολισμοί φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

φωτό	Xo	Yo	Zo	ω	φ	κ
Αριστερή	10000	10000	1900	0	0	0
δεξιά	11104	10000	1900	0	0	0

Πίνακας 4.3. Εξωτερικοί προσανατολισμοί των τεχνητών εικόνων.

Με αυτόν τον τρόπο καταλήγουμε σε δύο τεχνητές φωτογραφίες ανάλυσης 1200 dpi, κλίμακας 12000, που δημιουργούν ένα στερεοσκοπικό μοντέλο που δεν έχει καμία σχέση μεταξύ επιφάνειας και απεικονιζόμενων αντικειμένων, αλλά έχει μηδενικό θόρυβο ανάμεσα σε δεξιά και αριστερή εικόνα, διευκολύνοντας την αυτόματη συνταύτιση. Ο θόρυβος του φιλμ (γρατσουνιές και σκόνη) και ο ηλεκτρονικός θόρυβος κατά την διάρκεια σάρωσης της αρχικής φωτογραφίας μεταβιβάζονται και στις δύο εικόνες, οπότε ο μεταξύ τους θόρυβος εξουδετερώνεται και έχει να κάνει μόνο με την μέθοδο επαναδειγματοληψίας. Η δικυβική παρεμβολή έχει μέσο τετραγωνικό σφάλμα σε σχέση με την αρχική το $^1/_3$ του αντίστοιχου σφάλματος της διγραμμικής (Zhizhuo, 1990), οπότε η επιλογή της στη συγκεκριμένη φάση ήταν μονόδρομος. Έτσι οι ραδιομετρικές διαφορές ανάμεσα στις δύο τεχνητές φωτογραφίες είναι οι

ελάχιστες δυνατές.



Εικόνα 4.3. Οι δύο τεχνητές αεροφωτογραφίες.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι έντονες ακμές (αλλαγή γκρίζων τόνων), που σε πραγματικά δεδομένα συνήθως συμπίπτουν με αλλαγές κλίσεων, δεν ισχύει σε αυτά τα δεδομένα.

4.2.3. Αναμενόμενη ακρίβεια

Ο υπολογισμός της αναμενόμενης ακρίβειας μετρημένων σημείων από ένα ζεύγος ή ένα μπλοκ αεροφωτογραφιών μπορεί να αντιμετωπισθεί με διαφορετικά κριτήρια. Οι διαφορές οφείλονται κυρίως στον διαχωρισμό ανάμεσα στην εμπειρική και θεωρητική ακρίβεια. Ο Kraus (1993) αναφέρει ότι η θεωρητική ακρίβεια προκύπτει από την εφαρμογή του νόμου μετάδοσης σφαλμάτων, ενώ η εμπειρική προκύπτει ως σύγκριση πραγματικών φωτογραμμετρικών μετρήσεων με δεδομένα σαφώς καλύτερης ακρίβειας. Το πλεονέκτημα της δεύτερης είναι ότι συμπεριλαμβάνει όλες τις πιθανές πηγές σφαλμάτων, γι' αυτό και χρησιμοποιείται ιδιαίτερα από όσους ασχολούνται με την εφαρμοσμένη φωτογραμμετρία. Το βασικό μειονέκτημά της είναι ότι τα αποτελέσματα διαφέρουν αρκετά από μελέτη σε μελέτη. Η θεωρητική ακρίβεια από την άλλη πλευρά έχει το μειονέκτημα ότι δεν λαμβάνει υπόψη όλους τους παράγοντες που επιδρούν. Ο Kraus (1993) αναφέρει ότι πρέπει να ακολουθούνται οι κατά περίπτωση ενδεδειγμένες ή καλύτερα σύνθεση τους. Στα επόμενα θα αναφερθούν ορισμένες εκτιμήσεις από την βιβλιογραφία σχετικά με την κανονική περίπτωση του στερεοζεύγους.

4.2.3.1. Σύμφωνα με το εγχειρίδιο της ISM

Η εταιρεία ISM εξέδωσε το 1998 ένα εγχειρίδιο με σκοπό την διευκόλυνση της ομαλής μετάβασης της φωτογραμμετρικής παραγωγής από την αναλυτική στην ψηφιακή εποχή. Αν και υπήρχαν και άλλα βιβλία με σαφείς αναφορές στις ψηφιακές μεθόδους, το συγκεκριμένο ήταν εστιασμένο στην ψηφιακή παραγωγή φωτογραμμετρικών προϊόντων, θίγοντας όλα τα πιθανά ζητήματα και απαλλαγμένο από την αυστηρότητα των επιστημονικών συγγραμμάτων, αφού γράφτηκε ως βοήθημα για τον μελετητή που προσπαθεί να περάσει από τα αναλυτικά συστήματα και τα μm στα ψηφιακά συστήματα και τα pixel.

Η ανάλυση σφάλματος ξεκινάει από το σφάλμα της μονοεικονικής σκόπευσης σημείων. Έτσι εάν το σφάλμα του σαρωτή είναι 0.33xPs και το σφάλμα σκόπευσης 0.25xPs, τότε

$$\sigma_{xy} = \sqrt{\text{σφάλμα_σαρωτή}^2 + \text{σφάλμα_σκόπευσης}^2} \mapsto \text{RMSE} \approx \pm 0.6 \times \text{Ps} \qquad (4.2)$$

όπου, Ps το μέγεθος του εικονοστοιχείου.

Εν προκειμένω, το γεωμετρικό σφάλμα του σαρωτή δίδεται από την κατασκευάστρια εταιρεία και είναι 3μm. Το σφάλμα σκόπευσης προσδιορίζεται από το ίδιο εγχειρίδιο σε $^1/_4$ του εικονοστοιχείου. Έτσι για την περίπτωση των 1200 dpi ή 21μm μέγεθος εικονοστοιχείου, ισχύει σxy=6μm.

Από τον λόγο βάσης προς απόσταση λήψης μπορεί να υπολογισθεί και η σχέση της υψομετρικής με την οριζοντιογραφική ακρίβεια. Για τυπική επικάλυψη 60%, φωτογραφική βάση στερεοζεύγους 90mm, και φακό 152mm, η ακρίβεια κατά Z είναι 1.0xPs. Η εγκυρότητα του παραπάνω επιβεβαιώθηκε και από εμπειρικούς ελέγχους, όπως υποστηρίζουν οι συγγραφείς.

Έτσι για την συγκεκριμένη περίπτωση ισχύει:

$$\sigma_{(X,Y,Z)} = (0.6, 0.6, 1.0) \text{ x } 21\mu m \text{ x } 12000 = (0.15, 0.15, 0.25)m \quad (4.3)$$

Στην υπό έλεγχο περίπτωση, το σφάλμα του σαρωτή είναι σημαντικά μικρότερο από το αναφερόμενο παραπάνω 0.33xPs και ίσο με 0.1xPs, οπότε η (4.1) γίνεται:

$$\sigma_{xy} = \sqrt{(0.1 \times Ps)^2 + (0.25 \times Ps)^2} \mapsto RMSE \approx \pm 0.3 \times Ps \quad (4.4)$$

οπότε και τα αντίστοιχα τελικά σφάλματα είναι:

$$\sigma_{(X,Y,Z)} = (0.3, 0.3, 0.5) \text{ x } 21\mu m \text{ x } 12000 = (0.08, 0.08, 0.13)m \quad (4.5)$$

4.2.3.2. Σύμφωνα με τον Kraus

Ο Kraus (1997), για την ίδια ως άνω περίπτωση στερεοζεύγους, αναφέρει ότι από μελέτη σε μοντέλο με 4 φωτοσταθερά στις τέσσερις γωνίες του και προσανατολισμό σε δύο βήματα (σχετικό και απόλυτο), οι ακρίβειες σε 47 καλώς προσδιορισμένα σημεία ελέγχου έδωσαν μέσο όρο απόκλισης τις παρακάτω τιμές:

σ_X = ± 5.1 μm x την κλίμακα
σ_Y = ± 7.7 μm x την κλίμακα
σ_Z = ± 0.061 ‰ του ύψους πτήσης

Οι αντίστοιχες τιμές για προσανατολισμό σε ένα βήμα με την μέθοδο της δέσμης είναι:

σ_X = ± 4.7 μm x την κλίμακα
σ_Y = ± 5.8 μm x την κλίμακα
σ_Z = ± 0.070 ‰ του ύψους πτήσης

Σαν γενικές παρατηρήσεις αναφέρει:
Οι συντεταγμένες X έχουν καλύτερη ακρίβεια από τις Y. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην φύση των μετρήσεων που επιδεινώνονται ανάλογα με την απόσταση από το κέντρο του μοντέλου. Έτσι, αφού το στερεοσκοπικό μοντέλο εκτείνεται κυρίως κατά τον Y άξονα, τα πιθανά σημεία κατά μέσο όρο έχουν μεγαλύτερη απόσταση από τα κέντρα των αεροφωτογραφιών και ως εκ τούτου μεγαλύτερα σφάλματα. Τελικά προτείνει την από κοινού αντιμετώπιση των κατά X και Y σφαλμάτων.

Ο προσανατολισμός σε ένα βήμα, ως ακριβέστερος, βελτιώνει την ακρίβεια κατά X περίπου κατά 10% και κατά Y περίπου κατά 25%. Η επιδείνωση του Z αποδίδεται στο αναπόφευκτο μειονέκτημα των εμπειρικών κανόνων.

Επίσης προτείνει ως μέση εκτίμηση των παραπάνω τα εξής μεγέθη:

σ_X = ± 6.0 μm x την κλίμακα
σ_Y = ± 6.0 μm x την κλίμακα
σ_Z = ± 0.06 ‰ του ύψους πτήσης

Βέβαια ο Kraus δεν κάνει καμία αναφορά στο μέγεθος του εικονοστοιχείου, αφού θεωρεί ότι οι μετρήσεις γίνονται σε αναλυτικό όργανο. Σε συνδυασμό όμως με την παρατήρηση του ίδιου ότι η ακρίβεια σκόπευσης σε ψηφιακές εικόνες είναι περίπου $^1/_3$ έως $^1/_4$ του εικονοστοιχείου, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι μία λογική ανάλυση σάρωσης, είναι 15 έως 20 μm ήτοι 1800 έως 1200 dpi αντίστοιχα. Σάρωση πέραν αυτού δεν οδηγεί σε περαιτέρω βελτίωση της ακρίβειας.

Σύμφωνα με την παραπάνω μέση εκτίμηση, η αναμενόμενη ακρίβεια σε καλώς προσδιορισμένα σημεία από τις τεχνητές αεροφωτογραφίες είναι:

$$\sigma_{(X,Y,Z)} = (0.006mm \text{x} 12000, 0.006mm \text{x} 12000, 0.06 ‰ \ 1800m) = (0.07, 0.07, 0.11)m \quad (4.6)$$

4.2.3.3. Σύμφωνα με το Manual of Photogrammetry

Ο McGlone (2004) αναφέρει ότι η ακρίβεια υπολογίζεται μαθηματικά. Η ακρίβεια κατά X και Y, για την περίπτωση της προσεγγιστικής αντιμετώπισης του στερεοζεύγους, δίνεται από τον τύπο:

$$\sigma_X = \frac{Z}{c}\sigma_x\,,\ \sigma_Y = \frac{\sqrt{2}}{2}\frac{Z}{c}\sigma_y \tag{4.7}$$

όπου ο όρος $\frac{Z}{c}$ εκφράζει τον συντελεστή κλίμακας και το Z είναι η απόσταση λήψης.

Η υψομετρική ακρίβεια δίνεται, ως γνωστόν, από τον τύπο:

$$\sigma_Z = \frac{H_g}{c}\frac{1}{B/Hg}\sigma_{p_x} \tag{4.8}$$

Όπου, $\sigma_{x,y}$ η ακρίβεια μέτρησης εικονοσυντεταγμένων

c η σταθερά της μηχανής

$H_g = |Z|$ και αναφέρεται στην απόσταση λήψης από το αντικείμενο

B η βάση λήψης των φωτογραφιών

σ_{p_x} η ακρίβεια της κατά x παράλλαξης που για μονοεικονική μέτρηση υπολογίζεται ως $\sigma_{p_x} = \sqrt{2}\sigma_x$.

Το πιο βασικό από τα παραπάνω μεγέθη για τον υπολογισμό της γεωδαιτικής ακρίβειας είναι η ακρίβεια μέτρησης/σκόπευσης που με την σειρά της εξαρτάται από το μέγεθος του εικονοστοιχείου. Ο ίδιος (McGlone, 2004) αναφέρει ότι τα σωστά σημεία από αυτόματη συνταύτιση για παραγωγή ΨΜΕ αναμένεται να έχουν ακρίβεια $^1/_2$ εικονοστοιχεία ή καλύτερη. Η ελαχιστοτετραγωνική συνταύτιση, εφόσον δεν παρουσιάσει χονδροειδή σφάλματα, είναι δυνατό να πετύχει ακρίβεια έως 0.02 εικονοστοιχεία σε προσημασμένα σημεία και οι συγγραφείς προφανώς το γνωρίζουν. Η ακρίβεια $^1/_2$ εικονοστοιχεία, παρουσιάζεται εδώ ως κατώφλι αποδοχής σημείου για δημιουργία ΨΜΕ. Πάνω από αυτό το όριο το σημείο προφανώς θεωρείται ως αποτυχία του αλγορίθμου και ακατάλληλο.

Έτσι, με ακρίβεια $^1/_2$ εικονοστοιχεία και με τα υπόλοιπα στοιχεία των τεχνητών αεροφωτογραφιών υπολογίζεται:

$$\sigma_{(X,Y,Z)} = 0.13,\ 0.09,\ 0.29\ \text{m} \tag{4.9}$$

4.2.3.4. Επιλογή κατωφλιού σφάλματος για την καταγραφή του ως αστοχία

Οι δύο εμπειρικές προσεγγίσεις της ακρίβειας, από την ISM και τον Kraus, συμφωνούν μεταξύ τους.

Η απόκλιση που παρατηρείται οφείλεται εν πολλοίς στο γεγονός ότι η μεν εμπειρική αναφέρεται σε μετρήσεις "καλώς προσδιορισμένων" σημείων, ενώ η θεωρητική προσπαθώντας να καλύψει την ακρίβεια της συνταύτισης στην πλέον διαδεδομένη εφαρμογή της, την δημιουργία ΨΜΕ, αυξάνει τα περιθώρια ανοχής.

Αποδοχή της αναμενόμενης ακρίβειας σε "καλώς προσδιορισμένα" σημεία σύμφωνα με την εξ. 4.6, σημαίνει ότι προκειμένου να θεωρηθεί ένα σημείο ως αστοχία με επίπεδο εμπιστοσύνης 95%, αυτό θα πρέπει να αποκλίνει από τις αληθείς τιμές περισσότερο από το διπλάσιο του σ, δηλαδή,

$$\sigma_{(X,Y,Z)} = 0.14,\ 0.14,\ 0.21\ \text{m} \tag{4.10}$$

μεγέθη που πλησιάζουν στην θεωρητική προσέγγιση της αναμενόμενης ακρίβειας και τελικά υιοθετούνται από την παρούσα εργασία.

Σε κάθε περίπτωση τα όρια αυτά είναι αυστηρά, αφού οι μετρήσεις τόσο του Kraus όσο και της ISM, αφορούν "καλώς προσδιορισμένα" σημεία και κατά συνέπεια τα συμπεράσματα δεν μπορούν να επεκταθούν σε όλα τα σημεία που συλλέγει η αυτόματη συνταύτιση.

4.2.4. Διαδικασία ελέγχου

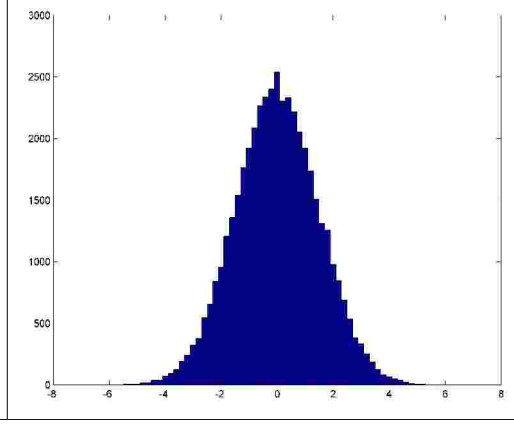
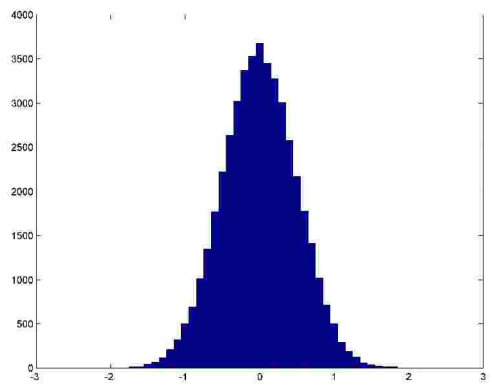
4.2.4.1. Αρχικές τιμές

Η μεθοδολογία ελέγχου περιγράφηκε στην ενότητα 4.2 και φαίνεται γραφικά στο σχήμα 1.2. Σκοπός είναι η σύγκριση μεθόδων αυτόματης επιλογής μεγέθους παραθύρου, οπότε η σύγκριση πρέπει να λάβει χώρα σε ένα μεγάλο πλήθος σημείων, στα οποία θα γίνει αυτόματη συνταύτιση με διαφορετικές μεθόδους επιλογής μεγέθους παραθύρου, ξεκινώντας όμως από τις ίδιες αρχικές τιμές. Η απόκλιση των αποτελεσμάτων από τις αληθείς τιμές θα αξιολογηθεί ώστε να επιλεγεί η καταλληλότερη μέθοδος δυναμικού υπολογισμού μεγέθους παραθύρου στην γενική περίπτωση.

Υπενθυμίζεται ότι το μέγεθος παραθύρου πρέπει να είναι όσο γίνεται πιο μικρό για να μπορεί ο αφινικός μετασχηματισμός να προσεγγίσει τον προβολικό (ο οποίος, αν και ορθότερος, είναι πολυπλοκότερος), αλλά και αρκετά μεγάλο ώστε να έχει αρκετή πληροφορία και να επιτρέπει μεγάλη ακτίνα σύγκλισης, ένα ιδιαίτερα επιθυμητό χαρακτηριστικό.

Τα σημεία τα οποία θα χρησιμοποιηθούν για τον εν λόγω έλεγχο είναι κορυφές ενός κανάβου 10x10 m. Οι γεωδαιτικές συντεταγμένες αυτών των σημείων βρίσκονται στο κοινό επικαλυπτομένο των δύο τεχνητών φωτογραφιών και το υψόμετρό τους υπολογίστηκε με βάση το μαθηματικό μοντέλο του ΨΜΕ. Έτσι, τα σημεία ελέγχου ήταν 45271. Εν συνεχεία με χρήση των προσανατολισμών υπολογίστηκαν οι αρχικές τιμές αυτών των σημείων στην δεξιά και αριστερή εικόνα. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το εικονιστικό περιεχόμενο αυτών των σημείων είναι εντελώς τυχαίο και δεν μπορεί κανείς να ισχυριστεί ότι είναι "καλά" ή "κακά" σημεία για συνταύτιση.

Στις αρχικές αυτές τιμές προστέθηκαν τυχαία σφάλματα με κατανομή κατά Gauss, ώστε να προσεγγιστούν κατά το δυνατόν οι πραγματικές συνθήκες εφαρμογής του αλγορίθμου και να ελεγχθεί παράλληλα η ακτίνα σύγκλισης που επιτρέπουν οι εν λόγω τεχνικές. Τα στατιστικά μεγέθη των τυχαίων σφαλμάτων που τελικά χρησιμοποιήθηκαν φαίνονται στον πίνακα 4.3. Σε μερικές περιπτώσεις η απόκλιση από την σωστή τιμή είναι 6 εικονοστοιχεία, τιμή πολύ μεγάλη για να διορθωθεί από την ελαχιστοτετραγωνική συνταύτιση. Η καλύτερη δυνατή αντιμετώπιση είναι η απόρριψη του σημείου από τα ελάχιστα τετράγωνα. Διαφορετικά θα επιστρέψει κάποιο σημείο με απόκλιση μεγαλύτερη από την 1.10 και θα θεωρηθεί ως αστοχία.

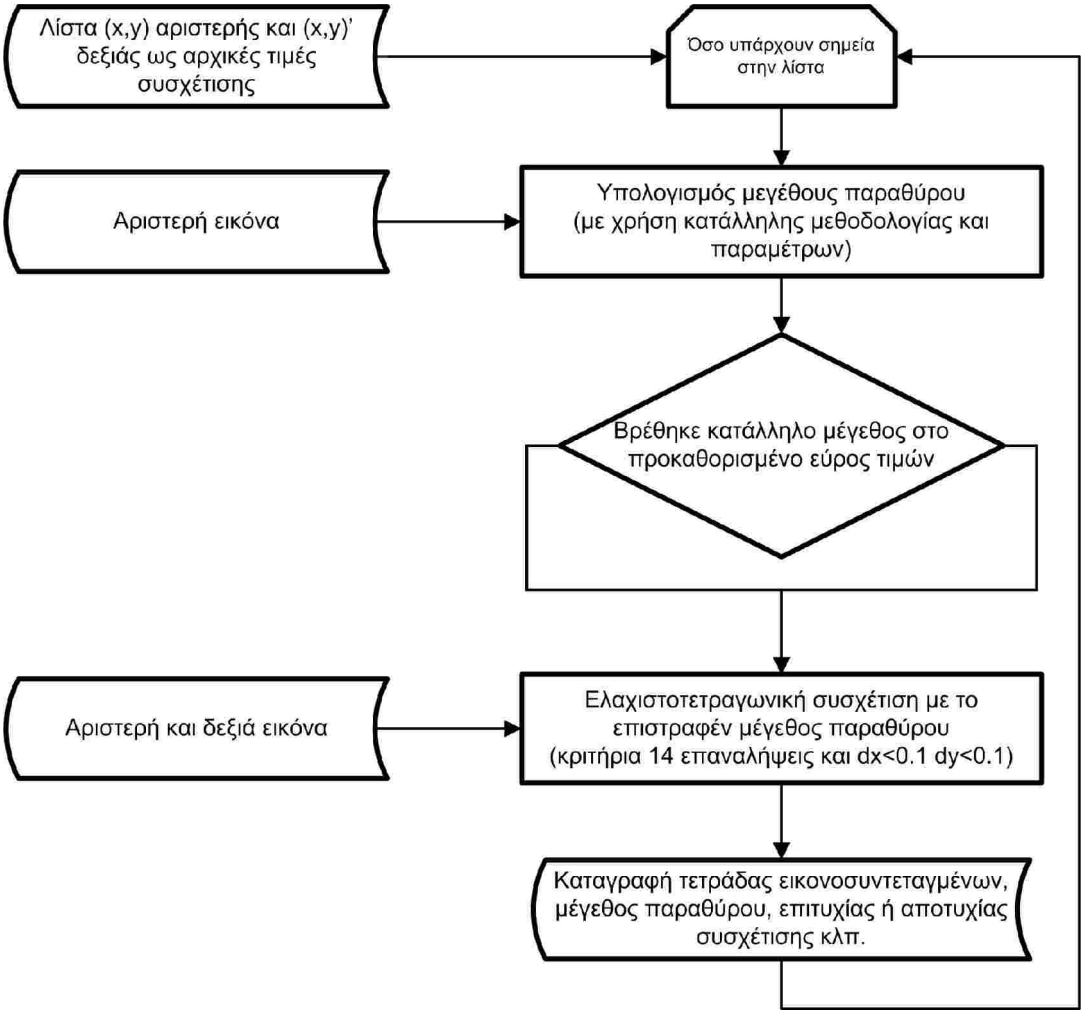
	X [pixel]	Y [pixel]
Ελάχιστο	-6.33	-2.17
Μέγιστο	6.28	2.20
Μέση τιμή	0.005	-0.001
Τυπικό σφάλμα	1.50	0.50
Κατανομή		

Πίνακας 4.4. Στατιστικά μεγέθη τυχαίων σφαλμάτων που συμπεριλήφθηκαν στις αρχικές τιμές.

Η τιμή απόκλισης των 6 εικονοστοιχείων από την αληθή θέση είναι μεγαλύτερη από τις τιμές που μπορεί γενικά να αντιμετωπίσει ο αλγόριθμος. Στην συγκεκριμένη περίπτωση φωτογραφιών παράλλαξη x 6 εικονοστοιχείων ισοδυναμεί με υψομετρική διαφορά 2.46 m. Στην στρατηγική με χρήση πυραμίδων, η απόκλιση δεν αναμένεται να είναι μεγαλύτερη από 2-4 εικονοστοιχεία (λόγω του τρόπου δημιουργίας των πυραμίδων και της ακρίβειας των τελεστών συνταύτισης), ενώ στην περίπτωση των Otto-Chau συνήθεις τιμές πυκνότητας διατεταγμένων σημείων είναι 5-20 εικονοστοιχεία. Στην περίπτωση της χαμηλής πυκνότητας σημείων ανά 20 εικονοστοιχεία, που ισοδυναμούν με απόσταση 5.04 m στο έδαφος, η κλίση

είναι 49%. Άρα καλύπτονται περιπτώσεις κλίσης εδάφους μέχρι 49% με την απόκλιση των 6 εικονοστοχείων.

Επίσης η κατά y απόκλιση των 2.2 εικονοστοιχείων (περίπου 46μm) είναι ρεαλιστική, αφού η ακρίβεια που έχει ο σχετικός προσανατολισμός είναι γενικά της τάξης 0.5 εικονοστοιχείων (περίπου 10μm).



Σχήμα 4.3. Διάγραμμα λειτουργίας πυρήνα ελαχιστοτετραγωνικής συνταύτισης.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η σύγκριση εδώ δεν γίνεται μεταξύ ΨΜΕ, όπου μοιραία υπάρχει και σφάλμα παρεμβολής, αλλά απευθείας στα σημεία. Στις περιπτώσεις ανάλογων μετρήσεων με πραγματικά δεδομένα η σύγκριση γίνεται με ΨΜΕ αναφοράς (χειρωνακτικά συλλεχθέν) με πιθανά προβλήματα ορθότητας και αξιοπιστίας που αναφέρθηκαν παραπάνω, ενώ ταυτόχρονα υπεισέρχεται το σφάλμα παρεμβολής αφού το ΨΜΕ συλλέγεται δειγματοληπτικά.

4.2.4.2. Ελαχιστοτετραγωνική συνταύτιση.

Μετά την δημιουργία της λίστας των αρχικών τιμών, που είναι ίδια για κάθε μέθοδο ώστε η σύγκριση να είναι αντικειμενική, ακολουθεί η εργασία (Α) του σχήματος 4.2, που αφορά την επιλογή μεγέθους παραθύρου για κάθε σημείο της λίστας και την εφαρμογή ελαχιστοτετραγωνικής συνταύτιση (σχ. 4.3).

Με αυτή την διαδικασία καταγράφονται οι επιστρεφόμενες τιμές μεγέθους παραθύρου καθώς και η πιθανή αποτυχία του συγκεκριμένου αλγορίθμου να προτείνει μέγεθος μέσα στο προκαθορισμένο εύρος 7x7 έως 35x35. Επίσης καταγράφονται οι τελικές τιμές της συνταύτισης, το τυπικό σφάλμα της μονάδας βάρους και οι μεταβλητότητες των μεταθέσεων κατά x και y (σ_{xx}, σ_{yy}) όσο και η συμεταβλητότητά τους (σ_{xy}). Όπως φαίνεται και στο σχήμα, η συνταύτιση τελειώνει αποτυχημένα όταν μετά από 14 επαναλήψεις και κάποια ή και οι δύο διορθώσεις κατά x και y είναι μεγαλύτερες από 0.1 εικονοστοιχεία. Επιπολική γεωμετρία δεν χρησιμοποιείται οπότε η λύση κινείται ελεύθερα και στους δύο άξονες.

Εκτός από τις τρεις προτεινόμενες μεθόδους με διαφορετικές παραμέτρους, υπολογίστηκαν όλα τα σημεία με σταθερά παράθυρα, ώστε να γίνει σύγκριση με τα υπάρχοντα συστήματα που χρησιμοποιούν σταθερό μέγεθος παραθύρου για όλο το μοντέλο. Συνολικά οι εικόνες συσχετίστηκαν αυτόματα 48 φορές με τις παρακάτω παραμέτρους, που αφορούν αποκλειστικά και μόνο την μέθοδο δυναμικής επιλογής μεγέθους παραθύρου (πιν. 4.4).

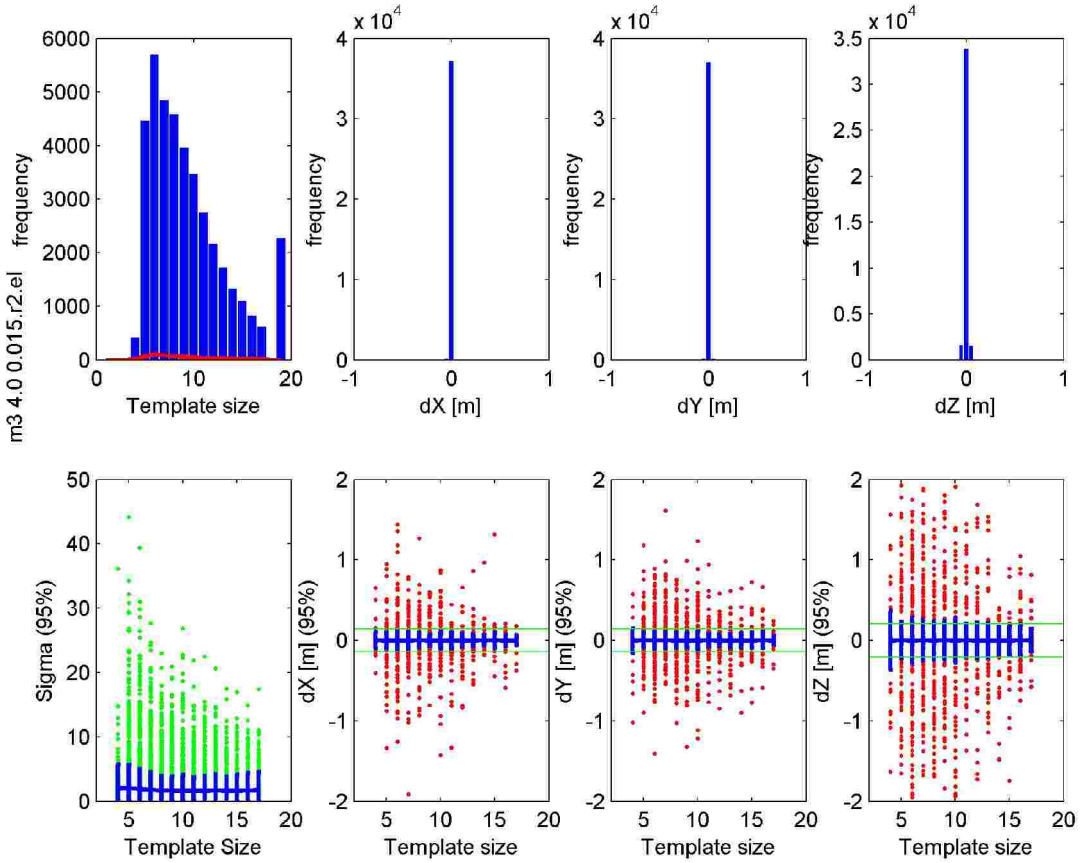
	Στατιστική ανάλυση (Σ)		**Μέθοδος Förstner (F)**		**Εντροπία (Ε)**		**Σταθερό παράθυρο**
α/α	Τυπική απόκλιση	Διαφορά εύρους με τον μέσο όρο	w	q	Κατώφλι εντροπίας	Ελάχιστη βελτίωση εντροπίας	
1	30	40	0.5	0.5	3.5	0.005	7x7
2	25	40	1.0	0.5	4.0	0.005	9x9
3	20	40	1.5	0.5	4.5	0.005	11x11
4	15	40	0.5	0.675	3.5	0.010	13x13
5	30	30	1.0	0.675	4.0	0.010	15x15
6	25	30	1.5	0.675	4.5	0.010	17x17
7	20	30	0.5	0.75	3.5	0.015	19x19
8	15	30	1.0	0.75	4.0	0.015	21x21
9			1.5	0.75	4.5	0.015	23x23
10			Συνδυαστική		3.5	0.020	25x25
11					4.0	0.020	27x27
12					4.5	0.020	29x29
13					3.5	0.025	31x31
14					4.0	0.025	33x33
15					4.5	0.025	35x35

Πίνακας 4.5. Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στον έλεγχο των μεθόδων δυναμικής επιλογής μεγέθους παραθύρου.

Μετά την αυτόματη συνταύτιση από την οποία προέκυψαν νέα ζευγάρια εικονοσυντεταγμένων, υπολογίζονται εκ νέου με εμπροσθοτομία οι γεωδαιτικές συντεταγμένες των σημείων. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι και σε αυτή την φάση δεν γίνεται κανένας έλεγχος παράλλαξης, που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για να απορρίψει σημεία που έχουν μεγάλη παράλλαξη y ή μεγάλη παράλλαξη x σε σχέση με τα γειτονικά τους. Έτσι δεν χρησιμοποιείται καμία πρόσθετη πληροφορία, καθιστώντας τα δεδομένα πρωτογενή και ιδιαίτερα ευάλωτα σε σφάλματα.

4.2.4.3. Αξιολόγηση και περιγραφή μεγεθών ελέγχου

Τα τελικά αποτελέσματα για κάθε πειραματική μέθοδο είναι μία νέα λίστα γεωδαιτικών συντεταγμένων για όλα τα αρχικά σημεία (ελέγχου), στην οποία συμπεριλαμβάνονται επίσης στοιχεία όπως το μέγεθος παραθύρου που επιστράφηκε από τον αλγόριθμο, η επιτυχία ή αποτυχία απόδοσης μεγέθους και η εν συνεχεία απόρριψη, το aprosteriori σφάλμα της συνταύτισης, η αποτυχία σύγκλισης της ελαχιστοτετραγωνικής συνταύτισης κ.λπ. Τα βασικά στοιχεία εξ αυτών ομαδοποιήθηκαν στους πίνακες 4.5 και 4.6. Για κάθε πειραματική μέθοδο, δημιουργήθηκε ένα συνοπτικό διάγραμμα (παράδειγμα το σχ. 4.4) με οπτικοποιημένα τα αποτελέσματα για κάθε μέγεθος παραθύρου που επιστρέφουν. Το σύνολο των διαγραμμάτων επισυνάπτεται στον συνοδευτικό οπτικό δίσκο.



Σχήμα 4.4. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα διαγράμματος φαίνεται η μέθοδος 8 της εντροπίας (πιν. 4.4) με σχήμα παραθύρου έλλειψη. Το πάνω αριστερά διάγραμμα παρουσιάζει την κατανομή των παραθύρων όπως επιστρέφονται από την συγκεκριμένη μέθοδο. Η τελευταία στήλη του (20) απεικονίζει το πλήθος των σημείων στα οποία δεν αποδόθηκε μέγεθος παραθύρου και δεν συνέχισε η ελαχιστοτετραγωνική συνταύτιση. Τα υπόλοιπα τρία διαγράμματα της πάνω σειράς δείχνουν την κατανομή των αποκλίσεων και στις τρείς διευθύνσεις. Το αριστερό διάγραμμα της κάτω σειράς απεικονίζει το σ της ελαχιστοτετραγωνικής συνταύτισης για όλα τα σημεία κατανεμημένα σύμφωνα με το μέγεθος του παραθύρου. Τα υπόλοιπα τρία διαγράμματα της κάτω σειράς απεικονίζουν τις διαφορές όλων των σημείων και στις τρείς διευθύνσεις, ανά μέγεθος παραθύρου. Σε αυτά με πράσινο σημειώνεται το υιοθετημένο εδώ κατώφλι αστοχίας. Σε όλα τα κάτω διαγράμματα με μπλε χρώμα σημειώνεται ο μέσος όρος και το εύρος του 95% των τιμών του κάθε περιγραφόμενου μεγέθους, ανάλογα με το μέγεθος παραθύρου.

Με αυτό τον τρόπο προκύπτουν στοιχεία για το ποσοστό απόρριψης σημείων από τον αλγόριθμο υπολογισμού μεγέθους παραθύρου, δηλαδή σημεία στα οποία ο αλγόριθμος δεν μπόρεσε να υπολογίσει κατάλληλο μέγεθος. Είναι επιθυμητό τα σημεία αυτά να είναι όσο γίνεται λιγότερα, αλλά και η κατανομή των μεγεθών που τελικά αποδόθηκαν να είναι "λογική" και κατά το δυνατόν ισοβαρής, αφού οι εικόνες έχουν ευρύτητα μορφολογικού περιεχομένου. Το πλήθος των σημείων στα οποία αποδόθηκε μέγεθος αναγράφεται στην πρώτη στήλη του πίνακα 4.6 ("Σημεία στα οποία αποδόθηκε μέγεθος παραθύρου"), ενώ το ίδιο μέγεθος αναπαριστάται στην τελευταία δεξιά απομονωμένη στήλη του αριστερά διαγράμματος του σχήματος 4.4, όπου φαίνεται η κατανομή των μεγεθών παραθύρων που προτείνει ο συγκεκριμένος αλγόριθμος. Τα υπόλοιπα διαγράμματα αφορούν το aposteriori σφάλμα ανά κατεύθυνση για όλα τα σημεία, συναρτήσει του μεγέθους του παραθύρου. Με μπλε γραμμή σημειώνεται ο μέσος όρος και με πράσινη το επίπεδο εμπιστοσύνης 95%. Με κόκκινο σημειώνονται όλα τα σημεία ανά μέγεθος που υπερβαίνουν το όριο αποδοχής.

Στα σημεία στα οποία αποδόθηκε επιτυχώς κάποιο μέγεθος παραθύρου εφαρμόστηκε η ελαχιστοτετραγωνική συνταύτιση με αρχικές τιμές οι οποίες αποκλίνουν από την αληθή θέση κατά ποσότητες που αναλύθηκαν στην παράγραφο 4.2.4.1. Τα σημεία στα οποία η συνταύτιση αποτυγχάνει

αναγράφονται στην στήλη 1 του πίνακα 4.5 και την στήλη 2 του πίνακα 4.6.

Για τα υπόλοιπα σημεία υπολογίζονται οι γεωδαιτικές συντεταγμένες τους οι οποίες συγκρίνονται με τις αληθείς τιμές των σημείων ελέγχου. Έτσι για κάθε σημείο υπολογίζονται οι διαφορές

$$(dX, dY, dZ) = (X, Y, Z)_{\text{αναφοράς}} - (X, Y, Z)_{\text{σημείου}} \tag{4.11}$$

Για αυτές τις διαφορές κατά X, Y και Z υπολογίζονται ανεξάρτητα το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMSE), ο μέσος όρος των απόλυτων διαφορών (MAD), ο μέσος όρος και η τυπική απόκλιση από τον μέσο όρο. Το χαρακτηριστικότερο μέγεθος είναι φυσικά το RMSE, που υπολογίζεται ως:

$$RMSE_X = \sqrt{\frac{\sum dX^2}{n}}\ ,\ RMSE_Y = \sqrt{\frac{\sum dY^2}{n}}\ ,\ RMSE_Z = \sqrt{\frac{\sum dZ^2}{n}} \tag{4.12}$$

όπου n το πλήθος των υπό έλεγχο σημείων.

Το RMSE αποτελεί τον βασικό δείκτη ορθότητας των σημείων σύμφωνα με το Πρότυπο Ακρίβειας Χωρικών Δεδομένων (Geospatial Accuracy Standard, FGDC, 1998). Ο μέσος όρος αναμένεται να είναι πολύ κοντά στο μηδέν εφόσον δεν υπάρχουν συστηματικά σφάλματα στα δεδομένα. Παρόμοιο μέγεθος με το RMSE είναι και το MAD που υπολογίζεται ως:

$$MAD_X = \frac{\sum |dX|}{n}\ ,\ MAD_Y = \frac{\sum |dY|}{n}\ ,\ MAD_Z = \frac{\sum |dZ|}{n} \tag{4.13}$$

όπου n το πλήθος των σημείων υπό έλεγχο.

Η οριζοντιογραφική ακρίβεια σύμφωνα με το FGDC συχνά εκφράζεται για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% και ο προσεγγιστικός της τύπος είναι (Mc Glone, 2004):

$$\text{Οριζοντιογραφική ακρίβεια} = 2.4477 \times 0.5 \times (RMSE_X + RMSE_Y) \tag{4.14}$$

Ομοίως η υψομετρική ακρίβεια υπολογίζεται ως (Mc Glone, 2004):

$$\text{Υψομετρική ακρίβεια} = 1.96 \times RMSE_Z \tag{4.15}$$

Η οριζοντιογραφική και υψομετρική ακρίβεια, όπως περιγράφονται εδώ, ουσιαστικά προσδιορίζουν την αξιοπιστία ενός συνόλου γεωγραφικών δεδομένων, αφού το 95% των μετρούμενων σημείων οφείλει να βρίσκεται εντός αυτών των ορίων. Τα RMSE στους τρεις άξονες και η οριζοντιογραφική και υψομετρική ακρίβεια των δεδομένων φαίνονται στους πίνακες 4.5 (στήλη 4 και 5) και 4.6 (στήλη 5 και 6). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα μέτρα οριζοντιογραφικής και υψομετρικής ακρίβειας κατά FGDC είναι συναρτήσεις ανάλογες των RMSE, που αποτελούν βασικό μέτρο για την αξιολόγηση γεωγραφικών δεδομένων. Στην συνέχεια με τον όρο "ακρίβεια" γίνεται αναφορά στην οριζοντιογραφική και υψομετρική ακρίβεια κατά FGDC που είναι πολλαπλάσια των RMSE και μεγεθύνουν τις όποιες διαφορές, χωρίς να χάνεται η γενικότητα ή να παραβιάζεται η σχέση ανάμεσα στα RSME των διαφορετικών μεθόδων.

Μεταξύ των δεδομένων υπάρχουν αποτελέσματα για κάποια σημεία στα οποία υπάρχουν χονδροειδή σφάλματα. Αυτό παραμένει συχνό φαινόμενο στην ελαχιστοτετραγωνική συνταύτιση. Συνήθως 10-30% των συλλεχθέντων σημείων αναμένεται να χρειάζεται διόρθωση (McGlone, 2004). Ως υποκείμενο σε χονδροειδές σφάλμα θεωρείται κάποιο σημείο όταν η διαφορά σε οποιοδήποτε άξονα από την αληθή θέση είναι μεγαλύτερη από τα όρια της συνθήκης 4.5. Τα όρια αυτά είναι αρκετά αυστηρά και γίνονται ακόμα αυστηρότερα εάν οι άξονες X και Y συγκρίνονται ξεχωριστά. Παρόλα αυτά εφόσον τα τεχνητά δεδομένα είναι ευνοϊκά, τα κριτήρια αποδοχής θα πρέπει να είναι αυστηρά και με αυτή την λογική διατηρήθηκαν.

Συνοπτικά λοιπόν η αξιολόγηση κάθε μεθόδου περιλαμβάνει τα ανεξάρτητα στατιστικά μεγέθη των διαφορών σε κάθε διεύθυνση, τα απορριφθέντα σημεία από τον αλγόριθμο υπολογισμού μεγέθους, από την ελαχιστοτετραγωνική συνταύτιση και τις αστοχίες. Παράλληλα συνοδεύεται από διάγραμμα κατανομής μεγέθους παραθύρων, διαγράμματα κατανομής σφαλμάτων, διαγράμματα σφαλμάτων ανά διεύθυνση και ανά μέγεθος παραθύρου καθώς και διάγραμμα του aposteriori σφάλματος ανά μέγεθος παραθύρου.

4.2.4.4. Ανάλυση σταθερών παραθύρων

Η πρώτη ανάλυση αφορά την συμπεριφορά της ελαχιστοτετραγωνικής συνταύτισης με παράθυρα σταθερού μεγέθους. Η συνταύτιση πραγματοποιήθηκε σε όλα τα δυνατά παράθυρα μεταξύ μεγεθών 7x7 έως και 35x35, και τα συγκεντρωτικά αριθμητικά αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα 4.5.

Σταθερό μέγεθος παραθύρου	**Σημεία που επιστράφηκαν από τον αλγόριθμο %**	**Σημεία αστοχίας #**	**Ποσοστό σωστών σημείων επί των επιστραφέ-ντων %**	**Ποσοστό σωστών σημείων επί συνόλου ελεγχθέντων %**	**RMS X,Y,Z m**	**Οριζοντιογρα-φική και υψομετρική ακρίβεια κατά FGDC m**
7x7	75.97	2630	91.57	69.57	0.51,1.11,2.02	1.98,3.96
9x9	87.07	2076	94.19	82.01	0.18,0.21,0.51	0.48,1.00
11x11	92.56	1740	95.42	88.32	0.12,0.12,0.38	0.29,0.75
13x13	95.48	1403	96.42	92.06	0.14,0.11,0.29	0.31,0.57
15x15	96.86	1070	97.31	94.26	0.06,0.07,0.16	0.15,0.31
17x17	97.78	864	97.84	95.68	0.05,0.06,0.14	0.14,0.28
19x19	98.24	719	98.21	96.49	0.05,0.05,0.13	0.12,0.25
21x21	98.54	610	98.49	97.05	0.05,0.05,0.12	0.12,0.23
23x23	98.77	554	98.63	97.42	0.04,0.04,0.11	0.10,0.21
25x25	98.91	542	98.66	97.59	0.04,0.04,0.10	0.10,0.20
27x27	98.98	**541**	**98.66**	**97.67**	0.04,0.04,0.10	0.09,0.19
29x29	99.02	590	98.54	97.58	0.04,0.04,0.09	**0.09,0.18**
31x31	99.05	653	98.39	97.46	0.04,0.04,0.09	**0.09,0.18**
33x33	**99.10**	737	98.18	97.31	0.04,0.07,0.10	0.14,0.19
35x35	99.09	883	97.83	96.94	0.04,0.04,0.10	0.10,0.19

Πίνακας 4.6. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μεθόδων σταθερού μεγέθους παραθύρου. Με έντονη γραφή οι καλύτερες τιμές. Με γκρι τα μεγέθη που δεν πληρούν τις απαιτήσεις ακρίβειας.

Η οριζοντιογραφική και υψομετρική ακρίβεια συναρτήσει του μεγέθους φαίνεται στο σχήμα 4.5. Από αυτά τα στοιχεία προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

1. Η χρήση ολοένα μεγαλύτερων παραθύρων ευνοεί την αξιοπιστία και την ακρίβεια. Το γεγονός αυτό δικαιολογεί την αδυναμία των ελαχίστων τετραγώνων να συγκλίνουν στο σωστό σημείο χωρίς πολύ καλές αρχικές τιμές. Η λίγη σχετικά πληροφορία που υπάρχει στα μικρά παράθυρα οδηγεί σε διολίσθηση και τελικά σύγκλιση σε λάθος σημεία, όπως προκύπτει και από το μεγάλο αριθμό αστοχιών. Οι αστοχίες αυτές συμβάλουν στην δυσμενή ακρίβεια των 0.48,1.00m κατά XY και Z αντίστοιχα στο μέγεθος 9x9. Όσο αυξάνει το μέγεθος η κατάσταση βελτιώνεται καθώς πλέον υπάρχει περισσότερη πληροφορία στο τετράγωνο-πρότυπο, η οποία διευκολύνει την συνταύτιση. Τα σφάλματα 1.98, 3.96m του παραθύρου 7x7 θεωρείται πολύ μεγάλη. Σχετική ανάλυση ακολουθεί στην ενότητα 4.3.2.1.

2. Η βελτίωση της σύγκλισης (σημεία που επιστράφηκαν από τον αλγόριθμο των ελαχίστων τετραγώνων) είναι σταθερή μέχρι το μέγιστο παράθυρο 35x35, παρουσιάζοντας σε αυτό μια αμελητέα κάμψη. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνει την παρατήρηση ότι η χρήση μεγάλων παραθύρων ευνοεί την σύγκλιση.

3. Η διαρκής αύξηση του παραθύρου δεν έχει νόημα, αφού δεν παρουσιάζεται γραμμικά ανάλογη βελτίωση της ακρίβειας, ενώ από ένα σημείο και μετά αρχίζει να παρατηρείται επιδείνωση. Η επιδείνωση στα πολύ μεγάλα παράθυρα οφείλεται στο γεγονός ότι ο αφινικός μετασχηματισμός δεν επαρκεί για να καλύψει τις γεωμετρικές διαφορές που γίνονται πιο έντονες καθώς αυξάνει το μέγεθος και οδηγεί σε μείωση της ακρίβειας. Κατά συνέπεια η χρήση πολύ μεγάλων παραθύρων ευνοεί την σύγκλιση αλλά όχι και την ακρίβεια. Η ακρίβεια της συνθήκης 4.5 ικανοποιείται ως προς RMSE από το μέγεθος 15x15, ενώ κατά FGDC από το παράθυρο 23x23 και μετά. Τα μεγέθη όμως της ακρίβειας αποτελούν κατώφλια που ανάλογα με την εφαρμογή διαφέρουν και μικρή μεταβολή τους μπορεί να επιφέρει μείωση των παραπάνω παραθύρων. Η βελτίωση της ακρίβειας σταματά ουσιαστικά από τα μεγέθη 15-17 και μετά.

4. Αναστροφή των αποτελεσμάτων παρατηρείται για όλα τα αριθμητικά μεγέθη πλην της σύγκλισης. Μέχρι την τιμή 27x27 παρατηρείται μείωση των αστοχιών, ενώ πέρα από το 31x31 αύξηση. Το μέγεθος αυτό είναι σημαντικό αφού περιγράφει πόσα σημεία χρειάζονται διόρθωση από χειριστή. Το ίδιο ισχύει και για τα συνολικά ορθά σημεία επί του συνόλου των ελεγχθέντων (41079) σημείων. Το 97.67% του συνόλου των ελεγχθέντων σημείων βρίσκεται εντός των ορίων ακρίβειας και μόνο το 1.34% των σημείων χρειάζεται διόρθωση από χειριστή.

5. Η καλύτερη ακρίβεια παρατηρείται στα μεγέθη 29x29 και 31x31 (0.09, 0.18 m κατά XY και Z αντίστοιχα). Η ακρίβεια αυτή είναι σημαντικά καλύτερη κατά X και Y της προσδοκώμενης (0.14, 0.14, 0.21 m).

6. Το καταλληλότερο μέγεθος παραθύρου για το συγκεκριμένο ζευγάρι (κλίμακα και περιεχόμενο), όπως φαίνεται και από τα διαγράμματα (σχήματα 4.5 και 4.6), είναι το 27x27, γιατί αποτελεί την χρυσή τομή ανάμεσα στο πλήθος ορθών σημείων, σφαλμάτων που εμπεριέχονται στα τελικά αποτελέσματα και ακρίβειας (0.09,0.19m). Η τελευταία μπορεί να μην είναι η βέλτιστη του πίνακα, αλλά είναι πρακτικά εφάμιλλή της. Το ίδιο συμπέρασμα προκύπτει και από το διάγραμμα του σχήματος 4.6 όπου οι σχετικές καμπύλες αρχίζουν και αποκλίνουν. Το γεγονός αυτό σημαίνει ότι παρόλο που ο αλγόριθμος συγκλίνει και επιστρέφει περισσότερα σημεία, τα σωστά σημεία δεν αυξάνουν αναλογικά, άρα αυξάνουν οι αστοχίες.

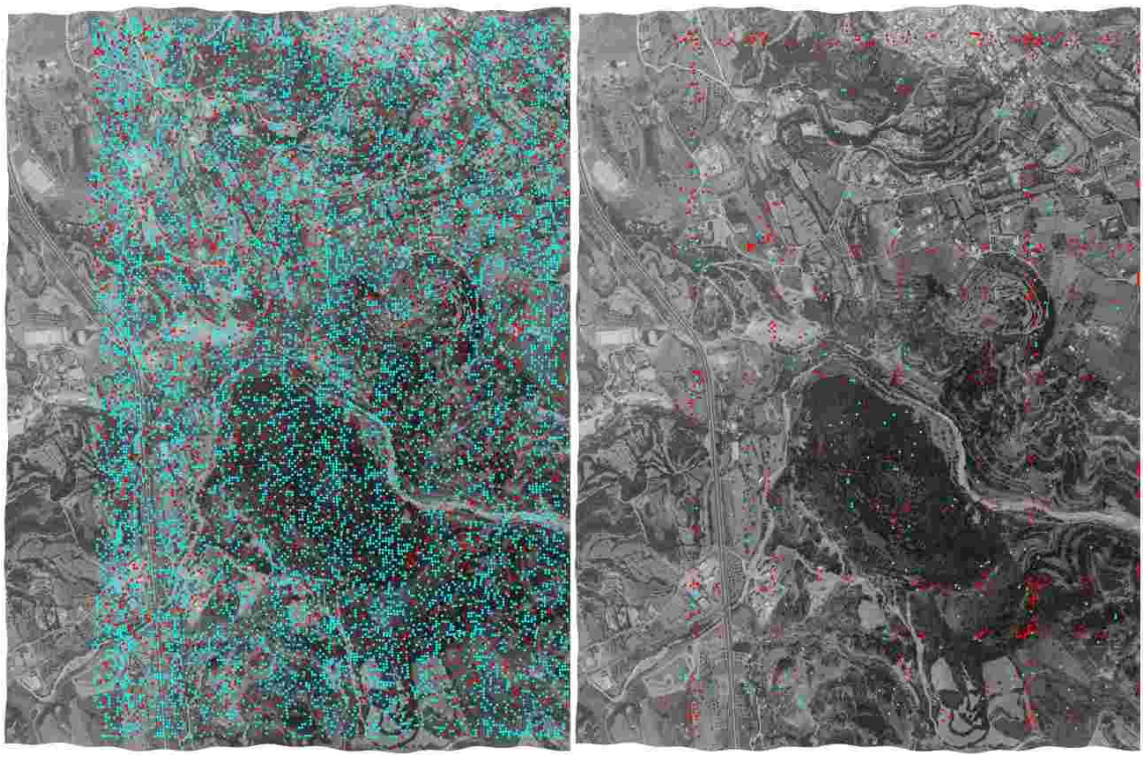
7. Η υψομετρική ακρίβεια είναι σταθερά διπλάσια της οριζοντιογραφικής. Το γεγονός αυτό συμφωνεί με τον Krauss (1997). Από τα πειραματικά δεδομένα επίσης προκύπτει ότι η ακρίβεια κατά Y, όπως αυτή εκφράζεται από το RMSE, είναι λίγο κατώτερη από την αντίστοιχη κατά X. Αυτό ενδεχομένως να οφείλεται στην συνόρθωση της εμπροσθοτομίας, όπου μέσω της παράλλαξης x υπολογίζεται και το υψόμετρο του σημείου, γεγονός που "μοιράζει" και ομαλοποιεί την κατά x απόκλιση στις X και Z διευθύνσεις.

8. Η ελαχιστοτετραγωνική συνταύτιση σε τυχαία σημεία και με δυσμενείς αρχικές τιμές καλύπτει τα όρια της αναμενόμενης ακρίβειας για την δεδομένη κλίμακα, ενώ ταυτόχρονα το ποσοστό αστοχιών της μένει σε πάρα πολύ χαμηλό επίπεδο, εφόσον όμως χρησιμοποιείται κατάλληλο μέγεθος παραθύρου. Το συμπέρασμα αυτό είναι ιδιαιτέρως θετικό για την συνταύτιση, αφού με δυσμενείς αρχικές τιμές και χωρίς χρήση σημείων ενδιαφέροντος καταφέρνει να έχει ακρίβεια εντός των αναμενόμενων ορίων, υψηλό ποσοστό επιστρεφόμενων σημείων (δημιουργώντας ένα πυκνό πλέγμα) και πολύ λίγα σημεία για διόρθωση (1.33% επί των επιστραφέντων σημείων). Η ευνοϊκή για την περίσταση χρήση τεχνητών δεδομένων εξισορροπείται από τα αυστήρα κατώφλια αστοχιών.

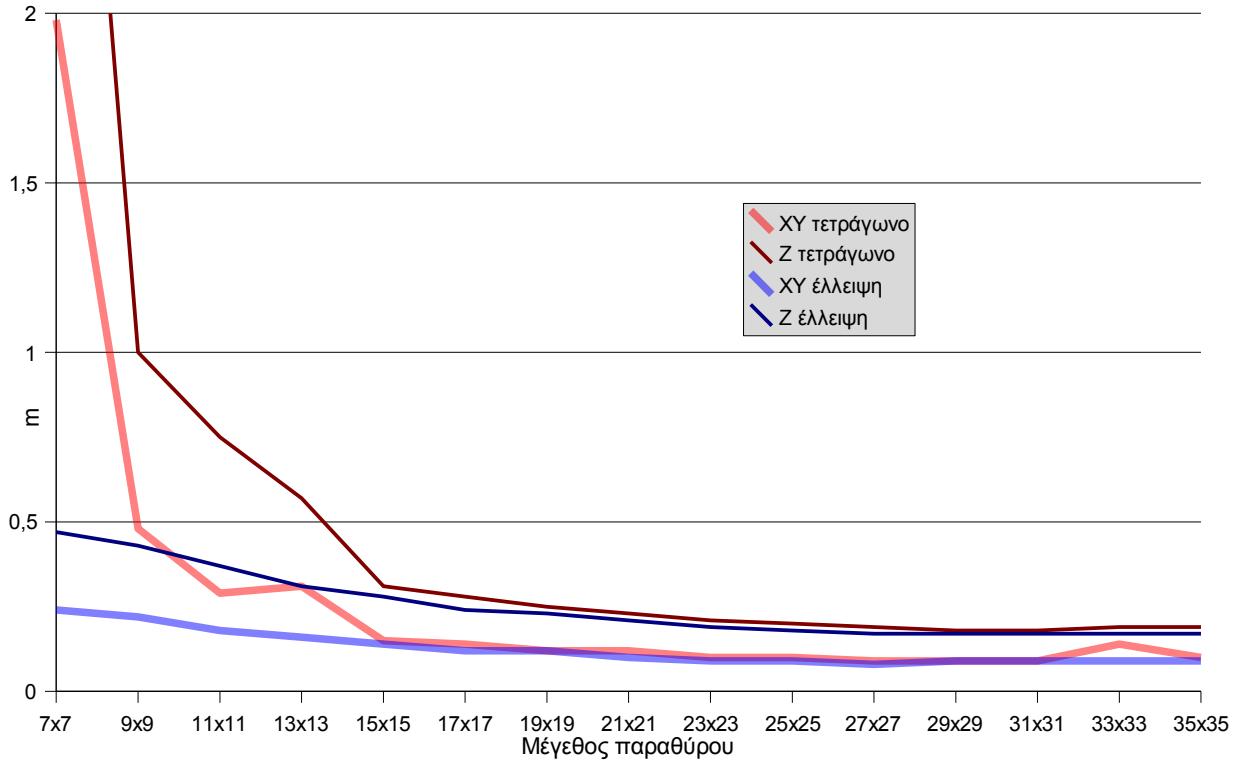
Βέβαια, το συμπέρασμα του καταλληλότερου μεγέθους δεν μπορεί να γενικευτεί σε όλες τις φωτογραφίες (χρήση παραθύρων 27x27 σε κάθε είδους φωτογραφίες) γιατί δεν εξασφαλίζει ότι τα αποτελέσματα θα είναι τα βέλτιστα δυνατά. Επίσης δεν είναι δυνατόν να γενικευτεί το συμπέρασμα ότι το καταλληλότερο παράθυρο για όλα τα σημεία που χρησιμοποιήθηκαν στον έλεγχο είναι το 27x27. Το γενικό συμπέρασμα που μπορεί να προκύψει είναι ότι το παράθυρο 27x27 ταιριάζει καλύτερα στην πλειοψηφία των σημείων αυτής της εικόνας.

Γενικά λοιπόν επιβεβαιώνεται η θέση του Lue et al. (1992) ότι η αξιοπιστία του αλγορίθμου αυξάνει καθώς μεγαλώνει το μέγεθος παραθύρου, αλλά στην περίπτωση χρήσης μεγάλων μεγεθών η ακρίβεια επιδεινώνεται, ενώ μπορεί να αποτύχει και τελείως ανάλογα με τις τοπικές γεωμετρικές παραμορφώσεις. Απλός οπτικός έλεγχος (εικόνα 1.4) των αστοχιών επί των εικόνων αποκαλύπτει ότι αυτές συμβαίνουν κυρίως σε περιοχές με έντονη κλίση, που σε συνδυασμό με δυσμενή γωνία θέασης και ομοιόμορφους τόνους του γκρι οδηγούν τον αλγόριθμο σε αστοχία κυρίως λόγω γεωμετρικής αδυναμίας.

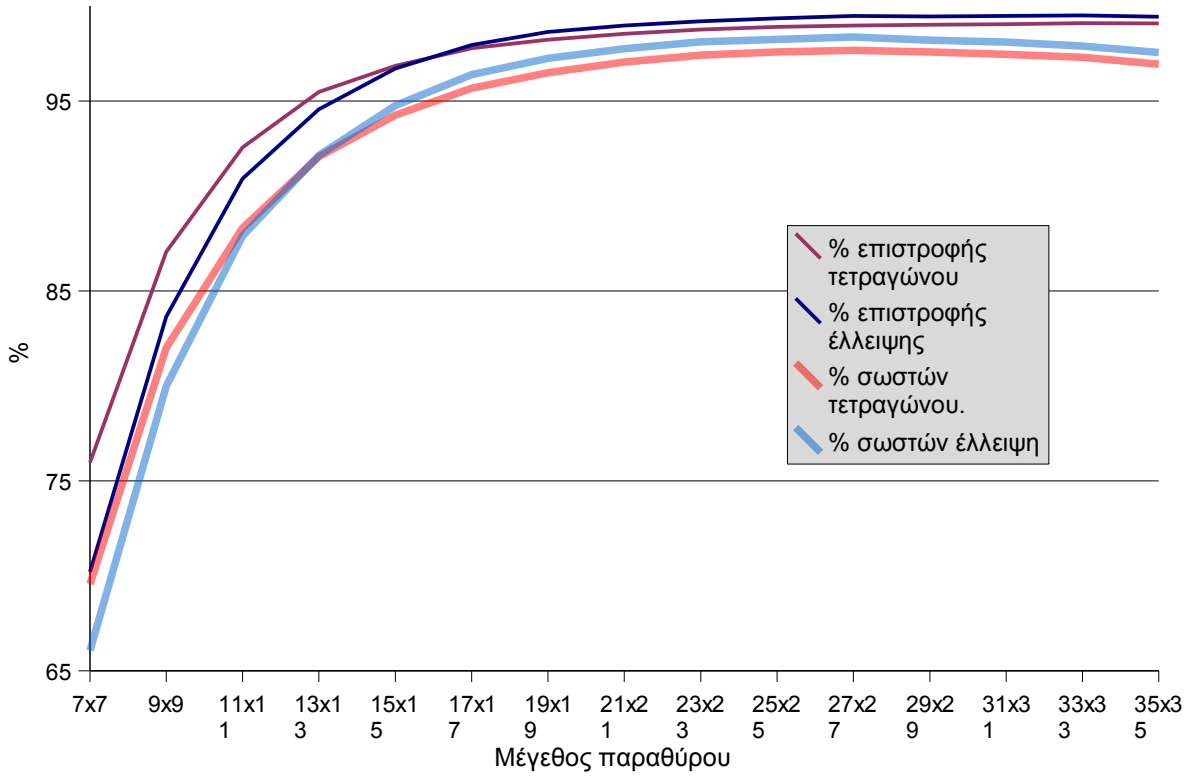
Η εκ των προτέρων σωστή επιλογή του συγκεκριμένου μεγέθους από χειριστή ενός ψηφιακού φωτογραμμετρικού οργάνου είναι μάλλον απίθανη, αφού το μέγεθος 27x27 θεωρείται μεγάλο και δεν προτείνεται από το λογισμικό. Όμως οι μικρές διαφορές μεταξύ μεγεθών 23x23 έως και 33x33 εξασφαλίζουν ικανοποιητικό εύρος για ασφαλή επιλογή μεγέθους. Το πρόβλημα που παραμένει είναι πως μπορεί ο χειριστής να γνωρίζει ποιο είναι αυτό το εύρος ή ακόμα καλύτερα ποια είναι η καλύτερη τιμή. Σε αυτό το πρόβλημα καλούνται να δώσουν απάντηση οι παρακάτω μέθοδοι.



Εικόνα 4.4. Σημεία επί της αριστερής φωτογραφίας, που δεν συνέκλιναν (ανοιχτό μπλε) και σημεία αστοχίας (κόκκινο) με παράθυρο 7x7 και 35x35 αντίστοιχα. Οι αστοχίες (βλ. εικ.4.1 και σχ.4.7) στην περίπτωση του παραθύρου 35x35, εντοπίζονται στις περιοχές έντονης κλίσης του ΨΜΕ. Όσα σημεία από τον κάνναβο των 10m δεν απεικονίζονται είναι σωστά.



Σχήμα 4.5. Ανάλυση οριζοντιογραφικού και υψομετρικού σφάλματος κατά FGDC σε σχέση με το αυξανόμενο μέγεθος παραθύρου. Οι ανωμαλίες που παρατηρούνται στις τιμές 13x13 και 33x33 στο τετράγωνο αποδίδονται σε εγγενή αδυναμία της πειραματικής μεθόδου



Σχήμα 4.6. Διάγραμμα πλήθους σημείων που συνέκλιναν, σημείων εξ αυτών που είναι ορθά και ορθών σημείων επί του συνόλου των σημείων ελέγχου.

4.2.4.5. Ανάλυση – Σύγκριση αποτελεσμάτων μεθόδων δυναμικής επιλογής μεγέθους

Τα συνοπτικά αριθμητικά αποτελέσματα της εφαρμογής της διαδικασίας ελέγχου με διαφορετικές παραμέτρους και μεθόδους δυναμικού υπολογισμού μεγέθους παραθύρου παρουσιάζονται στον πίνακα 4.6.

Μέθοδος	Σημεία στα οποία αποδόθηκε μέγεθος παραθύρου %	Σημεία που επιστράφηκαν από τον αλγόριθμο %	Σημεία αστοχίας #	Ποσοστό σωστών σημείων επί συνόλου ελεγχθέντων %	RMS X,Y,Z m	Οριζοντιογραφική και υψομετρική ακρίβεια κατά FGDC m
Σ1	60.15	57.92	550	56.58	0.10,0.15,0.39	0.31,0.77
Σ2	64.16	61.77	591	60.33	0.14,0.15,0.42	0.36,0.82
Σ3	70.65	67.89	661	66.28	0.15,0.15,0.42	**0.37,0.82**
Σ4	79.70	75.90	799	73.95	0.14,0.15,0.40	0.35,0.78
Σ5	62.55	60.05	598	58.60	0.10,0.15,0.39	0.31,0.76
Σ6	66.33	63.73	631	62.20	0.14,0.15,0.41	0.35,0.81
Σ7	72.54	69.65	698	67.95	0.15,0.15,0.41	0.36,0.81
Σ8	80.42	76.57	815	74.59	0.14,0.15,0.40	0.35,0.78
E1	96.51	88.75	1369	85.42	0.13,0.14,0.30	0.32,0.58
E2	83.68	82.03	623	80.51	0.06,0.07,0.18	0.16,0.35
E3	**52.21**	**51.43**	**315**	**50.66**	**0.04,0.04,0.10**	**0.10,0.20**
E4	98.46	90.50	1414	87.06	0.13,0.14,0.30	0.32,0.58
E5	90.73	88.74	713	87.00	0.13,0.08,0.26	0.26,0.52
E6	69.98	68.79	457	67.68	0.14,0.06,0.24	0.25,0.48
E7	99.26	91.16	1444	87.64	0.13,0.14,0.30	0.32,0.59
E8	94.43	92.20	792	90.27	0.13,0.08,0.26	0.26,0.51
E9	80.36	78.90	590	77.46	0.13,0.06,0.24	0.24,0.46
E10	99.58	91.32	1480	87.72	0.13,0.14,0.30	0.32,0.59
E11	96.46	93.98	845	91.92	0.13,0.08,0.26	0.26,0.51
E12	86.86	85.09	651	83.51	0.13,0.06,0.23	0.23,0.45
E13	**99.78**	91.40	**1502**	87.75	0.13,0.14,0.30	0.32,0.59
E14	97.76	95.06	888	92.90	0.13,0.08,0.26	0.26,0.51
E15	91.38	89.33	718	87.58	0.13,0.06,0.23	0.23,0.45
F1	99.77	93.48	1330	90.24	0.17,0.15,0.46	0.40,0.89
F2	99.53	**97.37**	766	**95.51**	0.07,0.06,0.18	0.16,0.34
F3	93.74	92.40	626	90.87	0.04,0.04,0.10	0.10,0.21
F4	99.34	93.83	1240	90.81	0.15,0.12,0.43	0.32,0.84
F5	98.76	96.76	765	94.90	0.07,0.06,0.17	0.16,0.34
F6	86.37	85.15	610	83.67	0.04,0.04,0.11	0.11,0.21
F7	98.94	94.02	1188	91.12	0.15,0.11,0.42	0.32,0.83
F8	97.96	96.01	726	94.25	0.05,0.05,0.12	0.12,0.24
F9	79.99	78.87	589	77.44	0.04,0.04,0.11	0.10,0.21
F10	94.90	93.43	637	91.88	0.04,0.05,0.11	0.11,0.22

Πίνακας 4.7. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μεθόδων δυναμικής επιλογής μεγέθους παραθύρου. Με έντονη γραφή σημειώνονται τα μέγιστα και ελάχιστα ανά στήλη. Με γκρι οι αλγόριθμοι που δεν πληρούν τις απαιτήσεις ακρίβειας. Αναλυτικά στοιχεία στο παράρτημα Β.

Αξιολογώντας και σχολιάζοντας τα μέγιστα και ελάχιστα σε κάθε στήλη, προκύπτουν τα εξής:

1. Το μέγιστο πλήθος σημείων στα οποία αποδόθηκε μέγεθος παραθύρου ανήκει στην μέθοδο Ε13

και το ελάχιστο στην E3. Αμφότερες αφορούν την μέθοδο εντροπίας, αλλά με διαφορετικές παραμέτρους (πιν. 4.4). Η μέθοδος E13 χρησιμοποιεί ως κατώφλι εντροπίας 3.5 και σαν ελάχιστη βελτίωση της εντροπίας για τερματισμό του ελέγχου την τιμή 0.025. Άρα οι συνθήκες για να γίνει το υπό έλεγχο παράθυρο δεκτό είναι πολύ χαλαρές, αφού το 3.5 είναι το ελάχιστο μέγεθος εντροπίας που χρησιμοποιήθηκε στην μελέτη, ενώ αντίστοιχα η ποσότητα 0.025 μέγιστη. Κατά συνέπεια εύκολα τερματίζεται ο έλεγχος και επιστρέφεται το ζητούμενο παράθυρο. Τον έλεγχο αυτό περνούν πολλά σημεία. Κατά αντιστοιχία, στη μέθοδο E3 οι παράμετροι 4.5 και 0.005 είναι το μέγιστο και ελάχιστο που χρησιμοποιήθηκαν και ως εκ τούτου παρουσιάζουν ακριβώς τα αντίθετα αποτελέσματα: πολύ δύσκολα κάποιο σημείο καλύπτει αυτές τις συνθήκες, οπότε λίγα σημεία επιστρέφονται από τον αλγόριθμο.

2. Το μεγαλύτερο ποσοστό σύγκλισης εμφανίζεται με την μέθοδο F2 και το μικρότερο με την E13. Από τον πίνακα 4.4 προκύπτει ότι η μέθοδος F2 έχει παραμέτρους w και q 1.00 και 0.50 αντίστοιχα. Αυτό σημαίνει ότι για να γίνει αποδεκτό κάποιο μέγεθος παραθύρου θα πρέπει να ικανοποιούνται μετρίως η συνθήκη έντασης και χαλαρά η συνθήκη ελλειπτικότητας. Οι συνθήκες αυτές ικανοποιούνται για μεγάλο πλήθος σημείων (99.53% με κατανομή μεγεθών παραθύρων σχεδόν κατά Gauss) και παράλληλα αποτελούν καλά σημεία, με αρκετό περιεχόμενο (σύμφωνα με την λογική του Förstner) για σύγκλιση, με αποτέλεσμα να συγκλίνουν το 97.37% των αρχικών σημείων. Οι αστοχίες της συγκεκριμένης μεθόδου δεν είναι ιδιαίτερα πολλές με αποτέλεσμα να έχει καλή επίδοση και στα σημεία που είναι εντός ορίων (95.51%). Δυστυχώς δεν παρουσιάζει (συγκριτικά) ακρίβεια αντίστοιχη με τα υπόλοιπα καλά χαρακτηριστικά, παρόλο που σε απόλυτα μεγέθη είναι ικανοποιητική. Η μέθοδος στην οποία δεν συγκλίνουν τα περισσότερα σημεία είναι εκείνη η οποία απέδωσε μέγεθος στα περισσότερα σημεία. Η απόρριψη των περισσοτέρων σημείων από την ελαχιστοτετραγωνική συνταύτιση σημαίνει ότι πολλά σημεία από αυτά δεν είχαν αρκετή πληροφορία για σύγκλιση. Η υπόθεση αυτή επιβεβαιώνεται και από το μικρό ποσοστό ορθών σημείων από τα συσχετισθέντα, όπως και από την χαμηλή τελική ακρίβεια (0.32, 0.59 m).

3. Η μέθοδος με το μεγαλύτερο ποσοστό σημείων εντός ορίων ακρίβειας είναι η E3 και με το μικρότερο η E13. Και στις δύο περιπτώσεις τα ποσοστά είναι αντιστρόφως ανάλογα του πλήθους σημείων στα οποία αποδόθηκε μέγεθος παραθύρου. Η αυστηρότητα και η ευκολία αντίστοιχα με την οποία αντιμετωπίστηκαν τα σημεία όταν περνούσαν τον έλεγχο μεγέθους παραθύρου οδηγεί σε αυτό το αποτέλεσμα. Τα παράθυρα της πιο αυστηρής E3 έχουν αρκετή πληροφορία και κατά συνέπεια συγκλίνουν στο σωστό σημείο (γεγονός που επιβεβαιώνεται με την καλύτερη ακρίβεια στον πίνακα), ενώ τα προτεινόμενα παράθυρα από την E13 που δεν έχουν αρκετή πληροφορία δεν συγκλίνουν σωστά και είναι σημαντικά εκτός ορίων αποδεκτής ακρίβειας.

4. Οι μέθοδοι με ελάχιστο και μέγιστο ποσοστό ορθών σημείων επί του συνόλου των 41079 σημείων ελέγχου είναι οι E3 και F2 αντίστοιχα. Για την μέθοδο E3 κύριος λόγος για το μικρό ποσοστό είναι η αυστηρή μέθοδος ανάθεσης μεγέθους παραθύρου, αποδίδοντας μεγέθη μόνο σε 52.21% των σημείων ελέγχου. Η μέθοδος F2 (με παραμέτρους w και q 1.0 και 0.5 αντίστοιχα) παρουσιάζει το μεγαλύτερο ποσοστό ορθών σημείων, το οποίο επιτυγχάνεται κυρίως λόγω του μεγάλου ποσοστού ανάθεσης μεγέθους παραθύρων. Τελικώς όμως τα σημεία αυτά παρουσιάζουν χαμηλή ακρίβεια (0.16, 0.34 m).

5. Οπτικός έλεγχος που έγινε σε όλες τις περιπτώσεις που εμφανίζουν μέγιστο ή ελάχιστο, δεν έδειξε κάποια σημαντική συνταύτιση ανάμεσα σε χαρακτηριστικά εδάφους και αριθμητικά δεδομένα, πέρα της αναμενόμενης από τον αντίστοιχο έλεγχο στα σταθερά μεγέθη παραθύρων και συγκεκριμένα με το 35x35 (εικόνα 4.4).

6. Η μέθοδος E3 και ο λόγος για τον οποίο παρουσιάζει την καλύτερη ακρίβεια αναλύεται παραπάνω. Θα πρέπει να σημειωθεί όμως ότι ανάλογη ακρίβεια παρουσιάζουν και οι μέθοδοι F3 (0.10, 0.21 m), F6 (0.11, 0.21 m) και F9 (0.10, 0.21 m), οι οποίες παράλληλα παρουσιάζουν σαφώς καλύτερα λοιπά χαρακτηριστικά.

Στην τελευταία αυτή παρατήρηση στηρίζεται και η τελική επιλογή μεθοδολογίας δυναμικού υπολογισμού μεγέθους παραθύρου. Κατά σειρά σημαντικότητας, τα κριτήρια επιλογής μεθόδου είναι η ακρίβεια, το ποσοστό ορθών σημείων επί του συνόλου σημείων ελέγχου (ώστε να περιγράφεται καλύτερα η επιφάνεια) και το μέγιστο ποσοστό ορθών σημείων επί των υπολογισθέντων (ώστε να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη η παρέμβαση από τον χειριστή). Η μέθοδος που συνδυάζει καλύτερα τα παραπάνω κριτήρια είναι η F3. Η ακρίβειά της είναι εφάμιλλη της βέλτιστης, το ποσοστό ορθών σημείων είναι το καλύτερο ανάμεσα σε εκείνες εφάμιλλης ακρίβειας, ενώ τα απορριφθέντα σημεία είναι μόνο το 1.64%

των σημείων της συνταύτισης.

Μερικές γενικότερες παρατηρήσεις που προκύπτουν από τον πίνακα 4.6 είναι:

1. Η μέθοδος Förstner, της οποίας τα οπτικοποιημένα της αποτελέσματα (ενότητα 3.1.6.4) ήταν ιδιόμορφα και δεν είχαν σαφή αντιστοίχηση με τις ακμές όπως οι δύο ανταγωνιστικές μέθοδοι, τελικά επιστρέφει σαφώς τα καλύτερα αποτελέσματα από τις άλλες μεθόδους.
2. Η εντροπία παρουσιάζει το μεγαλύτερο εύρος στα ποσοστά σημείων που αποδίδεται μέγεθος παραθύρου, όπως και στο ποσοστό ορθών σημείων επί των υπολογισθέντων, άρα η παραμετροποίησή της είναι πολύ καλή και η μέθοδος προσαρμόσιμη. Παρόλα αυτά δεν κατάφερε να μεταφράσει αυτή την υπεροχή σε ανάλογα καλή ακρίβεια, που σε όλες (πλην μίας) τις περιπτώσεις είναι σαφώς υποδεέστερη της αναμενόμενης.
3. Η μέθοδος E3 θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές όπου μεγαλύτερη σημασία έχει η αξιοπιστία και η ακρίβεια παρά το πλήθος των συσχετισθέντων σημείων, όπως π.χ σημεία για σχετικό προσανατολισμό, αεροτριγωνισμό, ή δημιουργία αρχικής επιφάνειας με σκοπό την χρήση της για αρχικές τιμές των υπολοίπων σημείων.
4. Κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την συμπεριφορά των μεθόδων στατιστικής ανάλυσης, εντροπίας και Förstner είναι η τυπική απόκλιση, η εντροπία και το w, αντίστοιχα. Οι άλλοι παράγοντες συνεισφέρουν λιγότερο στην διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων.
5. Η στατιστική ανάλυση δεν δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα, ανεξαρτήτως παραμέτρων.

4.2.4.6. Συμπεράσματα

Συγκρίνοντάς την τελική επιλογή της μεθόδου F3 με το σταθερό παράθυρο 27x27 που αποτελεί μέτρο σύγκρισης, προκύπτει ότι η ακρίβειά της είναι πρακτικά ισοδύναμη (0.09, 0.18 έναντι 0.10, 0.21 m), και πάντως εντός των αυστηρών ορίων που χρησιμοποιούνται, και οι αστοχίες είναι λίγο περισσότερες (539 έναντι 622) και σε κάθε περίπτωση πολύ λίγες ποσοστιαία. Εκείνο που διαφέρει αρκετά είναι το ποσοστό των αποδεκτών σημείων (97.77% έναντι 90.96%), που ουσιαστικά σημαίνει ότι ο χειριστής χρειάζεται να συμπληρώσει σημεία στο 9% της επιφάνειας.

Αναμενόνταν ότι ο αλγόριθμος εύρεσης κατάλληλου μεγέθους θα είχε καλύτερα αποτελέσματα από το σταθερό παράθυρο 27x27, αυτό όμως δεν επαληθεύτηκε από την εφαρμογή. Τα αποτελέσματά της είναι πολύ κοντά σε αυτά του βέλτιστου σταθερού παραθύρου. Το βασικό πλεονέκτημά της είναι ότι απαλλάσσει τον χειριστή από το ρίσκο επιλογής ενός μεγέθους παραθύρου για όλο το μοντέλο. Στην περίπτωση που αυτή η επιλογή είναι εκτός της περιοχής 23x23 έως 31x31 (για το συγκεκριμένο μοντέλο) οι επιπτώσεις στην ακρίβεια, αλλά και σε άλλα χαρακτηριστικά, θα ήταν δυσμενείς.

Αξιοσημείωτο είναι ότι οι διαφορές δεν ακολουθούν την κανονική κατανομή. Ο έλεγχος κανονικής κατανομής με το Jarque-Bera[1] τεστ, δίνει αρνητικά αποτελέσματα για όλα τα δείγματα σε όλες τις διευθύνσεις (X,Y,Z). Δημιουργούνται λοιπόν ερωτηματικά σχετικά με την εκτεταμένη χρήση του συγκεκριμένου ελέγχου σε εγχειρίδια ελέγχου ακρίβειας γεωγραφικών δεδομένων (Day et al, 1988, Trinder et al., 1995, Adkins et al., 1994, Fox et al. 2001, McGlone, 2004), βασική υπόθεση των οποίων είναι ότι τα σφάλματα ακολουθούν κανονική κατανομή. Η υπόθεση αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι ο έλεγχος με σημεία ελέγχου είναι δειγματοληπτικός. Τα λίγα σημεία ελέγχου (το πολύ μερικές δεκάδες) δεν αποτελούν ικανό δείγμα ελέγχου κατανομής και κατά συνέπεια χρησιμοποιείται η υπόθεση της κανονικής κατανομής. Η μετέπειτα εμφάνιση και χρήση GPS διευκόλυνε την συλλογή σημείων ελέγχου και ο έλεγχος έγινε πιο συστηματικός, αλλά και πάλι το πλήθος των σημείων δεν είναι ικανό για συμπεράσματα σχετικά με την χρήση κατάλληλης κατανομής. Έτσι η κανονική κατανομή εξακολουθεί να εξυπηρετεί. Σε ερευνητικό επίπεδο υπάρχουν εργασίες όπου ΨΜΕ συγκρίνονταν με ΨΜΕ αναφοράς και κατά συνέπεια υπήρχε ικανό δείγμα σημείων (πολλές χιλιάδες μετρήσεις), αλλά σε καμία εργασία δεν γίνεται αναφορά στο γεγονός ότι η κανονική κατανομή δεν είναι κατάλληλη για τέτοιους ελέγχους. Η ευκολία χρήσης της συγκεκριμένης κατανομής σε συνδυασμό με τη δυσκολία αναζήτησης κάποιας άλλης καταλληλότερης δικαιολογούν την χρήση της μέχρι σήμερα. Η διπλωματική εργασία της Παπασάικα (2002) κάνει εκτενή αναφορά σε αυτό το γεγονός και δοκιμάζει ελέγχους με άλλες κατανομές.

[1] Το τεστ Jarque-Bera ελέγχει την υπόθεση το δείγμα να ακολουθεί την κανονική κατανομή με άγνωστο μέσο όρο και τυπική απόκλιση, με εναλλακτική υπόθεση το δείγμα να μην ακολουθεί κανονική κατανομή. Το τεστ βασίζεται στα μέτρα κύρτωσις (kurtosis) και στρεβλότητας (skewness) του δείγματος. Για ένα δείγμα που ακολουθεί την κανονική κατανομή τα μέτρα αυτά πρέπει να είναι αντίστοιχα 3 και 0. Το τεστ ελέγχει εάν οι τιμές του δείγματος διαφέρουν σημαντικά από τις προαναφερθείσες με τεστ x^2.

4.3. Σχήμα παραθύρου

Η σύγκριση των διαφορετικών σχημάτων παραθύρων, έγινε:

- σε όλα τα σταθερά μεγέθη και τις διαφορετικές μεθόδους μεγέθους παραθύρου του πίνακα 4.4 (εστιασμένη και θεωρητική σύγκριση)
- με εφαρμογή των μεθόδων σαν διαδικασίες αυτόματης συλλογής σημείων στο ζεύγος των τεχνητών φωτογραφιών (σε τεχνητές εικόνες που αποτελούν ενδιάμεσο στάδιο θεωρίας και εφαρμογής)
- με εφαρμογή σε ζεύγος αεροφωτογραφιών και σύγκρισή τους με το ΨΜΕ αναφοράς και την προτεινόμενη μεθοδολογία ελέγχου ΨΜΕ.

Οι περιπτώσεις αυτές αναλύονται στη συνέχεια.

4.3.1. Εφαρμογή έλλειψης και τετραγώνου με σταθερά παράθυρα

Τα δεδομένα από την εφαρμογή του τετραγώνου με διαφορετικές παραμέτρους και μεθόδους δυναμικού υπολογισμού μεγέθους παραθύρου, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μια αρχική σύγκριση με την έλλειψη. Ακολουθώντας την ίδια ακριβώς διαδικασία του σχήματος 4.3 με έλλειψη προκύπτουν τα αντίστοιχα αριθμητικά στοιχεία. Τα στοιχεία αυτά προσθέτονται στους πίνακες των 4.5 και 4.6 και προκύπτουν οι αντίστοιχοι 4.7 και 4.8.

Μέγεθος	**Ποσοστό σημείων που επιστράφηκαν από τον αλγόριθμο %**		**Σημεία αστοχίας #**		**Ποσοστό σωστών σημείων επί συνόλου ελεγχθέντων %**		**Οριζοντιογραφική και υψομετρική ακρίβεια κατά FGDC m**	
	Τετρ.	**Ελ.**	**Τετρ.**	**Ελ.**	**Τετρ.**	**Ελ.**	**Τετρ.**	**Ελ.**
7x7	75.97	70.21	2630	1700	69.57	66.07	1.98,3.96	0.24,0.47
9x9	87.07	83.65	2076	1508	82.01	79.98	0.48,1.00	0.22,0.43
11x11	92.56	90.91	1740	1239	88.32	87.89	0.29,0.75	0.18,0.37
13x13	95.48	94.56	1403	996	92.06	92.14	0.31,0.57	0.16,0.31
15x15	96.86	96.72	1070	803	94.26	94.76	0.15,0.31	0.14,0.28
17x17	97.78	97.95	864	642	95.68	96.39	0.14,0.28	0.12,0.24
19x19	98.24	98.64	719	570	96.49	97.25	0.12,0.25	0.12,0.23
21x21	98.54	98.97	610	498	97.05	97.76	0.12,0.23	0.10,0.21
23x23	98.77	99.20	554	**443**	97.42	98.12	0.10,0.21	0.09,0.19
25x25	98.91	99.35	542	448	97.59	98.25	0.10,0.20	0.09,0.18
27x27	98.98	**99.48**	**541**	457	**97.67**	**98.37**	0.09,0.19	**0.08,0.17**
29x29	99.02	99.45	590	512	97.58	98.20	**0.09,0.18**	0.09,0.17
31x31	**99.05**	**99.48**	653	564	97.46	98.11	**0.09,0.18**	0.09,0.17
33x33	99.10	99.51	737	665	97.31	97.89	0.14,0.19	0.09,0.17
35x35	99.09	99.44	883	769	96.94	97.56	0.10,0.19	0.09,0.17

Πίνακας 4.8. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μεθόδων σταθερού μεγέθους παραθύρου, με χρήση τετραγώνου και έλλειψης. Με έντονη γραφή οι καλύτερες τιμές κάθε στήλης. Με πράσινο οι περιπτώσεις που πληρούν τις απαιτήσεις ακρίβειας.

Από παρατήρηση του πίνακα 4.7 προκύπτουν εύκολα τα εξής:

1. Σε όλα τα μεγέθη παραθύρων υπήρξε βελτίωση της ακρίβειας με χρήση έλλειψης, με μεγαλύτερη στο μικρότερο παράθυρο 7x7. Όσο αυξάνει το μέγεθος τόσο μειώνεται η διαφορά. Το γεγονός αυτό σημαίνει ότι η έλλειψη ευνοεί τα μικρότερα μεγέθη παραθύρων, παραμένοντας όμως πάντοτε καλύτερη.
2. Σε όλα τα μεγέθη παραθύρων η έλλειψη έχει μεγαλύτερο ποσοστό ορθών σημείων επί αυτών που

συγκλίνουν. Αυτό σημαίνει ότι η έλλειψη αναγνωρίζει και απορρίπτει περισσότερα λανθασμένα σημεία από μόνη της. Η διαφορά ανάμεσα στα δύο σχήματα αμβλύνεται (πιν. 4.7, σχ. 4.5) γύρω από το βέλτιστο μέγεθος παραθύρου, που όπως έχει αναφερθεί παραπάνω είναι το 27x27.

3. Στο ποσοστό των σημείων που συγκλίνουν δεν υπερέχει ξεκάθαρα το ένα ή το άλλο σχήμα. Μέχρι το παράθυρο 17x17 υπερέχει το τετράγωνο, ενώ μετά η έλλειψη. Μέχρι το 11x11 ισχύει το ίδιο και για το ποσοστό των σωστών σημείων επί του συνόλου των σημείων ελέγχου. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι σε αυτά τα μικρά μεγέθη παραθύρων αμφότερες δεν καλύπτουν τα όρια ακρίβειας και κατά αυτά συνέπεια κρίνονται εντελώς ακατάλληλα. Υπό αυτό το πρίσμα μπορεί να ισχυριστεί κανείς ότι η έλλειψη λειτουργεί καλύτερα απορρίπτοντας περισσότερα σημεία, ανταποκρινόμενη στο γεγονός ότι χρησιμοποιείται ακατάλληλο μέγεθος παραθύρου.

4. Η έλλειψη έχει μεγαλύτερο εύρος μεγεθών που ικανοποιούν το κατώφλι ακρίβειας. Κατά συνέπεια καλύπτει καλύτερα την αδυναμία του χειριστή να επιλέξει κατάλληλο μέγεθος. Το παράθυρο 23x23 με χρήση έλλειψης παρουσιάζει τα ίδια ή και καλύτερα μεγέθη από το 27x27 με τετράγωνο, γεγονός που σημαίνει ότι η έλλειψη επιτρέπει την χρήση μικρότερων παραθύρων για παρόμοια ή καλύτερα αποτελέσματα.

5. Το παράθυρο 27x27 παρουσιάζεται και στην περίπτωση της έλλειψης ως η καλύτερη λύση, αν και η διαφορά της από τα παράθυρα 23x23 έως και 35x35 τόσο σε ακρίβεια όσο και στα υπόλοιπα στατιστικά μεγέθη είναι μικρή.

Συνολικά λοιπόν, από την σύγκριση των σταθερών παραθύρων και μόνο προκύπτει ότι η έλλειψη έχει γενικώς καλύτερη συμπεριφορά από το τετράγωνο, η οποία αμβλύνεται και τα σχήματα γίνονται ισάξια όσο το μέγεθος παραθύρου πλησιάζει την βέλτιστη τιμή.

4.3.2. Εφαρμογή έλλειψης και τετραγώνου με τις μεθόδους δυναμικού υπολογισμού μεγέθους παραθύρων

Η εφαρμογή της έλλειψης σε όλες τις περιπτώσεις δυναμικού υπολογισμού μεγέθους παραθύρου και η αντιπαραβολή με τα αντίστοιχα αποτελέσματα του τετραγώνου φαίνονται στον πίνακα 4.8. Από αυτόν προκύπτουν τα εξής:

1. Στα ποσοστά σύγκλισης, σε όλες σχεδόν τις περιπτώσεις εντροπίας και Förstner (εκτός F1 και F7) η έλλειψη έχει καλύτερα ποσοστά. Στην στατιστική μέθοδο παρουσιάζει ελαφρά χαμηλότερα ποσοστά από το τετράγωνο. Η μέθοδος όμως αυτή έχει απορριφθεί (ενότητα. 4.2.4.5) και κατά συνέπεια η ανατροπή αυτή δεν παρουσιάζει ενδιαφέρον. Τα ποσοστά ορθών σημείων επί του συνόλου με την έλλειψη είναι συστηματικά, έστω και λίγο, καλύτερα από τα αντίστοιχα του τετραγώνου. Κατά συνέπεια η έλλειψη ορθά δεν συγκλίνει σε ακατάλληλα σημεία.

2. Σε όλες τις περιπτώσεις, η έλλειψη επιστρέφει συστηματικά λιγότερα σημεία αστοχίας από το τετράγωνο, μειώνοντας τον χρόνο και κόπο για την διόρθωσή τους.

3. Σε όλες τις περιπτώσεις (πλην των F1, F4 και F7) η έλλειψη έχει μεγαλύτερα ποσοστά ορθών σημείων. Αυτό ανατρέπει την περίπτωση της στατιστικής ανάλυσης, όπου συνέκλιναν περισσότερα σημεία. Η έλλειψη αποδεικνύει ότι φιλτράρει καλύτερα τα λάθος σημεία και στο τελικό αποτέλεσμα είναι καλύτερη. Στις περιπτώσεις των F1, F4 και F7 κοινό σημείο αποτελεί ο παράγοντας w=0.5. Θα μπορούσε λοιπόν να ισχυριστεί κανείς ότι όταν το σήμα στο σημείο έχει χαμηλή ένταση ευνοείται το τετράγωνο ανεξαρτήτως σχήματος της περιεχόμενης πληροφορίας και επιστρέφει περισσότερα σημεία εντός ορίων. Η ακρίβεια όμως όλων αυτών των περιπτώσεων είναι σημαντικά χαμηλότερη με το τετράγωνο από την αντίστοιχη με την έλλειψη. Κατά συνέπεια τα σημεία αστοχίας του τετραγώνου είναι μεγάλα και συνεισφέρουν πάρα πολύ στην επιδείνωση της ακρίβειας.

4. Η ακρίβεια της έλλειψης είναι καλύτερη παντού πλην της μεθόδου Σ3, όπου παρατηρείται μεγάλη απόκλιση σε σχέση με τις υπόλοιπες. Πιθανόν πρόκειται για μεμονωμένο φαινόμενο που δεν είναι αρκετό να αμφισβητήσει την βελτίωση που επιφέρει στην ακρίβεια η χρήση της έλλειψης. Επίσης παρατηρείται σημαντική βελτίωση της ακρίβειας στην μέθοδο της εντροπίας, ενώ η αντίστοιχη βελτίωση με την μέθοδο Förstner δεν είναι τόσο αισθητή. Η μέθοδος της εντροπίας μετράει την τυχαιότητα των τιμών στη γειτονιά χωρίς να εξετάζει την κατανομή τους. Κατά συνέπεια η έλλειψη έχει σαφές προβάδισμα αφού προσαρμόζεται σε αυτό το περιεχόμενο. Αντίθετα, στην

μέθοδο Förstner όπου η ίδια η μέθοδος προσδιορισμού μεγέθους λαμβάνει υπόψη της το περιεχόμενο ώστε το μέγεθος να είναι κατάλληλο για συνταύτιση με τετράγωνο, η έλλειψη εξακολουθεί να παρουσιάσει καλύτερη ακρίβεια, αλλά όχι με την διαφορά που διατηρεί στην εντροπία.

5. Τα μέγιστα και ελάχιστα παρατηρούνται στις ίδιες μεθόδους, άρα εξασφαλίζεται η συνοχή των μεθοδολογιών μεγέθους. Δεν συμβαίνει ακριβώς το ίδιο και με τις ακρίβειες, οι οποίες όμως ακολουθούν παρόμοια συμπεριφορά που δεν ανατρέπει το παραπάνω συμπέρασμα περί συνοχής μεθόδων.

Οι διαφορές μεταξύ έλλειψης και τετραγώνου δεν φαίνονται αριθμητικά σημαντικές, αλλά αφορούν ένα μεγάλο δείγμα σημείων. Έτσι βελτίωση της ακρίβειας κατά ένα εκατοστό από 0.10 σε 0.09m οριζοντιογραφικά και από 0.20 σε 0.18m υψομετρικά δεν φαίνεται σημαντική, αλλά επειδή το δείγμα είναι μεγάλο τα αποτελέσματα είναι αντιπροσωπευτικά, και μπορεί κανείς να ισχυριστεί ότι η βελτίωση είναι ουσιαστική και όχι τυχαία. Το ίδιο ισχύει και για τα ποσοστά.

Έτσι, παρ' όλο που αριθμητικά οι διαφορές είναι μικρές, η συστηματικότητά τους και το πλήθος του δείγματος θεωρείται ότι τεκμηριώνουν στην προκειμένη περίπτωση την οριακή βελτίωση που επιφέρει η έλλειψη

- στα σημεία που συγκλίνουν, που πέραν της προφανούς βελτίωσης του ΨΜΕ, αποτελεί ευνοϊκό παράγοντα σε ορισμένες στρατηγικές συνταύτισης, όπως σε αυτήν που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία
- στα λανθασμένα σημεία, μειώνοντας τον χρόνο και το κόστος διορθώσεων
- στο σύνολο των σωστών σημείων, βελτιώνοντας την κάλυψη του μοντέλου
- στην ακρίβεια.

Μέθοδος	Σημεία που επιστράφηκαν από τον αλγόριθμο %		Σημεία αστοχίας #		Ποσοστό σωστών σημείων επί συνόλου ελεγχθέντων %		Οριζοντιογραφική και υψομετρική ακρίβεια κατά FGDC m	
	Τετρ.	**Ελ.**	**Τετρ.**	**Ελ.**	**Τετρ.**	**Ελ.**	**Τετρ.**	**Ελ.**
Σ1	57.92	57.80	550	401	56.58	56.82	0.31,0.77	0.13,0.24
Σ2	61.77	61.68	591	430	60.33	60.63	0.36,0.82	0.12,0.24
Σ3	67.89	67.75	661	480	66.28	66.58	**0.37,0.82**	0.12,0.23
Σ4	75.90	75.82	799	602	73.95	74.36	0.35,0.78	**0.66,1.65**
Σ5	60.05	59.99	598	442	58.60	58.92	0.31,0.76	0.13,0.25
Σ6	63.73	63.69	631	464	62.20	62.56	0.35,0.81	0.12,0.24
Σ7	69.65	69.53	698	512	67.95	68.29	0.36,0.81	0.13,0.24
Σ8	76.57	76.50	815	613	74.59	75.01	0.35,0.78	0.13,0.26
E1	88.75	89.38	1369	1108	85.42	86.68	0.32,0.58	0.17,0.33
E2	82.03	82.44	623	495	80.51	81.24	0.16,0.35	0.11,0.22
E3	**51.43**	**51.54**	**315**	**269**	**50.66**	**50.89**	**0.10,0.20**	0.09,0.19
E4	90.50	91.06	1414	1132	87.06	88.30	0.32,0.58	0.18,0.34
E5	88.74	89.15	713	570	87.00	87.76	0.26,0.52	0.11,0.23
E6	68.79	68.94	457	370	67.68	68.04	0.25,0.48	0.10,0.20
E7	91.16	91.64	1444	1158	87.64	88.82	0.32,0.59	0.18,0.34
E8	92.20	92.56	792	644	90.27	90.99	0.26,0.51	0.12,0.24
E9	78.90	78.99	590	487	77.46	77.80	0.24,0.46	0.11,0.22
E10	91.32	91.71	1480	1178	87.72	88.84	0.32,0.59	0.18,0.35
E11	93.98	94.26	845	684	91.92	92.60	0.26,0.51	0.12,0.25
E12	85.09	85.14	651	538	83.51	83.83	0.23,0.45	0.11,0.22
E13	91.40	91.73	**1502**	**1189**	87.75	88.84	0.32,0.59	0.18,0.35
E14	95.06	95.26	888	710	92.90	93.53	0.26,0.51	0.12,0.25
E15	89.33	89.35	718	572	87.58	87.95	0.23,0.45	0.11,0.22
F1	93.48	92.44	1330	1031	90.24	89.93	0.40,0.89	0.17,0.32
F2	**97.37**	**97.65**	766	615	**95.51**	**96.15**	0.16,0.34	0.12,0.23
F3	92.40	92.85	626	542	90.87	91.53	0.10,0.21	0.09,0.18
F4	93.83	92.96	1240	952	90.81	90.64	0.32,0.84	0.16,0.31
F5	96.76	97.06	765	588	94.90	95.63	0.16,0.34	0.11,0.22
F6	85.15	85.59	610	519	83.67	84.33	0.11,0.21	0.09,0.18
F7	94.02	93.18	1188	914	91.12	90.96	0.32,0.83	0.16,0.31
F8	96.01	96.40	726	577	94.25	95.00	0.12,0.24	0.11,0.22
F9	78.87	79.27	589	505	77.44	78.04	0.10,0.21	**0.09,0.18**
F10	93.43	93.88	637	541	91.88	92.56	0.11,0.22	0.10,0.19

Πίνακας 4.9. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μεθόδων δυναμικής επιλογής μεγέθους παραθύρου με χρήση τετραγώνου και έλλειψης. Με έντονη γραφή σημειώνονται οι καλύτερες και χειρότερες τιμές ανά στήλη.

4.3.2.1. Εξέταση ορισμένων περιπτώσεων ιδιαίτερα μικρής ακρίβειας

Η διαφορά ανάμεσα στην ακρίβεια έλλειψης και τετραγώνου στα μικρά μεγέθη παραθύρων είναι

εντυπωσιακή. Ειδικά στο παράθυρο 7x7 παρουσιάζεται πολύ μεγάλη διαφορά. Ανώμαλη συμπεριφορά παρατηρείται και στα παράθυρα 13x13, 33x33, στην μέθοδο Σ4 με έλλειψη και στην μέθοδο F2 με τετράγωνο. Η εξέταση των αποτελεσμάτων του παραθύρου 7x7 έδειξε ότι υπάρχουν πολλά σημεία με αποκλίσεις πλέον των 20m, με ορισμένες πάνω από 100m. Πρόκειται για χονδροειδή σφάλματα, τα οποία αφενός συμβάλουν καθοριστικά στην αύξηση του RMSE και αφετέρου μοιάζουν αδικαιολόγητα. Προσεκτικός έλεγχος έδειξε ότι τα προβλήματα αυτά δημιουργούνται στην δεύτερη συνήθως επανάληψη των ελαχίστων τετραγώνων και επιβάλλουν αδικαιολόγητα μεγάλες διορθώσεις στις παραμέτρους του αφινικού μετασχηματισμού.

Το πρόβλημα αυτό έχει την ρίζα του στις κακές αρχικές τιμές, σε συνδυασμό με το μικρό μέγεθος παραθύρου. Όταν η αρχική προσέγγιση είναι 3 ή περισσότερα εικονοστοιχεία μακριά από την αληθή, το παράθυρο 7x7 δεν εμπεριέχει το σωστό σημείο, οπότε δεν μπορεί να συγκλίνει σε αυτό. Στην προσπάθεια του να "συνταιριάξει" τα δύο παράθυρα, καταλήγει σε διορθώσεις που επηρεάζουν πολύ τις παραμέτρους κλίμακας και στροφών στην πρώτη επανάληψη, με αποτέλεσμα στην δεύτερη να επιβάλλονται πολύ μεγάλες διορθώσεις και στις παραμέτρους θέσης, και φυσικά η λύση να απέχει κατά πολλά εικονοστοιχεία. Το πρόβλημα εξαφανίζεται στο μέγεθος 15x15, όπου ακόμα και αν η αληθής θέση απέχει 6 εικονοστοιχεία (που είναι και η μέγιστη επιβαλλόμενη), βρίσκεται εντός του πρότυπου παραθύρου και κατά συνέπεια έχει την δυνατότητα να συγκλίνει στο σωστό σημείο. Αυτή η διαπίστωση χρήζει περαιτέρω διερεύνησης και τεκμηρίωσης.

Μέθοδος	**Σημεία που επιστράφηκαν από τον αλγόριθμο %**		**Σημεία αστοχίας #**		**Ποσοστό σωστών σημείων επί συνόλου ελεγχθέντων %**		**Οριζοντιογραφική και υψομετρική ακρίβεια κατά FGDC m**	
	Τετρ.	**Ελ.**	**Τετρ.**	**Ελ.**	**Τετρ.**	**Ελ.**	**Τετρ.**	**Ελ.**
7x7	75.97	70.21	2630	1700	69.70	66.07	1.98,3.96	0.24,0.47
7x7 όρια	79.35	72.74	1703	1518	75.20	69.05	0.23,0.46	0.22,0.43
9x9	87.07	83.65	2076	1508	82.01	79.98	0.48,1.00	0.22,0.43
9x9 όρια	89.04	85.16	1650	1340	85.02	81.90	0.21,0.41	0.20,0.40
11x11	92.56	90.91	1740	1239	88.41	87.89	0.29,0.75	0.18,0.37
11x11 όρια	93.68	91.46	1532	1122	89.95	88.72	0.19,0.37	0.17,0.34
F1	93.48	92.44	1330	1031	90.24	89.93	0.40,0.89	0.17,0.32
F1 όρια	94.25	92.84	1136	921	91.48	90.59	0.17,0.33	0.16,0.30
F2	97.37	97.65	766	615	95.51	96.15	0.16,0.34	0.12,0.23
F2 όριο	97.50	97.72	732	549	95.72	96.39	0.12,0.24	0.11,0.21
F3	92.40	92.85	626	542	90.87	91.53	0.10,0.21	0.09,0.18
F3 όρια	92.45	92.85	622	414	90.93	91.84	0.10,0.20	0.09,0.17

Πίνακας 4.10. Η βελτίωση των αποτελεσμάτων με την χρήση ορίων μεγίστων διορθώσεων στις επαναλήψεις των ελαχίστων τετραγώνων. Η βελτίωση αφορά κυρίως τα μικρά παράθυρα.

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος δοκιμάστηκαν δύο λύσεις:

α) τερματισμός των επαναλήψεων όταν όλες οι παράμετροι του αφινικού έχουν διόρθωση μικρότερη από 0.1.

Σε αυτή την περίπτωση επιστράφησαν από τον αλγόριθμο 71.54% (στο απλό 7x7 παράθυρο 75.99%), αλλά υπήρξε βελτίωση κυρίως στα σημεία αστοχίας που μειώθηκαν στα 1688 ενώ το ποσοστό σωστών σημείων επί του συνόλου μειώθηκε αντίστοιχα σε 67.45%. Η μείωση αυτή αφορά σχεδόν αποκλειστικά τα σημεία αστοχίας. Η βελτίωση στην ακρίβεια όμως δεν ήταν ανάλογη (1.70/2.74m). Οι διαφορές δεν είναι ουσιαστικές γιατί το κριτήριο σύγκλισης 0.1 για όλες τις παραμέτρους δεν έχει την ίδια σημασία. Αλλαγή κλίμακας και στροφής κατά 0.1 μεταφράζεται σε πολύ μεγαλύτερη διαφορά θέσης από 0.1 εικονοστοιχεία. Συγκεκριμένα το εικονοστοιχείο στην άκρη του παραθύρου 7x7 έχει συντεταγμένες (3.5,3.5). Εάν οι παράμετροι του αφινικού αντί για [0,1,0,0,0,1] γίνουν [0,1.1,0.1,0,0,1], δηλαδή επηρεάσουν μόνο τα X κατά ποσότητα 0.1 σε κλίμακα και στροφή, το νέο σημείο υπολογίζεται στη θέση (4.2,3.5), δηλαδή

μεταβολή 0.7, σαφώς μεγαλύτερη από 0.1 κατά θέση. Δηλαδή το κριτήριο σύγκλισης 0.1 κατά X και Y, υπερκαλύπτει τα κριτήρια 0.1 στις υπόλοιπες παραμέτρους, αφού είναι πιο ευαίσθητο.

β) εφαρμογή ορίων μέγιστων διορθώσεων και συγκεκριμένα 3 εικονοστοιχεία για τις παραμέτρους μετάθεσης και 0.1 για τις υπόλοιπες

Στην δεύτερη αυτή περίπτωση γίνεται προσπάθεια οι επιβαλλόμενες διορθώσεις να μην είναι παράλογες και καταστροφικές για την συνέχιση των επαναλήψεων. Παράλληλα όμως δεν θα πρέπει να είναι πολύ αυστηρές ώστε να αναγκάζουν σε περισσότερες επαναλήψεις και απόρριψη σημείων λόγω υπερβολικών επαναλήψεων. Σκοπός τους είναι να περιορίσουν τις αδικαιολόγητα μεγάλες διορθώσεις.

Ο Börlin (2002) αναφέρει μια σύνθετη μεθοδολογία για την συγκράτηση των επιβαλλόμενων διορθώσεων σε λογικά όρια. Η καθαρά μαθηματική του προσέγγιση ξεκινάει από το γεγονός ότι τα ελάχιστα τετράγωνα βασίζονται στην υπόθεση ότι η συνάρτηση των αγνώστων μπορεί να γραμμικοποιηθεί, ή διαφορετικά ότι είναι γραμμική στη γειτονιά στων αρχικών τιμών. Αυτό δεν ισχύει πάντα και αποτελεί την ρίζα των προβλημάτων για τις περιπτώσεις όπου δεν υπάρχει σύγκλιση, υπάρχει απόκλιση, παλινδρόμηση ή πολύ αργή σύγκλιση. Το μαθηματικό μοντέλο που χρησιμοποιεί βασίζεται στη διαπίστωση ότι μια μεγάλη διόρθωση στις άγνωστες παραμέτρους θα πρέπει να συνοδεύεται και από ανάλογη βελτίωση του αθροίσματος των τετραγώνων των υπολοίπων. Εάν κάτι τέτοιο δεν ισχύει η διόρθωση περιορίζεται.

Στην παρούσα μελέτη η εφαρμογή είναι πιο απλή και βασίζεται σε εμπειρικές παρατηρήσεις και λογικές διαπιστώσεις, παρά σε αυστηρό μαθηματικό μοντέλο. Επιβάλλοντας μέγιστες διορθώσεις 3 για τις παραμέτρους θέσης και 0.1 για τις υπόλοιπες παραμέτρους, παρατηρήθηκε σημαντική βελτίωση, που φαίνεται στον πίνακα 4.9. Η τροποποίηση του αλγορίθμου εφαρμόστηκε επιλεκτικά σε μερικά ακόμα μεγέθη παραθύρων και μεθόδους. Η βελτίωση που σημειώθηκε με την εφαρμογή των ορίων είναι συστηματική σε όλες τις περιπτώσεις, αλλά φθίνει όσο μεγαλώνουν τα παράθυρα, ή η μέθοδος επιλογής μεγέθους παραθύρου επιστρέφει μεγαλύτερα παράθυρα. Κατά συνέπεια τα συμπεράσματα των παραπάνω παραγράφων ισχύουν και μάλιστα επιβεβαιώνουν την υπεροχή της έλλειψης που δεν επηρεάζεται όσο το τετράγωνο από την ανεξέλεγκτη επιβολή διορθώσεων στις παραμέτρους του αφινικού μετασχηματισμού. Ειδικά στα μικρά μεγέθη η βελτίωση του τετραγώνου είναι πάρα πολύ μεγάλη (στο 7x7 η ακρίβεια βελτιώθηκε από 1.98,3.96 σε 0.23,0.46m), ενώ της έλλειψης η αντίστοιχη βελτίωση είναι ελάχιστη. Ταυτόχρονα τα σχετικά αποτελέσματα μεταξύ τετραγώνου και έλλειψης δεν αλλοιώνονται.

Τα αποτελέσματα χαμηλής ακρίβειας της απλής εφαρμογής του τετραγώνου με μέγεθος 7x7 βελτιώθηκαν θεαματικά με χρήση των δεσμεύσεων στις διορθώσεις. Το γεγονός αυτό φυσικά δεν σημαίνει ότι το εν λόγω μέγεθος είναι πανάκεια αφού ακόμα και με την βελτίωση επιστρέφει πολύ λίγα σωστά σημεία. Από την άλλη μεριά, αυτό δεν σημαίνει ότι δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται μεγέθη 7x7, αλλά εφόσον χρησιμοποιούνται θα πρέπει οι αρχικές τιμές είναι καλύτερες από 1.5 εικονοστοιχεία.

Επειδή η χρήση των ορίων των επιβαλλόμενων διορθώσεων έχει καλύτερα αποτελέσματα θα χρησιμοποιηθεί από δω και στο εξής.

4.3.2.2. Ελλειπτικό παράθυρο παράλληλα ή κάθετα στην έλλειψη αβεβαιότητας;

Το θεωρητικό υπόβαθρο του ελλειπτικού παραθύρου και η απάντηση στο γιατί δουλεύει καλύτερα εξηγείται από την θεωρία των ελαχίστων τετραγώνων και γίνεται εύκολα κατανοητή με ένα παράδειγμα. Όταν στον σχεδιασμό ενός γεωδαιτικού δικτύου η αβεβαιότητα σε ένα σημείο είναι έντονα πεπλατυσμένη, τότε πρέπει να αυξηθούν οι μετρήσεις που δεσμεύουν την λύση κατά την αδύνατη διεύθυνση. Κατά περίπτωση αυτές είναι γωνιομετρήσεις ή αποστάσεις. Εφόσον στην συνταύτιση προκύπτει αδυναμία κατά μία διεύθυνση, τότε πρέπει να χρησιμοποιηθούν περισσότερες μετρήσεις που να δεσμεύουν την λύση στην αδύνατη διεύθυνση. Επειδή η απάντηση δεν είναι τόσο προφανής όσο στην περίπτωση του γεωδαιτικού δικτύου, το ερώτημα που τίθεται είναι ποιες μετρήσεις (εικονοστοιχεία) είναι εκείνες που δεσμεύουν την λύση: εικονοστοιχεία κάθετα στην ακμή ή παράλληλα; Η πρώτη εκδοχή στηρίζεται στο γεγονός ότι πρέπει να ληφθούν περισσότερες μετρήσεις κατά την κάθετη διεύθυνση ώστε να συμπεριληφθεί τυχόν πληροφορία που είναι σημαντικά διαφορετική ώστε να "ακγυρωθεί" καλύτερα η συνταύτιση. Η δεύτερη βασίζεται περισσότερο στην πιθανότητα καμπυλότητας της ακμής (περιπτώσεις δρόμων) ή στην πιθανότητα ύπαρξης κοντινής γωνίας ώστε να βρεθεί αρκετή πληροφορία. Η σωστή λύση δείχνει καταρχήν να είναι στατιστικό φαινόμενο ανάλογα με το που έγκειται η αναγκαία πληροφορία.

Στην περίπτωση της κάθετης έλλειψης παρουσιάζεται και ένα ακόμα πρόβλημα, όπως αυτό περιγράφεται από την Pateraki (κ.ά., 2004). Η ακμή συνήθως συμβαδίζει με απότομη αλλαγή κλίσεως, οπότε η επιλογή εικονοστοιχείων που βρίσκονται εκατέρωθεν και μακρυά από αυτή, σημαίνει κατά πάσα πιθανότητα ότι

ανήκουν σε διαφορετικά επίπεδα που δεν μπορούν ταυτόχρονα να μοντελοποιηθούν από τον αφινικό μετασχηματισμό. Έτσι προστίθεται ένα ακόμα πρόβλημα στην περίπτωση της κάθετης διεύθυνσης, που συνήθως οδηγεί σε απόκλιση ή σε λύση με μειωμένη ακρίβεια. Με την λογική αυτή προτείνεται στην συγκεκριμένη μελέτη η υιοθέτηση ορθογωνίου παραθύρου το οποίο προσανατολίζεται παράλληλα στην ακμή.

Από την εφαρμογή της κάθετης έλλειψης με όλα τα μεγέθη παραθύρων προκύπτει ο πίνακας 4.10. Σε αυτόν προκύπτει ότι η κάθετη έλλειψη επιστρέφει γενικά λίγο καλύτερα μεγέθη από την απλή, γεγονός που έρχεται σε αντίθεση με την θεώρηση της παρούσας εργασίας και των Pateraki et al. (2004). Στην προκειμένη περίπτωση το φαινόμενο αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι στις συγκεκριμένες τεχνητές εικόνες δεν υπάρχουν απότομες αλλαγές κλίσεως και ακόμα περισσότερο δεν συμπίπτουν με ακμές έντασης. Κατά συνέπεια η κάθετη έλλειψη δεν βρίσκεται στην δυσχερή θέση να πρέπει να χρησιμοποιήσει τον αφινικό μετασχηματισμό για να γεφυρώσει τις επιφάνειες εκατέρωθεν απότομης αλλαγής κλίσεως.

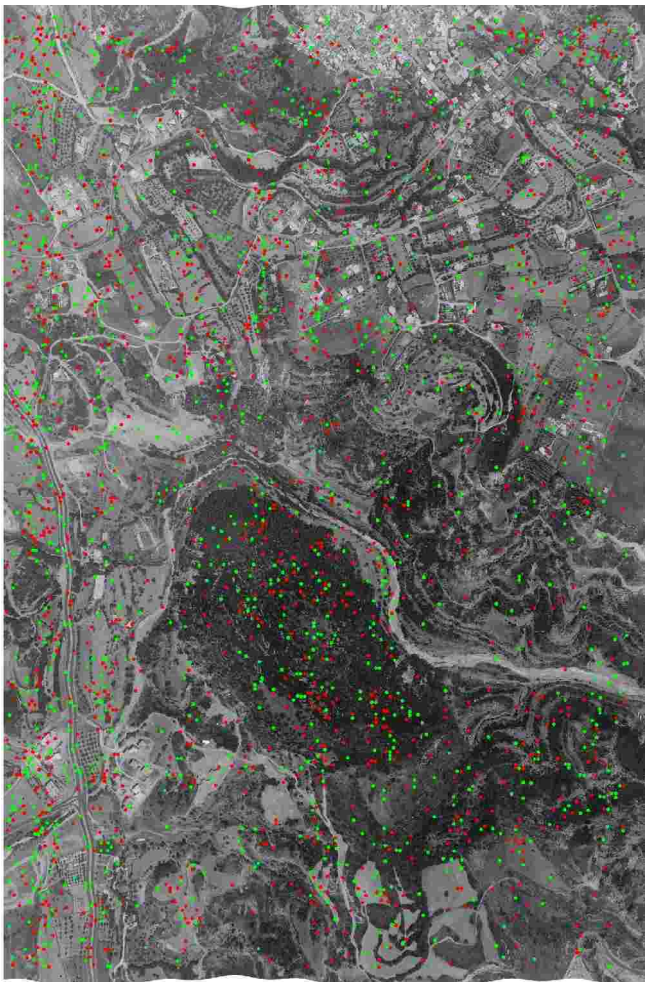
Βέβαια υπάρχουν περιπτώσεις που ακμές δεν συμπίπτουν με απότομες αλλαγές κλίσεως και κατά συνέπεια ευνοείται εν προκειμένω (ανάλογα και με την θέση της παρακείμενης πληροφορίας) η κάθετη έλλειψη. Παράλληλα, υπάρχουν περιπτώσεις που η παράλληλη έλλειψη δεν καταφέρνει να συγκεντρώσει αρκετή παρακείμενη πληροφορία και κατά συνέπεια δεν υπερέχει του τετραγώνου. Υπάρχουν λοιπόν περιπτώσεις που η χρήση κάθετης έλλειψης έχει καλύτερα αποτελέσματα, αλλά στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε η παράλληλη έλλειψη με κριτήριο την συχνότατη σύμπτωση ακμών και αλλαγών κλίσεων σε πραγματικές εικόνες (Pateraki et al. 2004), αλλά και βάσει της υπεροχής όπως εξηγείται από την θεωρία των ελαχίστων τετραγώνων. Τα αποτελέσματα δεν αναμένεται να είναι υποχρεωτικά ίδια σε πραγματικές εικόνες. Το ζήτημα χρήζει περαιτέρω διερεύνησης.

Μέγε-θος	**Ποσοστό σημείων που επιστράφηκαν από τον αλγόριθμο %**			**Σημεία αστοχίας #**			**Ποσοστό σωστών σημείων επί συνόλου ελεγχθέντων %**			**Οριζοντιογραφική και υψομετρική ακρίβεια κατά FGDC m**		
	Τετ.	**Ελ.**	**Ελ. καθ.**	**Τετ.**	**Ελ.**	**Ελ. καθ.**	**Τετ.**	**Ελ.**	**Ελ. καθ.**	**Τετ.**	**Ελ.**	**Ελ. καθ.**
7x7	75.97	70.21	70.09	2630	1700	1643	69.57	66.07	66.09	1.98,3.96	0.24,0.47	0.24,0.48
9x9	87.07	83.65	83.64	2076	1508	1459	82.01	79.98	80.09	0.48,1.00	0.22,0.43	0.21,0.41
11x11	92.56	90.91	90.72	1740	1239	1269	88.32	87.89	87.63	0.29,0.75	0.18,0.37	0.18,0.36
13x13	95.48	94.56	94.63	1403	996	962	92.06	92.14	92.29	0.31,0.57	0.16,0.31	0.16,0.31
15x15	96.86	96.72	96.70	1070	803	768	94.26	94.76	94.83	0.15,0.31	0.14,0.28	0.13,0.26
17x17	97.78	97.95	97.91	864	642	584	95.68	96.39	96.48	0.14,0.28	0.12,0.24	0.12,0.23
19x19	98.24	98.64	98.56	719	570	508	96.49	97.25	97.33	0.12,0.25	0.12,0.23	0.10,0.21
21x21	98.54	98.97	98.98	610	498	407	97.05	97.76	97.98	0.12,0.23	0.10,0.21	0.10,0.18
23x23	98.77	99.20	99.20	554	**443**	375	97.42	98.12	98.28	0.10,0.21	0.09,0.19	0.09,0.17
25x25	98.91	99.35	99.28	542	448	339	97.59	98.25	98.45	0.10,0.20	0.09,0.18	0.08,0.16
27x27	98.98	99.48	99.41	**541**	457	**303**	**97.67**	**98.37**	98.67	0.09,0.19	**0.08,0.17**	0.07,0.15
29x29	99.02	99.45	99.41	590	512	307	97.58	98.20	98.66	**0.09,0.18**	0.09,0.17	0.08,0.15
31x31	**99.05**	99.48	**99.49**	653	564	313	97.46	98.11	**98.73**	**0.09,0.18**	0.09,0.17	**0.07,0.14**
33x33	99.10	**99.51**	99.46	737	665	345	97.31	97.89	98.62	0.14,0.19	0.09,0.17	**0.07,0.14**
35x35	99.09	99.44	99.46	883	769	395	96.94	97.56	98.50	0.10,0.19	0.09,0.17	0.07,0.15

Πίνακας 4.11. Σύγκριση τετραγώνου, έλλειψης και έλλειψης κατά την κάθετη διεύθυνση. Με κόκκινο οι καλύτερες τιμές εκ των τριών, ανά μέγεθος παραθύρου. Με έντονη γραφή το καλύτερο μέγεθος ανά στήλη (μέθοδο).

Ένας ακόμα τρόπος σύγκρισης αφορά τις αποτυχίες της κάθε μεθόδου καθώς και το που αυτές συνέβησαν. Τα σημεία ασυμφωνίας των δύο μεθόδων, δηλαδή σημεία στα οποία αυστηρά μία από τις δύο δεν συνέκλινε είναι συνολικά 2289, εκ των οποίων στα 1157 δεν συνέκλινε η έλλειψη και στα 1132 δεν συνέκλινε η κάθετη έλλειψη. Επί συνόλου 41079 σημείων η διαφορά 25 σημείων είναι ασήμαντη. Ο

έλεγχος της επίθεσης αυτών των σημείων επί της εικόνας δεν έδειξε κάποια συγκεκριμένη τάση, κάποια περιοχή ή κάποιο χαρακτηριστικό που να ευνοεί την μία ή την άλλη περίπτωση (εικόνα 4.5). Το ίδιο ισχύει και για τα σημεία που επιστρέφονται από τον αλγόριθμο συνταύτισης, αλλά είναι εκτός ορίων ακρίβειας και σημειώνονται στην εικόνα 4.3.

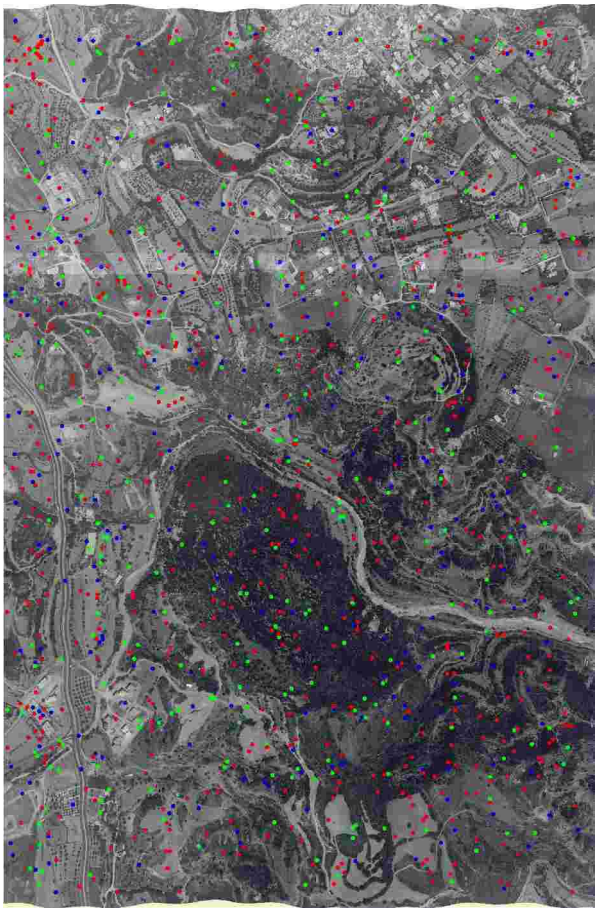


Εικόνα 4.5. Σημεία ασυμφωνίας μεθόδων προσανατολισμού έλλειψης. Τα κόκκινα σημεία είναι αποτυχίες της απλής έλλειψης (και επιτυχίες της κάθετης έλλειψης), ενώ τα πράσινα αποτυχίες της κάθετης έλλειψης (και επιτυχίες της απλής). Δεν παρατηρείται συστηματικότητα.

4.3.3. Έλεγχος σχήματος παραθύρου για παραγωγή ΨΜΕ από τις τεχνητές εικόνες

Με βάση την παραπάνω μεθοδολογία και με βήμα κανάβου 30 εικονοστοιχεία (περίπου 7.5m) συλλέχθηκαν αυτόματα σημεία για την δημιουργία ΨΜΕ. Για τα ζεύγη αυτά υπολογίστηκαν οι γεωδαιτικές συντεταγμένες τους και η εναπομείνουσα κατά y παράλλαξη. Σημεία με εναπομένουσα παράλλαξη y μεγαλύτερη από 10μm (ή 0.5 εικονοστοιχεία) εξαιρέθηκαν από περαιτέρω έλεγχο. Από τον μαθηματικό τύπο της επιφάνειας που χρησιμοποιήθηκε ως ΨΜΕ υπολογίζεται το σωστό υψόμετρο $Z_{cor}=f(X,Y)$ του σημείου με βάση τις οριζοντιογραφικές του συντεταγμένες. Στη συνεχεία υπολογίζεται η διαφορά dZ από το αληθές Z. Από αυτές τις διαφορές προκύπτουν το RMSE και η ακρίβεια κατά FGDC. Επίσης υπολογίζονται ανά περίπτωση τα σημεία που υπερβαίνουν το όριο ακρίβειας 0.21m.

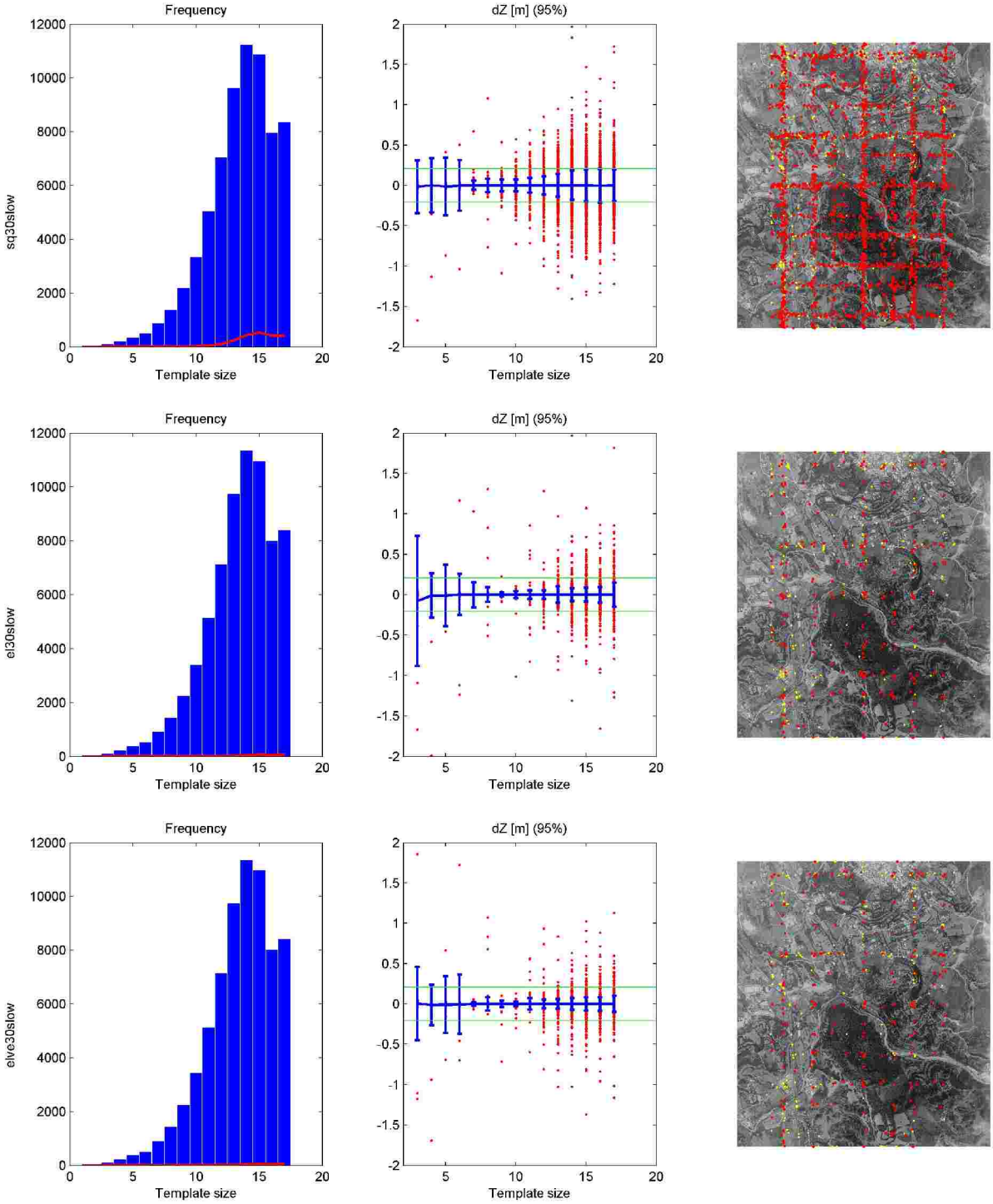
Όλες οι μέθοδοι είχαν πολύ καλή κάλυψη όλου του μοντέλου και συνέλεξαν περίπου 70000 αναμενόμενα σημεία. Με τα αποτελέσματα αξιολόγησης των μεθόδων δημιουργείται ο πίνακας 4.11, από τον οποίο προκύπτει ότι η έλλειψη παρουσιάζει σαφώς καλύτερα αποτελέσματα από το τετράγωνο, και η έλλειψη κατά την κάθετη διεύθυνση ελαφρώς καλύτερα αποτελέσματα από την απλή. Το γεγονός αυτό ήταν αναμενόμενο από τα αποτελέσματα εφαρμογής των εν λόγω μεθόδων σε όλα τα πιθανά μεγέθη παραθύρων.



Εικόνα 4.6. Σημεία με ακρίβεια εκτός ορίων. Τα κόκκινα είναι σημεία (570) που και η απλή έλλειψη και η κάθετη είναι εκτός ορίων. Τα μπλε είναι σημεία (267) της κάθετης έλλειψης εκτός ορίων (αλλά όχι και της απλής) και τα πράσινα σημεία (277) της απλής εκτός ορίων (αλλά όχι και της κάθετης).

	Τετράγωνο	**Παράλληλη έλλειψη**	**Κάθετη έλλειψη**
Σημεία που συνέκλιναν [#]	69436	70243	70251
Σημεία που περνούν το κατώφλι y παράλλαξης [%]	99,59	99,71	99,76
Σημεία που περνούν το κατώφλι y παράλλαξης [αριθμητικά]	285	204	169
Σημεία που είναι εκτός ορίων ακρίβειας [#]	2229	294	240
Ορθά σημεία επί του συνόλου [%]	96,38	99,29	99,42
RMS Z [m]	0,09	0,05	0,04
Υψομετρική ακρίβεια κατά FGDC [m]	0,17	0,11	0,09

Πίνακας 4.12. Σύγκριση μεθόδων σχήματος στις τεχνητές εικόνες.



Σχήμα 4.7. Από πάνω προς τα κάτω: τετράγωνο, έλλειψη και έλλειψη κατά την κάθετη διεύθυνση. Στα αριστερά διαγράμματα φαίνεται η κατανομή των μεγεθών παραθύρων (ίδιο για όλες αφού χρησιμοποιήθηκε η ίδια μεθοδολογία). Στα μεσαία διαγράμματα απεικονίζονται οι υψομετρικές αποκλίσεις όλων των συσχετισθέντων σημείων, ο μέσος όρος και το εύρος του 95% αυτών, ανά μέγεθος παραθύρου. Με πράσινο σημειώνεται το κατώφλι αστοχιών. Στις δεξιές εικόνες σημειώνονται με κίτρινο τα σημεία που δεν περνούν το όριο ελέγχου παράλλαξης y και με κόκκινο τα σημεία που ξεπρνούν το κατώφλι αστοχίας.

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τον πίνακα 4.11 την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων (σχ. 4.7) είναι τα εξής:

- Το τετράγωνο έχει πολλά σημεία εκτός ακρίβειας στα μεγάλα παράθυρα (κόκκινη γραμμή στο

αριστερό διάγραμμα του σχ. 4.7), παρόλο που χρησιμοποιούνται τα ίδια μεγέθη παραθύρων για όλες τις μεθόδους.

- Παρόλο που το τετράγωνο έχει πολλές αστοχίες (2229), η συνολική ακρίβεια της μεθόδου, ήτοι RMS κατά Z 0.09 m, είναι πολύ κάτω από το κατώφλι που υιοθετήθηκε (0.21m).
- Από την ανάλυση του κεντρικού διαγράμματος του σχήματος 4.7 για το τετράγωνο προκύπτει ότι οι τυπικές αποκλίσεις ανά μέγεθος παραθύρου βρίσκονται στα όρια του κατωφλιού ακρίβειας, κάτι το οποίο δεν ισχύει για τα ελλειπτικά παράθυρα.
- Ελάχιστα σημεία ξεπερνούν το αυστηρό κριτήριο παράλλαξης y, γεγονός που σημαίνει ότι η μέθοδος λειτουργεί καλά ακόμα και χωρίς την χρήση επιπολικής γεωμετρίας.
- Από το σχήμα 4.7 προκύπτει ότι οι αστοχίες (σημεία που ξεπερνούν το υιοθετημένο κατώφλι ακρίβειας) εμφανίζονται κυρίως στις περιοχές με έντονη κλίση και αφορούν κυρίως το τετράγωνο.
- Τα μικρά μεγέθη (μέχρι και 13x13) είναι επιρρεπή σε χονδροειδή σφάλματα ανεξαρτήτως μεθόδου, αφού οι τυπικές αποκλίσεις σε αυτά τα μεγέθη ξεπερνούν τα όρια ακρίβειας.
- Οι αστοχίες στο τετράγωνο εμφανίζουν ελάχιστο στα μεγέθη από 15x15 έως 19x19 και μετά αυξάνουν απότομα και φτάνουν στα όρια της αστοχίας. Αντίθετα τα ελλειπτικά παράθυρα εμφανίζουν στα αντίστοιχα μεγέθη ελάχιστα, τα οποία όμως διατηρούν σχεδόν έως το 35x35.
- Σε γενικές γραμμές τα ελλειπτικά παράθυρα είναι συνολικά καλύτερα, τόσο σε πλήθος επιστραφέντων σημείων, όσο σε αστοχίες και σε ακρίβεια. Με αυτό τον τρόπο μειώνουν την ανάγκη διορθώσεων και συμπληρώσεων από τον χειριστή.

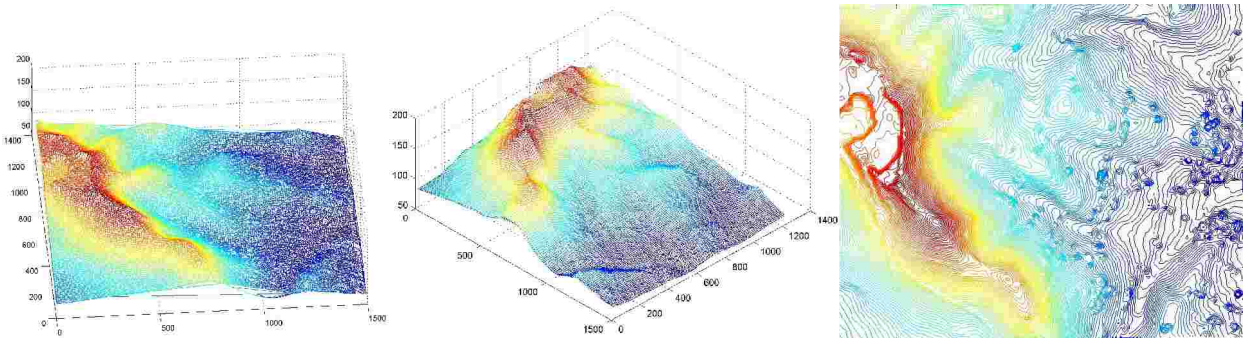
4.3.4. Έλεγχος σχήματος παραθύρου για παραγωγή ΨΜΕ από πραγματικές εικόνες

4.3.4.1. Περιγραφή δεδομένων

Οι α/φ που χρησιμοποιήθηκαν για έλεγχο είναι λήψης έτους 1998, στην περιοχή Σπάτων Αττικής, κλίμακας 1:17000 περίπου, σαρωμένες σε φωτογραμμετρικό σαρωτή DWP 100 με ανάλυση 1200 dpi (εικονοστοιχεία στο έδαφος 0.36 m). Επειδή αφορά την περιοχή του αεροδρομίου, μεγάλο τμήμα τους είναι διαβαθμισμένη περιοχή και "σβησμένη" από την ΓΥΣ (εικ. 4.2). Κατά συνέπεια ο έλεγχος περιορίστηκε σε ένα τμήμα του ζεύγους. Το τμήμα αυτό περιέχει πληθώρα χαρακτηριστικών, όπως περιαστικές περιοχές, καλλιεργημένες εκτάσεις και ένα λατομείο, που με το λευκό του χρώμα και τις κάθετες επιφάνειές του αποτελεί πρόκληση για όλους τους αλγορίθμους ΨΜΕ.

Το χειρωνακτικό μοντέλο συλλέχτηκε σε ψηφιακό σταθμό ZI με βήμα κανάβου 10 μέτρων. Ο χειριστής είχε την δυνατότητα αλλαγής της θέσης μέχρι 7 μέτρα από την προκαθορισμένη. Κατά συνέπεια το τελικό συλλεχθέν δείγμα προσομοίαζε περισσότερο τυχαίο παρά διατεταγμένο δίκτυο σημείων. Το πλήθος των σημείων που συλλέχθηκαν ήταν 18343 και κάλυπταν μία περιοχή 1500x1200 m, ενώ η μέγιστη υψομετρική διαφορά ήταν 58 m (σχ. 4.8).

Εικόνα 4.7. Η αριστερή φωτογραφία του ζεύγους αεροφωτογραφιών που χρησιμοποιήθηκαν στον έλεγχο. Σημειώνεται η περιοχή συλλογής χειρωνακτικού ΨΜΕ.



Σχήμα 4.8. ΨΜΕ αναφοράς. Οι εξάρσεις που διακρίνονται καλύτερα στις ισοϋψείς είναι σπίτια.

4.3.4.2. Εφαρμογή συνταύτισης με τις τρεις προτεινόμενες μεθόδους σχήματος παραθύρου

Πριν την εφαρμογή της συνταύτισης έγινε προ-επεξεργασία των εικόνων με φιλτρο Wallis για ενίσχυση τόνων. Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν είναι k=7, c=60, b=target.

Η συνταύτιση πραγματοποιήθηκε με παραμέτρους:

- Εννέα αρχικά ομόλογα σημεία μετρήθηκαν (σημεία αφετηρίας), εκ των οποίων όμως μόνο 3 χρησιμοποιήθηκαν τελικώς για την πλήρη κάλυψη του μοντέλου (εικ. 3.12)
- Χρήση δυναμικού υπολογισμού μεγέθους, με μέγιστο μέγεθος 35x35
- Στρατηγική συνταύτισης τύπου Otto-Chau με βήμα 20 εικονοστοιχεία και δυνατότητα επέκτασης σε 40 εικονοστοιχεία
- Χρήση ορίων μέγιστων διορθώσεων στις επαναλήψεις της ελαχιστοτετραγωνικής συνταύτισης
- Μέγιστο πλήθος επαναλήψεων 14 και όρια διορθώσεων 0.1 εικονοστοιχεία

Η εφαρμογή της συνταύτισης έγινε με τετράγωνο παράθυρο, ελλειπτικό παράθυρο παράλληλο και κάθετο με την έλλειψη αβεβαιότητας. Στην εικόνα 3.12 φαίνεται η κάλυψη που επιτεύχθηκε με την προτεινόμενη στρατηγική συνταύτισης. Η σβησμένη περιοχή, τα εικονοσήματα αμφότερων των φωτογραφιών και ο

αύξων αριθμός τους εξαιρέθηκαν αυτόματα από την συλλογή. Σημεία που φαίνονται να έχουν συσχετισθεί και να διεισδύουν στην σβησμένη περιοχή, είναι παραδόξως σωστά γιατί τα αντίστοιχα τμήματα είναι ορατά και στην δεξιά φωτογραφία του ζεύγους. Κάποια αραίωση των σημείων παρατηρείται τοπικά στο λατομείο και σε δασώδεις περιοχές. Σε αυτές τις περιοχές ο αλγόριθμος δεν μπορούσε να συσχετίσει τα σημεία λόγω ομοιόμορφων γκρίζων τόνων. Το φαινόμενο αυτό ήταν αναμενόμενο και επιθυμητό, αφού ο χειριστής θα αναγκαστεί όχι μόνο να συλλέξει περισσότερα σημεία σε αυτές τις περιοχής, αλλά θα αναγκαστεί να τις επισκεφθεί και να τις ελέγξει.

Παρατηρείται επίσης αραίωση σημείων κατά μήκος ενός δρόμου που εντοπίζεται στο μέσο του μοντέλου προς την δεξιά πλευρά του (εικ. 3.12), κάτω από την σβησμένη περιοχή. Πρόκειται για δρόμο με ψηλές λεύκες που δημιουργούσαν ορατές περιοχές είτε στην μία ή στην άλλη φωτογραφία με αποτέλεσμα να μην συλλεχθούν πολλά σημεία πίσω από αυτές. Γενικά η στρατηγική συνταύτισης είχε ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Τα σημεία που προέκυψαν από την συνταύτιση με τις τρεις διαφορετικές μεθόδους σχήματος παραθύρου, σίγουρα εμπεριέχουν και χονδροειδή σφάλματα, πέραν του κατωφλίου ακριβείας που έχει υιοθετηθεί. Με σκοπό την απόρριψη αυτών των χονδροειδών σφαλμάτων τα σημεία φιλτραρίστηκαν με τεστ μίας πλευράς (one tail test) και επίπεδο εμπιστοσύνης 99% ως προς το τυπικό σφάλμα της μονάδας βάρους (σ_o).

Στα εναπομείναντα σημεία εφαρμόστηκε εμπροσθοτομία για τον υπολογισμό των γεωδαιτικών συντεταγμένων. Για τους προαναφερθέντες λόγους τα σημεία αυτά φιλτραρίστηκαν με τεστ μίας πλευράς (one tail test) και επίπεδο εμπιστοσύνης 99% ως προς τη εναπομείνουσα παράλλαξη y. Τα σημεία που συλλέχθηκαν αρχικά καθώς και τα απορριφθέντα από τα δύο τεστ φαίνονται στον πίνακα 4.12. Παρατηρείται ότι η μέθοδος της έλλειψης έχει τα περισσότερα απορριφθέντα, ενώ το τετράγωνο επιστρέφει και διατηρεί τα περισσότερα σημεία. Αυτό αποτελεί ένδειξη ότι το τετράγωνο έχει καλύτερα αποτελέσματα, αφού λιγότερα σημεία απορρίπτονται από αυτά τα αρχικά τεστ.

Είδος DTM	***Αρχικά σημεία***	***Εναπομείνοντα σημεία μετά 99% τεστ για σ_o και p_y***	***Ποσοστό απόρριψης***
Τετράγωνο	108421	103704	4.35%
Παράλληλη Έλλειψη	106368	100876	5.16%
Κάθετη Έλλειψη	106364	101010	5.03%

Πίνακας 4.13. Αρχικό φιλτράρισμα συσχετισθέντων σημείων.

4.3.4.3. Έλεγχος με ΨΜΕ αναφοράς

Παράλληλα με την χειρωνακτική συλλογή σημείων, έγινε και αυτόματη σε δύο ψηφιακούς σταθμούς. Σε ψηφιακό φωτογραμμετρικό σταθμό ZI και στο Softplotter. Στο ZI τα πρωτογενή σημεία συλλογής δεν επιστρέφονται άμεσα από τον αλγόριθμο. Αντί αυτών επιστέφεται στον χρήστη ένα πλήθος διατεταγμένων σημείων, προϊόν παρεμβολής στα πρωτογενή. Τα πρωτογενή σημεία, που είναι από τελεστή, αποθηκεύονται εσωτερικά σε ένα αρχείο μορφής κειμένου. Από την πληθώρα παραμέτρων που προσφέρονται για προσαρμογή, η μοναδική παράμετρος που αλλοιώθηκε από τις προτεινόμενες τιμές ήταν το βήμα του κανάβου, ήτοι 5 m. Αμφότερα τα αρχεία από το ψηφιακό όργανο χρησιμοποιήθηκαν για σύγκριση (διατεταγμένα-DTM και τυχαία-TIN).

Στο Softplotter επίσης χρησιμοποιήθηκαν οι προτεινόμενες παράμετροι και το μόνο που ορίστηκε ήταν το βήμα του κανάβου. Το λογισμικό προσφέρει την δυνατότητα στο χρήστη να επιλέξει εάν το αρχείο εξόδου θα είναι με διατεταγμένα σημεία ή τυχαία. Αμφότερα τα αρχεία χρησιμοποιήθηκαν για σύγκριση.

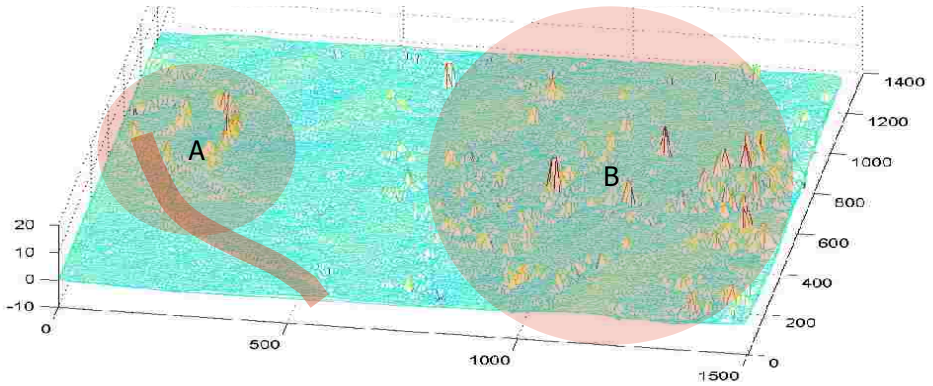
Στις προτεινόμενες μεθόδους συνταύτισης το βήμα κανάβου επί των εικόνων ήταν 20 x 0.364 = 7.28 m, καθιστώντας την σύγκριση θεμιτή μεν, ελαφρώς δυσμενή δε για τον προτεινόμενο αλγόριθμο.

Τα σημεία από την κάθε μέθοδο συγκρίθηκαν με το ΨΜΕ αναφοράς. Συγκεκριμένα, τα σημεία υπό έλεγχο χρησιμοποιούνται για να δημιουργηθεί ΨΜΕ με βήμα κανάβου 5 m (προκειμένου να μειωθεί η απώλεια πληροφορίας), και εν συνεχεία υπολογίζονται οι διαφορές του ΨΜΕ από τα χειρονακτικά συλλεχθέντα σημεία, που θεωρούνται σημεία αναφοράς. Οι διαφορές υπολογίζονται ως:

$$dZ = Z_{\text{αναφοράς}} - Z_{\text{ΨΜΕ}} \tag{4.16}$$

Είδος DTM	***Πλήθος σημείων***	***% αστο-χιών***	***Μ.Ο [m]***	***Τυπική από-κλιση [m]***	***RMS [m]***	***Ελάχι-στο [m]***	***Μέγι-στο [m]***	***Εύρος [m]***
Τετράγωνο *xyz.sq20.enh.flt.txt*	103704	39.38	-0.295	0.826	0.877	-7.05	11.10	17.05
Παράλληλη Έλλειψη *xyz.el20.enh.flt.txt*	100876	40.68	-0.293	0.853	0.902	-8.14	10.94	19.18
Κάθετη Έλλειψη *xyz.elve20.enh.flt.txt*	101010	40.47	-0.295	0.848	0.898	-7.33	10.31	17.63
Softplotter TIN *soft.gray.tin.txt*	138446	44.39	-0.104	0.974	0.979	-6.34	12.60	18.94
Softplotter DTM *soft.gray.dtm.txt*	72539	46.34	-0.099	1.018	1.023	-7.37	12.22	19.59
SSK TIN *sskgraytin.txt*	1052212	39.08	-0.101	0.868	0.874	-9.24	11.79	21.03
SSK DTM *sskgraydtm.txt*	72541	39.70	-0.052	0.884	0.885	-8.42	11.31	19.73

Πίνακας 4.14. Σύγκριση αυτόματης συνταύτισης με DTM αναφοράς. Σε παρένθεση το πλήθος των σημείων. Το ποσοστό αστοχιών όπως υπολογίζεται μέσω της κανονικής κατανομής.



Σχήμα 4.9. Τυπική χωρική κατανομή διαφορών χειρωνακτικά συλλεχθέντων σημείων από το υπό έλεγχο ΨΜΕ. Στην συγκεκριμένη περίπτωση φαίνεται το ΨΜΕ με χρήση έλλειψης.

Ο μέσος όρος δείχνει τυχόν συστηματικό σφάλμα και μετατόπιση της όλης επιφάνειας προς τα πάνω ή κάτω. Η τυπική απόκλιση είναι ανεξάρτητη από τον μέσο όρο και αποτελεί εσωτερικό μέτρο συνοχής σημείων. Έτσι εάν κάποιο ΨΜΕ έχει μεγάλο μέσο όρο και μικρή τυπική απόκλιση σημαίνει ότι υπάρχει μεν συστηματικό σφάλμα, αλλά η επιφάνεια ακολουθεί σωστά τα χαρακτηριστικά του εδάφους. Σε αυτές τις περιπτώσεις μια συνολική μετάθεση του ΨΜΕ μπορεί να μειώσει τα σφάλματα και να βελτιώσει πολύ τα αποτελέσματα. Το RMS του πίνακα 4.13, δείχνει την πραγματική απόκλιση από τα δεδομένα αναφοράς και εμπεριέχει τον μέσο όρο και την τυπική απόκλιση.

Από τον πίνακας 4.13, που περιέχει τα στατιστικά μεγέθη των διαφορών, και το σχήμα 4.9 προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Οι αστοχίες των αλγορίθμων αναμενόμενα εστιάζονται στην περιοχή του λατομείου με τις κατακόρυφες πτώσεις (σχ. 4.9, Α), στην ημιαστική περιοχή με τα διώροφα και τριώροφα σπίτια που δημιουργούν χαρακτηριστικές εξάρσεις (σχ. 4.9, Β), και στον δρόμο που οδηγεί στο λατομείο (σχ. 4.9, Γ). Η χειρωνακτική συλλογή των σημείων έγινε σε χαρακτηριστικά σημεία αλλαγής κλίσεων, ενώ οι προτεινόμενοι αλγόριθμοι συλλέγουν σημεία ανά 20 εικονοστοιχεία, γεγονός που σημαίνει ότι γενικά δεν καταφέρνουν να συλλέξουν τα κατάλληλα σημεία για ακριβή περιγραφή της επιφάνειας. Όταν από τα συσχετισθέντα σημεία δημιουργηθεί ΨΜΕ είναι λογικό ότι θα

υπάρχουν σοβαρές αποκλίσεις σε απότομες αλλαγές κλίσεων και κατακόρυφων επιφανειών, όπως συμβαίνει στο λατομείο, στα σπίτια και στον δρόμο που έχει μεγάλα πρανή. Από τον κανόνα δεν ξεφεύγει κανένα από τα υπό έλεγχο ΨΜΕ, αφού όλα παρουσιάζουν σχήματα εντελώς αντίστοιχα με το σχήμα 4.9.

- Οι μέγιστες διαφορές είναι σημαντικά μεγαλύτερες από τις ελάχιστες, ενώ ταυτόχρονα δεν συμβαδίζουν και με τους μέσους όρους. Το γεγονός αυτό δικαιολογείται αφού σε αυτά τα σημεία τα χειρωνακτικά σημεία είναι σημαντικά υψηλότερα λόγω παρεμβολής στα τυχαία σημεία της συνταύτισης.
- Όλοι οι μέσοι όροι είναι αρνητικοί, άρα το ΨΜΕ συνταύτισης είναι υψηλότερο από τα χειρωνακτικά σημεία. Αυτό μπορεί να οφείλεται και στο συστηματικό σφάλμα του παρατηρητή ή των αλγορίθμων συνταύτισης.
- Ο μέσος όρος και το RMS δεν συμβαδίζουν. Μπορούν να αναφερθούν χαρακτηριστικά τα ζεύγη τετράγωνο-SSK_DTM και SoftplotterDTM-SSK_TIN. Στην πρώτη περίπτωση οι μέσοι όροι έχουν μεγάλη διαφορά (0.24 m), ενώ τα RMS πρακτικά μηδενική (0.007 m). Κατά συνέπεια η τυπική απόκλιση των δύο ΨΜΕ είναι αντίστροφη των μέσων όρων. Στην δεύτερη περίπτωση η διαφορά των μέσων όρων είναι ελάχιστη (0.002 m) ενώ η διαφορά RMS σημαντική (0.149 m).
- Οι τρεις προτεινόμενες μέθοδοι δεν έχουν πρακτικά μεγάλες διαφορές. Το RMS δείχνει ότι καλύτερη είναι αυτή που χρησιμοποιεί το τετράγωνο, ενώ έπονται η κάθετη και η παράλληλη έλλειψη.
- Ανάμεσα στους ψηφιακούς σταθμούς, τα ΨΜΕ με μορφή TIN επιδεικνύουν καλύτερο RMS από τα αντίστοιχα με μορφή διατεταγμένων σημείων.
- Το καλύτερο αποτέλεσμα έχει το SSK_TIN και το ΨΜΕ της προτεινόμενης μεθοδολογίας με τετράγωνο παράθυρο.
- Η μέθοδος με το καλύτερο RMS (SSK_TIN) συλλέγει σχεδόν δεκαπλάσια σημεία από τις υπόλοιπες. Οι υπόλοιπες θα μπορούσαν να συγκεντρώσουν αντίστοιχο πλήθος σημείων με μείωση του βήματος κανάβου. Η διαφορά είναι ότι το SSK χρησιμοποιεί σημειακούς τελεστές για να συγκεντρώσει ένα μεγάλο πλήθος σημείων ανεξαρτήτως ζητούμενου κανάβου. Εν συνεχεία, δημιουργεί τον ζητούμενο κάναβο κάνοντας παρεμβολή από τα ήδη συλλεχθέντα.
- Παρατηρείται ότι οι προτεινόμενες μέθοδοι παρουσιάζουν μεγαλύτερο μέσο όρο από τις υπόλοιπες, άρα παρουσιάζουν συστηματικό σφάλμα. Το σφάλμα αυτό κατά πάσα πιθανότητα οφείλεται στους προσανατολισμούς. Για όλες τις μεθόδους χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικοί εσωτερικοί προσανατολισμοί που πραγματοποιήθηκαν εσωτερικά σε κάθε λογισμικό, ενώ ο εξωτερικός προσανατολισμός πραγματοποιήθηκε στο SSK και μεταφέρθηκε με την μορφή 6 παραμέτρων στα υπόλοιπα.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα παραπάνω αποτελέσματα βασίζονται σε ΨΜΕ αναφοράς, του οποίου η αβεβαιότητα είναι ±0.35 m (ενότητα 4.2.1). Επειδή οι μέσοι όροι είναι κάτω από αυτό το όριο, ενδεχόμενο συστηματικό σφάλμα του παρατηρητή αλλάζει πάρα πολύ τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα. Με δεδομένο ότι ο παρατηρητής μπορεί να έχει συστηματικό σφάλμα, οι μέσοι όροι και τα RMS του πίνακα 4.13 αναιρούνται και το μόνο μέτρο που διατηρεί ενδιαφέρον είναι η τυπική απόκλιση και το εύρος των διαφορών. Με κριτήριο αυτήν και μόνο, η σειρά κατάταξης των μεθόδων, είναι τετράγωνο, κάθετη έλλειψη, παράλληλη έλλειψη, SSK_TIN, SSK_DTM, Softplottter TIN, Softplotter DTM.

Παρατηρείται ότι οι αλγόριθμοι των ψηφιακών σταθμών, που χρησιμοποιούν πυραμίδες, τελεστές σημείων και επιπολική γεωμετρία, έχουν παραπλήσιο μέσο τετραγωνικό σφάλμα με τους προτεινόμενους, που δεν χρησιμοποιούν τα αντίστοιχα. Οι προτενόμενοι χρησιμοποιούν έμμεσα την γεωμέτρία της λήψης μέσω του εξωτερικού προσανατολισμού, προκειμένου να απορρίψουν σημεία που παρουσιάζουν μεγάλο σ_o στην ελαχιστοτετραγωνική επίλυση της εμπροσθοτομίας, σε δεύτερο ανεξάρτητο στάδιο. Το στάδιο αυτό θα μπορούσε να τροποποιηθεί για να υποστηρίξει οποιαδήποτε μορφή γεωμετρίας.

4.3.5. Έλεγχος σχετικού προσανατολισμού

Στα πλαίσια ελέγχου του προτεινόμενου αλγορίθμου συνταύτισης και δεδομένου ότι αυτός είναι ανεξάρτητος από επιπολική γεωμετρία, θα μπορούσε ο σχετικός προσανατολισμός να αποτελέσει έναν τρόπο ελέγχου. Επίσης, εφ' όσον επιβεβαιωθεί η αρχική υπόθεση ότι τα συσχετιθέντα σημεία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για υπολογισμό σχετικού προσανατολισμού σε α/φ, τότε ο σχετικός προσανατολισμός καθίσταται πιθανή εφαρμογή του προτεινόμενου αλγορίθμου.

4.3.5.1. Εφαρμογή στις τεχνητές αεροφωτογραφίες

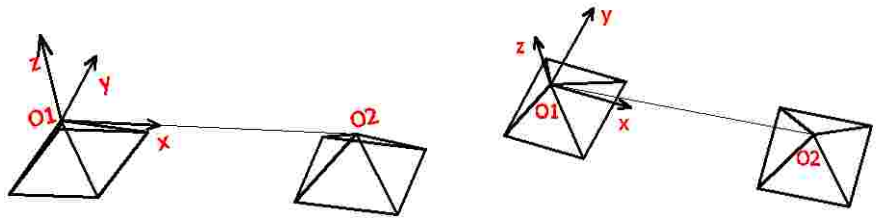
Με χρήση των 40613 σημείων, όπως αυτά προέκυψαν από την συνταύτιση των τεχνητών α/φ με χρήση δυναμικού υπολογισμού μεγέθους παραθύρου, και ελλειπτικού παραθύρου, υπολογίζεται ο σχετικός προσανατολισμός με σ_o=1.4 μm, όπως φαίνεται στον πίνακα 4.14.

Στροφή	Αληθές μέγεθος [βαθμοί]	Υπολογισθέν μέγεθος [βαθμοί]	Γραμμικό σφάλμα στο έδαφος [m]
κ1	0	0.0010	0.0031
κ2	0	0.0010	0.0031
φ1	0	0.0008	0.0023
φ2	0	0.0011	0.0032
ω2	0	0.0006	0.0018

Πίνακας 4.15. Υπολογισμός σχετικού προσανατολισμού τεχνητών αεροφωτογραφιών και αντίστοιχου σφάλματος στο έδαφος από ύψος πτήσης 1900 m.

Όπως προκύπτει από τον πίνακα 4.145, οι διαφορές των αληθών μεγεθών από τα υπολογισθέντα, είναι πολύ μικρές. Αναγόμενες δε στο έδαφος, προκύπτουν διαφορές της τάξης των 3 χιλιοστών, που είναι πρακτικά μηδενικές για την κλίμακα των φωτογραφιών. Κατά συνέπεια μπορεί να ισχυρισθεί κανείς ότι οι αποκλίσεις δεν είναι σημαντικές και ο σχετικός προσανατολισμός που υπολογίζεται από τα συσχετισθέντα σημεία δεν διαφέρει από τον αληθή.

Έτσι με ασφάλεια μπορεί να ισχυρισθεί κανείς ότι η συνταύτιση είναι σωστή και ακριβής, ενώ τα συσχετισθέντα σημεία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό του σχετικού προσανατολισμού.



Σχήμα 4.10. Τα δύο συστήματα σχετικού προσανατολισμού. Αριστερά το σύστημα συντεταγμένων προσανατολισμένο με την βάση και δεξιά το σύστημα προσανατολισμένο με την αριστερή φωτογραφία.

4.3.5.2. Εφαρμογή στις πραγματικές φωτογραφίες.

Τρεις διαφορετικές διαδικασίες υπολογισμού του σχετικού (των 5 στροφών) εφαρμόστηκαν για το ίδιο ζεύγος α/φ (134-135). Ο σχετικός προσανατολισμός δύο εικόνων μπορεί να περιγραφεί από πέντε παραμέτρους. Υπάρχουν 54 διαφορετικοί συνδυασμοί πέντε παραμέτρων που μπορούν να περιγράψουν τον σχετικό προσανατολισμό (Πέτσα, 2000). Από αυτούς δύο χρησιμοποιούνται ευρύτερα στην φωτογραμμετρία κυρίως για ιστορικούς λόγους, αφού η επικράτησή τους ανάγεται στα αναλογικά όργανα και στον μηχανικό τρόπο αποκατάστασης της δέσμης. Ο πρώτος χρησιμοποιεί 5 στροφές και ο δεύτερος τρεις στροφές και δύο μεταθέσεις. Η βασική τους διαφορά (πέρα από τον μηχανισμό των αναλογικών οργάνων) είναι ο ορισμός του συστήματος αναφοράς. Αμφότερες οι περιγραφές χρησιμοποιούν το προβολικό κέντρο της αριστερής φωτογραφίας ως αρχή των αξόνων και εκείνο που διαφέρει είναι ο προσανατολισμός τους (σχ. 4.10).

Στην πρώτη περίπτωση ο άξονας των x διέρχεται από το προβολικό κέντρο της δεξιάς φωτογραφίας. Έτσι εξ ορισμού οι συντεταγμένες του είναι της μορφής (B,0,0), όπου B είναι η βάση των φωτογραφιών. Η βάση ορίζει την κλίμακα του στερεομοντέλου και στην φάση υπολογισμού του σχετικού είναι απροσδιόριστη. Σε αυτή την περίπτωση δεν είναι επίσης δυνατόν να προσδιοριστούν αμφότερες οι στροφές περί του x άξονα, δηλαδή οι δύο ω στροφές, παρά μόνο η διαφορά τους. Για λόγους σύμβασης μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η αριστερή εικόνα έχει στροφή μηδέν. Η περιγραφή αυτή δεν είναι πλήρης,

αφού με σταθερό τον άξονα Ox και ορισμένο έτσι να διέρχεται από τα δύο προβολικά κέντρα, υπάρχει ακόμα η απροσδιοριστία στροφής γύρω από αυτόν τον άξονα. Έτσι υπάρχουν ουσιαστικά άπειρα τέτοια συστήματα συντεταγμένων που να ικανοποιούν τα προαναφερθέντα. Οι παράμετροι του σχετικού όμως δεν αλλάζουν, αφού τα στοιχεία που επηρεάζονται από την απροσδιοριστία της στροφής του συστήματος, είναι οι γωνίες ω_1 και ω_2, αλλά όχι εν προκειμένω και η διαφορά τους dω που συμμετέχει στον σχετικό.

Στην δεύτερη περίπτωση το σύστημα των αξόνων προσανατολίζεται παράλληλα με το σύστημα της αριστερής φωτογραφίας, με συνέπεια οι στροφές της αριστερής φωτογραφίας να είναι εξ ορισμού όλες μηδέν. Σε αυτήν την περίπτωση όμως το προβολικό κέντρο της δεξιάς φωτογραφιάς δεν βρίσκεται επί του άξονα x, αλλά σε σημείο με συνεταγμένες (x_2,y_2,z_2). Επίσης οι στροφές της δεξιάς φωτογραφίας δεν είναι μηδέν στην γενική περίπτωση, αλλά ω_2,φ_2,κ_2. Επειδή όμως η διεύθυνση της βάσης και μίας ευθείας στο χώρο γενικότερα ορίζεται από δύο στροφές, οι συντεταγμένες αυτές δεν είναι ανεξάρτητες, αλλά δεσμευμένες ώστε τα $\alpha=x_2/y_2$ και $\beta=x_2/z_2$ να είναι σταθερά εκφυλίζοντας τις 3 άγνωστες μεταθέσεις σε 2 δεσμεύσεις και μία αυθαίρετη μεταβλητή. Κατά συνέπεια στην δεύτερη περίπτωση υπάρχουν τρεις στροφές και δύο μεταθέσεις που πρέπει να προσδιοριστούν.

Για την περίπτωση αεροφωτογραφιών, που οι στροφές του σχετικού προσανατολισμού είναι μικρές, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η γραμμική προσέγγιση της παράλλαξης y, ως το μέγεθος που πρέπει να μηδενιστεί μέσω των εξισώσεων παρατήρησης:

$$p_y=-x_1*d\kappa_1+x_2*d\kappa_2+\frac{x_1*y_1}{c}*d\varphi_1-\frac{x_2*y_2}{c}*d\varphi_2+(c+\frac{y_2^2}{c})*d\omega_2 \qquad (4.17)$$

Από αυτές τις μορφές επιλέχθηκε η πρώτη με τις πέντε στροφές, αφού η σωστή βάση μπορεί να προσαρτηθεί άμεσα και εύκολα.
Για τον έλεγχο της συνταύτισης μέσω σχετικού προσανατολισμού, χρησιμοποιούνται τρεις μέθοδοι υπολογισμού. Η πρώτη προκύπτει από την χρήση των 108421 συσχετισθέντων σημείων με την μέθοδο του τετραγώνου στις ενισχυμένες εικόνες. Για πρακτικούς λόγους και χωρίς απώλεια της γενικότητας χρησιμοποιήθηκαν ένα κάθε 10 σημεία, δηλαδή τελικά 10843 σημεία.

Η δεύτερη μέθοδος αφορά τον υπολογισμό με τα 18343 χειρονακτικά συλλεχθέντα σημεία στο ψηφιακό όργανο. Τα σημεία αυτά μετατράπηκαν σε εικονοσυντεταγμένες με χρήση του εσωτερικού και εξωτερικού προσανατολισμού όπως αυτοί προκύπτουν από τα αρχεία του οργάνου.

Η τρίτη μέθοδος χρησιμοποιεί τον εξωτερικό προσανατολισμό των δύο εικόνων (τρεις στροφές και τρεις μεταθέσεις για κάθε φωτογραφία) για να υπολογίσει τον σχετικό τους.

4.3.5.3. Υπολογισμός παραμέτρων σχετικού προσανατολισμού από εξωτερικό προσανατολισμό δύο εικόνων.

Εξ ορισμού του συστήματος συντεταγμένων μοντέλου, οι συντεταγμένες του προβολικού κέντρου της αριστερής φωτογραφίας είναι (0,0,0) και οι συντεταγμένες του προβολικού κέντρου της δεξιάς είναι (B,0,0), όπου B η βάση των φωτογραφιών. Με δεδομένο τον εξωτερικό προσανατολισμό των δύο φωτογραφιών μπορεί να υπολογιστεί το μέγεθος της βάσης.

Η σχέση μεταξύ των συστημάτων, σχετικού και εξωτερικού προσανατολισμού είναι τρεις στροφές, τρεις μεταθέσεις και μία κλίμακα. Ο προσδιορισμός της βάσης των εικόνων στο γεωδαιτικό σύστημα συντεταγμένων καθορίζει την κλίμακα. Η μετάθεση του ενός συστήματος ως προς το άλλο υπολογίζεται ως η διαφορά των συντεταγμένων του αριστερού προβολικού κέντρου στα δύο συστήματα. Έτσι τα δύο συστήματα αποκτούν κοινή αφετηρία (0,0,0) στο αριστερό προβολικό κέντρο.

Οι στροφές ανάμεσα στα δύο συστήματα μπορούν να υπολογιστούν από το διάνυσμα της βάσης, του οποίου οι συντεταγμένες είναι γνωστές και στα δύο (πιν. 4.15)

	Σύστημα σχετικού		***Γεωδαιτικό σύστημα***	
	Αριστερό προβολικό κέντρο	Δεξί προβολικό κέντρο	Αριστερό προβολικό κέντρο	Δεξί προβολικό κέντρο
X	0	B	0	X_2-X_1
Y	0	0	0	Y_2-Y_1
Z	0	0	0	Z_2-Z_1

Πίνακας 4.16. Συσχετισμός συντεταγμένων προβολικών κέντρων για τον υπολογισμό των στροφών μεταξύ των συστημάτων.

Ο υπολογισμός του πίνακα στροφής από διανύσματα με κοινή αρχή περιγράφεται από τον McGlone (2004). Εάν a και a' είναι δύο διανύσματα με $a \cdot a' \neq -1$ τότε οι ελάχιστες στροφές από το a στο a' δίνονται από την εξίσωση 4.4:

$$R_a = I + 2\mathrm{tilde}\, a' \tilde{a}^t - \frac{1}{1+\tilde{a}'\tilde{a}^t}(\tilde{a}+\tilde{a}')(\tilde{a}+\tilde{a}')^t \qquad (4.18)$$

όπου $\tilde{a} = \frac{a}{|a|}$ και $\tilde{a}' = \frac{a'}{|a'|}$.

Με αυτό τον τρόπο αποκαθίσταται πλήρως η σχέση ανάμεσα στα συστήματα συντεταγμένων του σχετικού και απόλυτου προσανατολισμού, δίνοντας την δυνατότητα να υπολογισθεί ο σχετικός προσανατολισμός με παραμέτρους τις πέντε στροφές από τις παραμέτρους του εξωτερικού προσανατολισμού των δύο εικόνων.

4.3.5.4. Σύγκριση σχετικών προσανατολισμών

Τα αποτελέσματα και των τριών μεθόδων φαίνονται στον πίνακα 4.16.

ΜΕΘΟΔΟΣ ΥΠΟΛ. ΣΧΕΤΙΚΟΥ	***Επίλυση με σημεία αυτόματης συνταύτισης***	***Επίλυση με σημεία χειρωνακτικών σκοπεύσεων***	***Σχετικός από εξωτερικό***
Xo,Yo,Zo 134	10000,10000,10000	10000,10000,10000	10000,10000,10000
Xo,Yo,Zo 135	11541.8621,10000,10000	11541.8621,10000,10000	11541.8621,10000,10000
ω 134 [βαθμοί]	0	0	0
φ 134 [βαθμοί]	1.04400	1.06914	1.10752
κ 134 [βαθμοί]	1.24551	1.22570	1.26136
ω 135 [βαθμοί]	-0.16050	-0.16059	-0.15349
φ 135 [βαθμοί]	0.55192	0.53437	0.55063
κ 135 [βαθμοί]	1.75579	1.73879	1.75359
σ_o [μm]	20.8	1.1	-

Πίνακας 4.17. Τα πέντε στοιχεία των σχετικών προσανατολισμών καθώς και τα υπόλοιπα απαραίτητα για την επίλυση εμπροσθοτομίας. Η επίλυση με τα χειρωνακτικά συλλεχθέντα σημεία, είναι εμφανώς καλύτερη γιατί οι πραγματικές τους σκοπεύσεις δεν δίδονται από τον ψηφιακό σταθμό και ως εκ τούτου υπολογίσθηκαν με την σχέση της συγγραμικότητας. Κατά συνέπεια ως εικονοσυντεταγμένες είναι ήδη δεσμευμένες με επιπολική γεωμετρία και γι'αυτό παρουσιάζουν πολύ μικρό σ_o.

Τα σημεία προβολής εκτιμήθηκαν ώστε οι γεωδαιτικές συντεταγμένες των σημείων να μην είναι αρνητικές και η κλίμακα να συμπίπτει με την πραγματική. Οι εξωτερικοί προσανατολισμοί από τους οποίους υπολογίζεται η βάση, έχουν προκύψει από αεροτριγωνισμό. Το τελευταίο εξασφαλίστηκε με χρήση της αληθούς βάσης.

Οι σχετικοί προσανατολισμοί με τα συμπληρωματικά τους στοιχεία, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως εξωτερικοί για την επίλυση εμπροσθοτομίας στα 18343 ζεύγη εικονοσυντεταγμένων των χειρωνακτικών σημείων (πιν. 4.17) και για τα 108421 ζεύγη εικονοσυντεταγμένων που προέκυψαν από την προτεινόμενη μεθοδολογία (πιν. 4.18).

σ_o επίλυσης εμπροσθοτομίας με τα χειρωνακτικά συλλεχθέντα σημεία	***Σχετικός προσανατολισμός***		
	Αυτόματης συνταύτισης	***Χειρωνακτικών σκοπεύσεων***	***Επίλυσης σχετικού από εξωτερικό***
Μ.Ο. [μm]	14	9	13
Τυπ. απόκλιση [μm]	8	7	0,2

Πίνακας 4.18. Στατιστικά μεγέθη του σ_o της επίλυσης της εμπροσθοτομίας, των 18343 χειρωνακτικά συλλεχθέντων σημείων με τους τρεις σχετικούς προσανατολισμούς. Οι σκοπεύσεις των 18343 χειρωνακτικά συλλεχθέντων σημείων, υπολογίσθηκαν από την συνθήκη της συγραμμικότητας και κατά συνέπεια συμφωνούν πλήρως (0,2 μm) με τον σχετικό που προκύπτει από τον εξωτερικό προσανατολισμό. Με γκρι σημειώνεται ο σχετικός που έχει υπολογισθεί με τα σημεία της συγκεκριμένης επίλυσης.

σ_o επίλυσης εμπροσθοτομίας με τα χειρωνακτικά συλλεχθέντα σημεία	***Σχετικός προσανατολισμός***		
	Αυτόματης συνταύτισης	***Χειρωνακτικών σκοπεύσεων***	***Επίλυσης σχετικού από εξωτερικό***
Μ.Ο. [μm]	16,5	24,4	9,3
Τυπ. απόκλιση [μm]	14,6	16,6	13,6

Πίνακας 4.19. Στατιστικά μεγέθη του σ_o της επίλυσης της εμπροσθοτομίας, των 108421 συσχετισθέντων σημείων με τους τρεις σχετικούς προσανατολισμούς. Με γκρι σημειώνεται ο σχετικός που έχει υπολογισθεί με τα σημεία της συγκεκριμένης επίλυσης.

Στους πίνακες 4.17 και 4.18 καταγράφονται στατιστικά μεγέθη του σ_o της επίλυσης της εμπροσθοτομίας των χειρονακτικών και των αυτόματων σημείων, με τρείς διαφορετικούς σχετικούς προσανατολσιμούς. Επειδή το σο είναι μόνο θετκό, ο μέσος όρος του προσεγγίζει το μηδέν στην καλύτερη περίπτωση. Ταυτόχρονα αποτελεί δείκτη της "σύμπτωσης" των συγκεκριμένων σημείων με την εκάστωτε λύση σχετικού προσανατολισμού. Η τυπική απόκλιση δίνει ένα μέτρο των σφαλμάτων που υπάρχουν μέσα στο πλήθος των σημείων.

Έτσι από τον πιν. 4.17, προκύπτουν τα εξής:

- η επίλυση των σημείων με τον σχετικό προσανατολισμό που έχει υπολογισθεί από τα ίδια, παρουσιάζει τον μικρότερο μέσο όρο. Το γεγονός αυτό ήταν αναμενώμενο.
- την αισθητά μικρότερη τυπική απόκλιση, την παρουσιάζει η επίλυση με τον σχετικό εξ'εξωτερικού προσανατολισμός. Η επίλυση των χειρωνακτικών σκοπεύσεων με τον υπολογισμένο από τον εξωτερικό προσανατολισμό σχετικό, δίνει πολύ μικρότερη τυτπική απόκλιση επειδή οι σκοπεύσεις των χειρωνακτικών έχουν υπολογισθεί μέσω του ιδίου του εξωτερικό. Έτσι είναι αναμενώμενο η τυπική τους απόκλιση είναι σχεδόν μηδενική. Το όποιο σφάλμα είναι συστηματικό (μ.ο.) και προκύπτει από την διαφορετική λύση.
- ο σχετικός που έχει υπολογισθεί από τον εξωτερικό, παρουσιάζει παρόμοιο μέσο όρο με τον σχετικό που προέκυψε από τα αυτόματα σημεία. Εκείνο που διαφέρει είναι η τυπική απόκλιση.

Από τον πιν. 4.18, προκύπτουν τα εξής:

- τα αυτομάτως συσχετισθέντα σημεία, όταν επιλύνονται με τον σχετικό προσανατολισμό όπως αυτός προκύπτει από τον εξωτερικό, παρουσιάζουν καλύτερα τα στατιστικά μεγέθη. Κατά συνέπεια, τα σημεία αυτά συμφωνούν περισσότερο με το σχετικό εξ'εξωτερικού, προσανατολισμό.
- το αναμενόμενο γεγονός ο σχετικός προσανατολισμός των αυτόματων σημείων να δίνει στην επίλυση των συγκεκριμένων σημείων τα καλύτερα στατιστικά μεγέθη δεν επαληθεύεται. Το φαινόμενο αυτό αποδίδεται στα σφάλματα που υπάρχουν λόγω συνταύτισης.

Συμπερασματικά θα μπορούσε να ειπωθεί ότι η επίλυση του σχετικού με τα συσχετισθέντα σημεία, ακόμα και εάν αυτά περιέχουν σημαντικό αριθμό αστοχιών, είναι εφάμιλλη με σχετικό προσανατολισμό που εκτελείται από χειριστή. Το πλήθος των μετρήσεων υπερισχύει των όποιων σφαλμάτων αναπόφευκτα εμπεριέχονται στα αυτόματα σημεία.

4.4. Χρήση προτεινόμενης μεθοδολογίας ελέγχου χωρίς ΨΜΕ αναφοράς.

Η παρούσα μεθοδολογία προτάθηκε με σκοπό τον έλεγχο ΨΜΕ χωρίς δεδομένα αναφοράς. Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, ο πλήρης έλεγχος ενός ΨΜΕ πρέπει να καλύπτει μεγάλο μέρος της επιφάνειας του DTM, με πυκνά σημεία, ώστε να μπορούν να εξαχθούν ακριβή συμπεράσματα. Το πλήθος και η πυκνότητα των σημείων εξαρτάται από την εφαρμογή και πρέπει να καθορίζεται από τις προδιαγραφές ελέγχου.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία ελέγχου επιτρέπει την χρήση οποιαδήποτε πυκνότητας σημείων, που ουσιαστικά καθορίζεται στην φάση συνταύτισης των δύο ορθοφωτογραφιών. Αν και η μέθοδος έχει σαν σκοπό τον έλεγχο ΨΜΕ, εάν εφαρμοστεί για μεγάλο πλήθος σημείων, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για διόρθωση ΨΜΕ, με εξαίρεση την περιοχή μεταξύ των εικονοκέντρων των δύο φωτογραφιών.

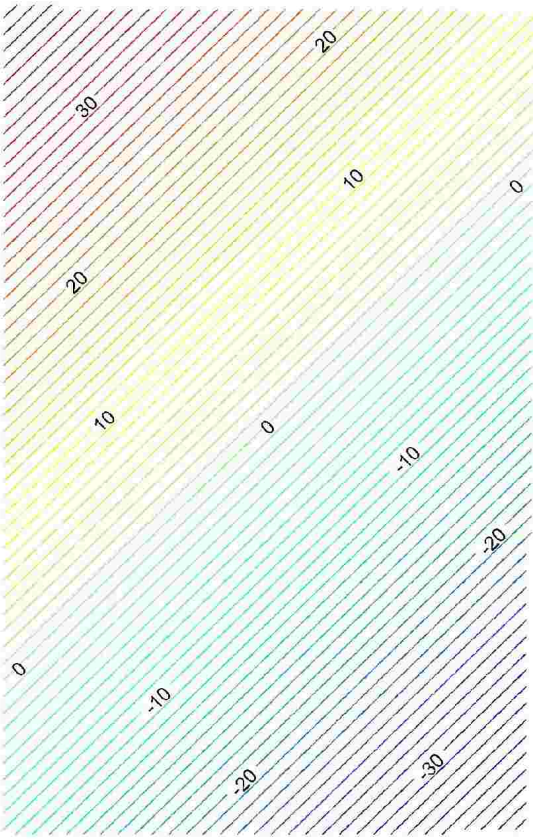
Για την επιβεβαίωση του μαθηματικού μοντέλου που περιγράφεται στο κεφάλαιο 3, καθώς και για τον έλεγχο της υλοποίησης χρησιμοποιήθηκαν τα τεχνητά δεδομένα που περιγράφονται στην παράγραφο .

4.4.1. Έλεγχος προτεινόμενης μεθόδου με τεχνητά δεδομένα.

Για τον έλεγχο της μεθόδου, το ΨΜΕ που περιγράφεται ως συνεχής συνάρτηση τροποποιήθηκε με σκοπό τον εντοπισμό των παραμορφώσεων από την προτεινόμενη μεθοδολογία. Έτσι στο αρχικό ΨΜΕ προστίθεται ένα κεκλιμένο επίπεδο κατά τους δύο άξονες. Η μεταβολή του ΨΜΕ σε κάθε σημείο X,Y περιγράφεται από την συνεχή συνάρτηση

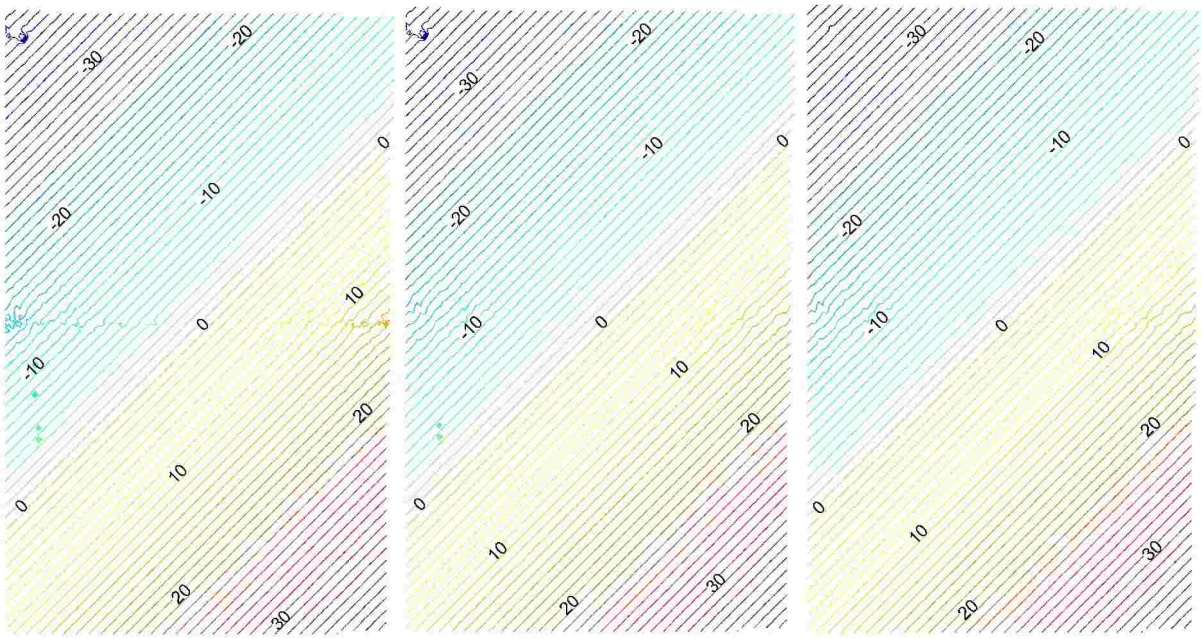
$$d(X,Y) = -(X - X_s) * 0.02 + (Y - Y_s) * 0.02 \qquad (4.19)$$

που προστίθεται στην εξίσωση 4.1, για να προκύψει το υπό έλεγχο ΨΜΕ. Το επίπεδο που περιγράφεται από την εξίσωση 4.3 ισοδυναμεί με το σφάλμα και φαίνεται με την μορφή ισοϋψών στο σχήμα 4.11. Αυτή η διαφορά θα πρέπει να ανιχνευθεί από την προτεινόμενη μεθοδολογία προκειμένου να αποδειχθεί η αποτελεσματικότητά της.



Σχήμα 4.11. Τεχνητά επιβαλλόμενη παραμόρφωση στο ΨΜΕ αναφοράς με ισοϋψείς καμπύλες ισοδιάστασης 1 m, στο κοινό επικαλυπτόμενο τμήμα των αεροφωτογραφιών.

Η περιοχή μελέτης έχει διαστάσεις 1600 x 2530 m. Οι παραμορφώσεις έχουν εύρος -39.76 έως 41.10 m. Προφανώς αντιστοιχούν σε διαφορές που είναι ιδιαίτερα υψηλές για την κλίμακα των υπό έλεγχο αεροφωτογραφιών, και είναι πέραν των πιθανών παραμορφώσεων που μπορεί να αντιμετωπισθούν σε πραγματικές συνθήκες.
Από τις δύο τεχνητές εικόνες δημιουργήθηκαν με χρήση του παραμορφωμένου ΨΜΕ ορθοφωτογραφίες στο κοινό επικαλυπτόμενο τμήμα. Ένα βασικό ερώτημα που προκύπτει στην εφαρμογή της μεθόδου αφορά στο μέγεθος του εικονοστοιχείου για την επαναδειγματοληψία ώστε να μην υπάρξει απώλεια πληροφορίας. Έτσι επιλέχθηκε με κριτήριο την κατά το δυνατόν διατήρηση της περιεχόμενης στην αρχική α/φ πληροφορίας. Αφού το μέγεθος εικονοστοιχείου στις αεροφωτογραφιες ήταν 0.254 μ. στο έδαφος, χρησιμοποιήθηκε εικονοστοιχείο 0.25 m για τηνπαραγωγή των ορθοφωτογραφιών. Η μέθοδος επαναδειγματοληψίας που χρησιμοποιήθηκε ήταν η δι-κυβική με σκοπό πάντα την διατήρηση της αρχικής πληροφορίας.
Στις δυο ορθοφωτογραφίες εφαρμόστηκε αυτόματη συνταύτιση με βήμα 24 εικονοστοιχεία (περίπου 6.10 m. στο έδαφος), με χρήση δυναμικού μεγέθους και ελλειπτικού σχήματος παράθυρα. Τα αποτελέσματα των διαφορών (προτεινόμενων διορθώσεων) όλων ανεξαιρέτως των σημείων (109217) φαίνονται στο σχήμα 4.12α. Παρατηρείται ότι η γενική μορφή των διορθώσεων είναι ακριβώς αντίθετη από τις επιβληθείσες παραμορφώσεις (σχήμα 4.11), γεγονός που επιβεβαιώνει το μαθηματικό μοντέλο. Στην ευθεία μεταξύ των εικονοκέντρων υπάρχει ανωμαλία τιμών που οφείλεται στην αδύνατη γεωμετρία, γεγονός που είχε ήδη προβλεφθεί από το μαθηματικό μοντέλο. Προκειμένου να ξεπεραστεί το εν λόγω πρόβλημα, επιβάλλεται ένα φίλτρο για τρίγωνα με γωνία μεγαλύτερη από 185 βαθμούς (σχ. 4.8β). Με χρήση αυτού του φίλτρου τα σημεία μειώνονται σε 105806. Παρόλα αυτά παρατηρούνται ακόμα μερικές δυσμορφίες, που αφορούν αποκλειστικά και μόνο λάθη συνταύτισης. Χρησιμοποιώντας τεστ μίας πλευράς (one tail) για το τυπικό σφάλμα της μονάδας βάρους (σ_o) της συνταύτισης απομένουν 103773 σημεία, που επαρκούν πλήρως για έλεγχο της περιοχής (σχ. 4.8γ).



α. β. γ.

Σχήμα 4.12. Από αριστερά προς τα δεξιά. (α) Οι διορθώσεις σε όλα τα συσχετισθέντα σημεία ανεξαιρέτως, (β) χωρίς τα σημεία με αδύνατη γεωμετρία σε σχέση με τα εικονοκέντρα και (γ) με one tail test για το το τυπικό σφάλμα της μονάδας βάρους σ_o.

Σε κάθε σημείο, υπολογίστηκε και το σωστό υψόμετρο, το οποίο συγκρίθηκε με το αληθές για τη συγκεκριμένη θέση. Τα αποτελέσματα είναι mean=-0.000251, std=0.060 και RMSE=0.036 ή κατα FCDG 0.07 m, που είναι σημαντικά καλύτερο από το αναμενόμενο κατώφλι υψομετρικής ακρίβειας για τη δεδομένη κλίμακα.
Άρα η προτεινόμενη μέθοδος εντόπισε και υπολόγισε τις παραμορφώσεις του ΨΜΕ με μεγάλη ακρίβεια και πλήρη κάλυψη (πλην μιας μικρής περιοχής μεταξύ των εικονοκέντρων). Συνεπώς κρίνεται ικανοποιητική και χρησιμοποιείται στους περαιτέρω ελέγχους.

4.4.2. 'Ελεγχος προτεινόμενης μεθοδολογίας με πραγματικά δεδομένα.

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν περιγράφονται στην παράγραφο και αφορούν ένα ζεύγος α/φ στην περιοχή των Σπάτων. Η μεθοδολογία ελέγχου που χρησιμοποιήθηκε είναι παρόμοια με την αντίστοιχη των τεχνητών δεδομένων στην προηγούμενη παράγραφο. Το χειρωνακτικά συλλεχθέντα σημεία χρησιμοποιήθηκαν για να δημιουργηθεί μια τεχνητά παραμορφωμένη επιφάνεια, η οποία και θα ελεγχθεί. Στα υψόμετρα των σημείων προστέθηκε ένα κεκλιμένο επίπεδο σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$d(X,Y)=(X-X_o)\frac{5}{1500}-(Y-Y_o)\frac{5}{1500} \qquad (4.20)$$

όπου X_o και Y_o οι συντεταγμένες του κάτω αριστερά άκρου της περιοχής ελέγχου.

Η εφαρμογή της εξίσωσης 4.2, δημιουργεί ένα παραμορφωμένο ΨΜΕ, με διαφορές από +4 έως -5 m από την αληθή επιφάνεια.

Επίσης η προτεινόμενη μεθοδολογία ελέγχου χωρίς ΨΜΕ αναφοράς εφαρμόστηκε και σε δύο ΨΜΕ από τον ψηφιακό φωτογραμμετρικό σταθμό Softplotter. Για την παραγωγή τους χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιοι εξωτερικοί προσανατολισμοί, ενώ οι εσωτερικοί σκοπεύτηκαν και ξαναϋπολογίσθηκαν από τον ψηφιακό σταθμό. Ο συγκεκριμένος ψηφιακός σταθμός επιτρέπει στον χρήστη να επιλέξει μεταξύ δύο διαφορετικών ΨΜΕ. Η πρώτη επιλογή αφορά την συλλογή σημείων στις κορυφές ενός κανάβου (επιλέχθηκε 5 m για την περίπτωση), που ονομάζεται DTM και η δεύτερη την συλλογή σημείων με τελεστή και κατά συνέπεια την μέτρηση σημείων σε τυχαίες θέσεις, μ.εθοδος που ονομάζεται TIN. Συλέχθηκαν δύο αυτόματα ΨΜΕ με τις αντίστοιχες μεθόδους και ονομασίες.

Στα τρία αυτά ΨΜΕ (το τεχνητά παραμορφωμένο και τα δύο από τον ψηφιακό σταθμό) εφαρμόστηκε ο προτεινόμενος αλγόριθμος ελέγχου. Για το σκοπό αυτό δημιουργήθηκαν γιά κάθε ΨΜΕ ένα ζεύγος ορθοφωτογραφιών με μέγεθος εικονοστοιχείου 0.25 m. Στα ζεύγη αυτά εφαρμόστηκε συνταύτιση με βήμα 25 εικονοστοιχεία και μέγιστο μέγεθος παραθύρου 35x35.

Οι διορθώσεις που υπολογίστηκαν από τον προτεινόμενο αλγόριθμο, επιβλήθηκαν στα αρχικά ΨΜΕ. Τα νέα διορθωμένα συγκρίθηκαν με τα χειρωνακτικά συλλεχθέντα σημεία. Στα αποτελέσματα της σύγκρισης, που είναι διαφορές από την αληθή επιφάνεια, χωρίς απώλεια της γενικότητας εφαρμόστηκε τεστ διπλής πλευράς για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%. Το τεστ αυτό δεν χρειάζεται πρόσθετα δεδομένα και αφορά μόνο τις υπολογισθείσες διαφορές. Από τον μέσο όρο και την τυπική απόκλιση αυτών των διαφορών, μπορεί να εφαρμοστεί ένα φίλτρο 95%, ώστε να απομακρυνθούν τυχόν χονδροειδή σφάλματα, που οφείλονται κυρίως στην συνταύτιση. Τα αποτελέσματα της σύγκρισης φαίνονται στον πίνακα 4.19. Παρατηρείται ότι και στις τρεις περιπτώσεις τα ΨΜΕ βελτιώθηκαν σε όλες τις παραμέτρους τους. Ειδικά στην περίπτωση του παραμορφωμένου ΨΜΕ η βελτίωση είναι θεαματική επειδή αυτό είχε και τις μεγαλύτερες αρχικές διαφορές. Επίσης σε κάθε περίπτωση, ανεξάρτητα από τις αρχικές διαφορές, η ακρίβεια των διορθωμένων ΨΜΕ είναι της τάξης 0.55 έως 0.60 m.

Ως τελικό συμπέρασμα, συνυπολογίζοντας τα αποτελέσματα από τα τεχνητά και τα πραγματικά δεδομένα, μπορεί να αναφερθεί ότι η προτεινόμενη μέθοδος λειτουργεί και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για έλεγχο ΨΜΕ χωρίς δεδομένα αναφοράς, αλλά ακόμη και για διόρθωση ΨΜΕ.

Είδος ΨΜΕ		**Μ.Ο.** [m]	**Τυπική απόκλιση** [m]	**RMS** [m]	**Μέση απόλυτη διαφορά** [m]
Παραμορφω-μένο	Αρχικό	-0.54	1.75	1.82	1.42
	Διορθωμένο 95%	-0.11	0.59	0.60	0.36
Softplotter DTM	Αρχικό	-0.10	0.93	0.94	0.65
	Διορθωμένο 95%	-0.09	0.58	0.59	0.36
Softplotter TIN	Αρχικό	-0.09	0.87	0.88	0.62
	Διορθωμένο 95%	-0.09	0.56	0.56	0.35

Πίνακας 4.20. Αποτελέσματα ελέγχου προτεινόμενης μεθοδολογίας ελέγχου, σε πραγματικά δεδομένα.

4.4.3. Έλεγχος των προτεινόμενων μεθόδων σχήματος παραθύρου χωρίς ΨΜΕ αναφοράς.

4.4.3.1. Εκτίμηση αναμενόμενης ακρίβειας.

Αναμενόμενη ακρίβεια για αυτό το ζεύγος (σύμφωνα με τις εξισώσεις 1.7 και 1.8) είναι

$$\sigma_{(X,Y,Z)} = 0.34,\ 0.24,\ 0.75\ \text{m} \qquad (4.21)$$

Η υιοθέτηση διαφορετικού κριτηρίου ακρίβειας για το ΨΜΕ δικαιολογείται από το γεγονός ότι τα δεδομένα στην προκειμένη περίπτωση δεν είναι τεχνητά, από τα οποία και αναμενόταν καλύτερη ακρίβεια. Σύμφωνα με τον McGlone (2004), στην περίπτωση ΨΜΕ και αυτόματης συνταύτισης ακρίβεια μέχρι ½ εικονοστοιχεία είναι πολύ καλή. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η προαναφερθείσα αναμενόμενη ακρίβεια, αρκεί για απόδοση κλίμακας 1:2000 από αεροφωτογραφίες 1:17000, κάτι που στην πρακτική δεν εφαρμόζεται συχνά. Έτσι ακόμα και με αυτά τα χαλαρότερα όρια ακρίβειας η διαδικασία αξιολόγησης παραμένει ιδιαίτερα αυστηρή.

4.4.3.2. Αποτελέσματα ελέγχου χωρίς ΨΜΕ αναφοράς.

Τα συσχετισθέντα σημεία με τα τρία διαφορετικά σχήματα παραθύρου, πρόκειται να χρησιμοποιηθούν για έλεγχο ΨΜΕ, οπότε θα πρέπει να μην εμπεριέχουν χονδροειδή σφάλματα. Για το σκοπό αυτό υποβλήθηκαν σε τεστ μίας πλευράς με επίπεδο εμπιστοσύνης 95% ως προς το τυπικό σφάλμα της μονάδας βάρους. Επίσης φιλτραρίστηκαν όσα σημεία δημιουργούσαν με τα εικονοκέντρα αμβλυγώνια τρίγωνα με γωνία μεγαλύτερη από 185 βαθμούς. Στα εναπομείναντα σημεία για τα οποία είχε υπολογισθεί η διόρθωση του ΨΜΕ, εφαρμόστηκε τεστ διπλής πλευράς (two tail test) με επίπεδο εμπιστοσύνης 95% στις διαφορές.

Η εφαρμογή όλων αυτών των τεστ αποσκοπεί στο φιλτράρισμα των πιθανών χονδροειδών σφαλμάτων, αφού η μέθοδος έχει σκοπό τον έλεγχο του ΨΜΕ. Κατά συνέπεια το κόστος της μικρής σχετικά μείωσης των σημείων (πιν. 1.21) με κέρδος στην αξιοπιστία δεν αποτελεί πρόβλημα, αλλά επιθυμητό αποτέλεσμα, ειδικά όταν τα σημεία που απομένουν είναι μερικές δεκάδες χιλιάδες.

Από τα αποτελέσματα του μέσου όρου του πίνακα 4.20 προκύπτει ότι οι τρεις μέθοδοι είναι πρακτικά ισοδύναμες. Έτσι επιχειρήθηκε και κατανομή των διαφορών σε κατώφλια 0.30, 0.60, 1.50, 3 και 5 m (πιν. 4.21), πάντα σύμφωνα με την προτεινόμενη μεθοδολογία ελέγχου.

Από τους πίνακες 4.20 και 4.21 προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Οι τρεις μέθοδοι είναι πρακτικά ισοδύναμες και δεν υπάρχουν μεγάλες ή συστηματικές διαφορές που να δικαιολογήσουν την υπεροχή μίας εκ των τριών.
- Οι μέσοι όροι και οι τυπικές αποκλίσεις και των τριών μεθόδων είναι εντός των πλαισίων της αναμενόμενης υψομετρικής ακρίβειας (0.75 μ.).
- Όλες οι μέθοδοι δημιουργούν ΨΜΕ ψηλότερα από το αληθές, γεγονός που συμφωνεί και με τα αποτελέσματα σύγκρισης και με το χειρωνακτικά συλλεχθέν ΨΜΕ. Επίσης είναι σύμφωνα και τα αποτελέσματα ως προς τα μεγέθη (-0.29 m στην σύγκριση με το χειρωνακτικά συλλεχθέν ΨΜΕ, -0.25 m όπως προκύπτει με την προτεινόμενη μεθοδολογία ελέγχου χωρίς ΨΜΕ). Έτσι προκύπτει ότι ο χειριστής δεν είχε μεγάλο συστηματικό σφάλμα, που όπως έχει αναφερθεί θα μπορούσε να είναι ακόμα και 0.42 m.
- Σε όλες τις περιπτώσεις το 23-24% των σημείων είναι εκτός αναμενόμενης υψομετρικής ακρίβειας (πιν. 4.20), ενώ 6-7% έχει διαφορά πάνω από 1.50 m (πιν. 4.21), δηλαδή βέβαια σφάλματα. Πολλές από αυτές τις διαφορές οφείλονται σε κατακόρυφες επιφάνειες που δεν μπορούν να μοντελοποιηθούν από το ΨΜΕ και ως εκ τούτο προκύπτουν μεγάλες υψομετρικές διαφορές.

ΨΜΕ υπό έλεγχο	***Αρχικά σημεία***	***Φίλτρο 95% σ_o και γωνίας***	***95% dZ***	***Μ.Ο***	***Τυπική απόκλιση***	***Ποσοστό εντός κατωφλιού υψ ακρίβειας (κανονική κατανομή)***
Τετράγωνο	97837	90459	86770	-0,248	0,579	76,46
Παράλληλη Έλλειψη	97901	90500	86783	-0,249	0,576	76,64
Κάθετη Έλλειψη	97971	90610	86641	-0,249	0,572	76,91

Πίνακας 4.21. Σύγκριση σχήματος παραθύρου συνταύτισης με χρήση της προτεινόμενης μεθοδολογίας ελέγχου χωρίς ΨΜΕ αναφοράς.

Είδος DTM	***Ποσοστό σημείων με dZ <0.30m***	***Ποσοστό σημείων με dZ <0.60m***	***Ποσοστό σημείων με dZ <1.50m***	***Ποσοστό σημείων με dZ <3m***	***Ποσοστό σημείων με dZ <5m***
Τετράγωνο	34,73 (39,56)	64,81 (69,99)	93,79 (99,04)	98,82 (100,00)	99,68 (100,00)
Παράλληλη Έλλειψη	34,70 (39,75)	64,67 (70,24)	93,86 (99,08)	98,81 (100,00)	99,69 (100,00)
Κάθετη Έλλειψη	34,74 (40,01)	64,55 (70,58)	93,77 (99,13)	98,82 (100,00)	99,69 (100,00)

Πίνακας 4.22. Ποσοστιαία κατανομή υψομετρικών διαφορών, όπως αυτές υπολογίζονται με την προτεινόμενη μεθοδολογία ελέγχου ΨΜΕ χωρίς ΨΜΕ αναφοράς. Σε παρένθεση οι τιμές όπως αναμένονται σύμφωνα με την κανονική κατανομή.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το γενικό πλαίσιο της διατριβής ήταν η βελτίωση των αλγορίθμων αυτόματης συνταύτισης. Το αντικείμενο εστιάστηκε στην βελτίωση της συνταύτισης χωρίς σχετικό προσανατολισμό ή γενικότερα χωρίς επιπολική γεωμετρία. Παράλληλα διερευνήθηκε και η δυνατότητα ελέγχου των παραγόμενων ΨΜΕ, χωρίς δεδομένα αναφοράς.

Θεωρείται λοιπόν ότι τα στοιχεία πρωτοτυπίας, όπως προέκυψαν από την μελέτη του παραπάνω αντικειμένου, είναι:

- Αυτόματη προσαρμογή μεγέθους παραθύρου, ανάλογα με την πληροφορία στην 'γειτονιά' του σημείου.
- Χρήση ελλειπτικού παραθύρου δυναμικά προσαρμοζόμενου ανάλογα με την ποιότητα και ποσόστητα πληροφορίας στο σημείο
- Ανάπτυξη μεθοδολογίας ελέγχου ΨΜΕ μέσω ορθοφωτογραφιών, χωρίς χρήση δεδομένων αναφοράς.

Στην παρούσα ενότητα περιγράφονται συγκεντρωτικά και συνθετικά τα επιμέρους συμπεράσματα που προέκυψαν σχετικά με το μέγεθος και σχήμα παραθύρου, την στρατηγική συσχέτισης που αναπτύχθηκε καθώς και τις δυνατότητες και τους περιορισμούς του αυτόματου ελέγχου ΨΜΕ χωρίς δεδομένα αναφοράς.

5.1. Μέγεθος παραθύρου.

Από την μελέτη διαφορετικών σταθερών μεγεθών παραθύρων, επιβεβαιώνονται όλες οι σχετικές παρατηρήσεις από την διεθνή βιβλιογραφία, όπως:

- Η ακτίνα σύγκλισης είναι σε άμεση εξάρτηση με το μέγεθος παραθύρου.
- Στα μικρά παράθυρα παρατηρούνται πολλά χονδροειδή σφάλματα λόγω ανεπαρκούς πληροφορίας.
- Η άκριτη αύξηση του μεγέθους του παραθύρου δεν συνεπάγεται μείωση της αβεβαιότητας, παρά μόνο μέχρι κάποιο συγκεκριμένο μέγεθος (ανάλογα με το περιεχόμενο της εικόνας). Μετά ακολουθεί επιδείνωση των αποτελεσμάτων λόγω αδυναμίας του αφινικού μετασχηματισμού να μοντελοποιήσει τις γεωμετρικές παραμορφώσεις.
- Οι περισσότερες αστοχίες εμφανίζονται σε περιοχές με έντονες κλίσεις.
- Στα τεχνητά δεδομένα, η ακρίβεια της συσχέτισης με το βέλτιστο παράθυρο είναι άριστη και καλύπτει τα αυστηρά κριτήρια ακρίβειας που υιοθετήθηκαν.

Η βασική διαπίστωση που προκύπτει από την μελέτη με όλα τα πιθανά μεγέθη παραθύρων είναι ότι το βέλτιστο μέγεθος παραθύρου προκύπτει αρκετά μεγάλο σε σχέση με τα συνήθη που επιλέγονται από τους χρήστες στα εμπορικά πακέτα παραγωγής ΨΜΕ, και έτσι δημιουργεί ερωτηματικά σχετικά με την ορθή χρήση τους.

Η επιλογή του βέλτιστου μεγέθους παραθύρου είναι συνάρτηση της στρατηγικής συσχέτισης, της ακρίβειας των αρχικών τιμών, της περιεχόμενης πληροφορίας στην γειτονιά του σημείου και της κλίσης του εδάφους στο συγκεκριμένο σημείο. Η συγκεκριμένη μελέτη αντιμετωπίζει το πρόβλημα μόνο με χρήση της ποσότητας και ποιότητας της γειτονικής πληροφορίας.

Από την μελέτη σχετικά με το μέγεθος των παραθύρων επιβεβαιώθηκε ότι το ορθό ομόλογο σημείο δεν πρέπει να απέχει περισσότερο από μισό παράθυρο, από την αρχική τιμή, προκειμένου να πετύχει η σύγκλιση. Όταν η αρχική προσέγγιση είναι 3 ή περισσότερα εικονοστοιχεία μακριά από την αληθή, το παράθυρο 7x7 δεν εμπεριέχει το σωστό σημείο, οπότε είναι πολύ δύσκολο η συσχέτιση να συγκλίνει σε αυτό. Στην συγκεκριμένη μελέτη που έχουν επιβληθεί τυχαία σφάλματα έως 6 εικονοστοιχεία, τα χονδροειδή σφάλματα εξαλείφονται στο παράθυρο 15x15, που εμπεριέχει την αρχική τιμή. Αυτή η διαπίστωση χρήζει περαιτέρω διερεύνησης και τεκμηρίωσης.

Στις τεχνητές εικόνες, η εφαρμογή δυναμικού μεγέθους παραθύρου δίνει πολύ καλά αποτελέσματα, αφού το ποσοστό επιτυχών συσχετίσεων εντός των ορίων ακρίβειας που υιοθετήθηκαν είναι περί τα 95-96%. Το ποσοστό αυτό είναι ιδιαίτερα υψηλό, παρά το αυστηρό κατώφλι ακριβείας, 0.21 m για αεροφωτογραφίες κλίμακας 1:12000.

Από τις προταθείσες μεθόδους, καλύτερη αποδεικνύεται εκείνη που χρησιμοποιεί τον τροποποιημένο αλγόριθμο του Förstner. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος είναι σχεδιασμένος με σκοπό τον εντοπισμό σημείων με αρκετή διαφορά γκρίζων τόνων από το περιβάλλον τους. Τα αποτελέσματά της είναι σχεδόν εφάμιλλα με εκείνα του βέλτιστου παραθύρου, αλλά αποφεύγεται η μεσολάβηση του χρήστη και παρεπόμενα πιθανά σφάλματα. Η μόνη επιλογή που κάνει ο χρήστης είναι η επιλογή του μέγιστου πιθανού μεγέθους ανάλογα με το περιεχόμενο της φωτογραφίας. Σε αυτή την περίπτωση δεν υπάρχει περιθώριο λάθους, αφού η επιλογή μεγαλύτερου παραθύρου έχει συνέπεια μόνο την αύξηση του χρόνου επεξεργασίας.

Στα παράθυρα μέσα στα οποία βρίσκεται οριακά η αληθής τιμή, η ελαχιστοτετραγωνική συσχέτιση στην προσπάθεια να "συνταιριάξει" τα δύο παράθυρα καταλήγει σε διορθώσεις που επηρεάζουν πολύ τις παραμέτρους κλίμακας και στροφών στην πρώτη επανάληψη, με αποτέλεσμα στην δεύτερη να επιβάλλονται πολύ μεγάλες διορθώσεις και στις παραμέτρους θέσης και φυσικά η λύση να καταλήγει πολλά εικονοστοιχεία μακριά από την αληθή (χονδροειδές σφάλμα). Η λύση που εφαρμόστηκε και λειτούργησε με επιτυχία είναι η επιβολή μέγιστων διορθώσεων κατά την διάρκεια των επαναλήψεων, ώστε η λύση να μην απομακρύνεται υπερβολικά στις δύο πρώτες επαναλήψεις.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία, σε αντίθεση με άλλες προτάσεις, δεν εντοπίζει τα καλύτερα σημεια για συσχέτιση καταλήγωντας σε συλλογή τυχαίων σημείων, αλλά προσαρμόζει το μέγεθος των παραθύρων ώστε τα σημεία που συλλέγονται σε κορυφές προεπιλεγμένου κανάβου, να έχουν αξιοπιστία και ακρίβεια.

5.2. Σχήμα παραθύρου.

Από τα αποτελέσματα της σύγκρισης σχημάτων που έγιναν με όλα τα μεγέθη παραθύρων, αλλά και μεθόδων δυναμικού προσδιορισμού μεγέθους, προκύπτει ότι η έλλειψη που δυναμικά προσαρμόζεται στην αβεβαιότητα της θεωρίας των ελαχίστων τετραγώνων[1], είναι συστηματικά λίγο καλύτερη από το τετράγωνο. Αυτό το συμπέρασμα αφορά το πλήθος των συσχεισθέντων σημείων, το πλήθος των αστοχιών και την ακρίβεια. Η έλλειψη αυτή, σε σχέση με την έλλειψη προσανατολισμένη κατά την κάθετη διεύθυνση[2] (όπως αυτή υπαγορεύεται από τα ελάχιστα τετράγωνα) δεν έχουν μεγάλες διαφορές και η μεταξύ τους σχέση χρήζει περαιτέρω διερεύνησης.

Τα παραπάνω προκύπτουν από την εφαρμογή όλων των σχημάτων στις τεχνητές εικόνες, με την μεγάλη βελτίωση να εμφανίζεται μεταξύ τετραγώνου και έλλειψης.

Από την εφαρμογή των προτεινόμενων αλγορίθμων σχήματος στις πραγματικές εικόνες, και την σύγκριση τους με το χειρωνακτικά συλλεχθέν ΨΜΕ, προκύπτει ότι οι πρακτικές διαφορές είναι πολύ μικρές. Το τετράγωνο παράθυρο έχει το καλύτερο RMS, και ακολουθούν με μικρή διαφορά οι δύο παραλλαγές της έλλειψης. Στους μέσους όρους η κατάσταση είναι διαφορετική με την κανονική έλλειψη να έχει τον καλύτερο. Σε όλες τις περιπτώσεις το RMS είναι εκτός ορίων της αυστηρής αναμενόμενης ακρίβειας, όπως άλλωστε και των ψηφιακών φωτογραμμετρικών σταθμών.

Με χρήση της προτεινόμενης μεθοδολογίας ελέγχου χωρίς ΨΜΕ αναφοράς στις πραγματικές αεροφωτογραφίες προκύπτει ότι τα τρία σχήματα παραθύρων είναι πρακτικά ισοδύναμα. Παράλληλα επιβεβαιώνεται η μεγάλη και συστηματική απόκλιση του μέσου όρου από την αληθή επιφάνεια, όπως είχε διαπιστωθεί και με την σύγκριση με το χειρωνακτικό ΨΜΕ. Το σύνολο των αποτελεσμάτων σύγκρισης σχήματος δεν δείχνουν συστηματικά προς μία μέθοδο που να είναι έστω και λίγο καλύτερη από τις υπόλοιπες. Κατά συνέπεια δεν μπορεί να διακριθεί καθαρά μία εκ των τριών.

Από τον έλεγχο με τη βοήθεια σχετικού προσανατολισμού προκύπτει ότι ακόμα και χωρίς την χρήση επιπολικής γεωμετρίας ο προτεινόμενος αλγόριθμος λειτουργεί πολύ καλά ενώ τα αποτελέσματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό σχετικού προσανατολισμού με μεγάλη ακρίβεια. Η διαπίστωση αυτή είναι σε συμφωνία με τον αρχικό στόχο δημιουργίας μεθόδου συσχέτισης χωρίς επιπολική γεωμετρία. Επιβεβαιώνεται έτσι η δυνατότητα συσχέτισης χωρίς επιπολική γεωμετρία και ο υπολογισμός σχετικού προσανατολισμού από σημεία συλλεχθέντα για δημιουργία ΨΜΕ.

Μια διαπίστωση που προκύπτει από την εφαρμογή έλλειψης και τετραγώνου σε όλα τα πιθανά μεγέθη παραθύρων είναι ότι η έλλειψη λειτουργεί καλύτερα στα μικρά παράθυρα, ενώ όσο μεγαλώνουν τα παράθυρα οι διαφορές αμβλύνονται. Η διαπίστωση αυτή ισχύει χωρίς την εφαρμογή ορίου μέγιστων

1 κανονική από δω και πέρα χάριν συντομίας

2 κάθετη από δω και πέρα

διορθώσεων στις επαναλήψεις της ελαχιστοτετραγωνικής συσχέτισης. Το γεγονός αυτό σημαίνει ότι η έλλειψη με την δυνατότητα προσανατολισμού προς μία διεύθυνση και την συλλογή περισσότερης πληροφορίας σε αυτήν ξεπερνά το εν λόγω πρόβλημα, χωρίς περιορισμούς μέγιστων διορθώσεων. Έτσι επιβεβαιώνεται η θεωρητική υπόθεση ότι η έλλειψη συμπεριφέρεται καλύτερα από το τετράγωνο.

Ο έλεγχος αλγορίθμων συσχέτισης με παρατηρήσεις χειριστή στις ίδιες φωτογραφίες δεν δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα, αφού οι αναμενόμενες διαφορές μεταξύ χειριστών είναι αντίστοιχες ή και μεγαλύτερες από τις αποκλίσεις της αυτόματης συσχέτισης.

5.3. Στρατηγική συσχέτισης.

Τα αποτελέσματα της τροποποιημένης μεθόδου των Otto-Chau κρίνονται ως ικανοποιητικά. Η κάλυψη και στις δύο περιπτώσεις (τεχνητά και πραγματικά δεδομένα) ήταν πλήρης, ενώ με επιτυχία εξαιρέθηκαν περιοχές με ομοιόμορφους τόνους ή αόρατες περιοχές σε μία από τις φωτογραφίες. Σε ορισμένες περιπτώσεις τα όρια των ομοιόμορφων τόνων παραβιάζονται και ο αλγόριθμος συλλέγει μερικά σημεία με ομοιόμορφους τόνους, τα οποία χρησιμοποιούν μεγάλα μεγέθη παραθύρων και έτσι υπάρχει αρκετή πληροφορία για ασφαλή συνταύτιση. Στην περίπτωση των πραγματικών φωτογραφιών εξαιρέθηκαν με μεγάλη επιτυχία η διαβαθμισμένη περιοχή, τα εικονοσήματα, τα στοιχεία της φωτογραφιάς κ.λπ. Επίσης έχουν εξαιρεθεί περιοχές με ομοιόμορφους τόνους του γκρίζου που ενδεχομένως να οδηγούσαν σε αναξιόπιστη συσχέτιση. Τέτοιες περιοχές είναι τα πυκνά δάση, που η κόμη των δένδρων οδηγεί συχνά σε αστοχίες, και η περιοχή του λατομείου.

Έτσι ο χρήστης μπορεί εύκολα να εντοπίσει επικίνδυνες περιοχές με αραιά σημεία και να επισκεφθεί μόνο αυτές για συμπλήρωση, γλιτώνοντας άσκοπους και χρονοβόρους ελέγχους.

Τα σημεία που συλλέχθηκαν με την προτεινόμενη μεθοδολογία, χωρίς την χρήση επιπολικής γεωμετρίας, αποδεικνύονται επαρκή για υπολογισμό του σχετικού προσανατολισμού των δύο εικόνων, με πολύ καλή ακρίβεια. Κατά συνέπεια η προτεινόμενη μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για συλλογή ομόλογων σημείων τα οποία μπορούν εν συνεχεία να χρησιμοποιηθούν για επίλυση σχετικού προσανατολισμού και δημιουργία ΨΜΕ σε ένα βήμα. Η επίλυση του σχετικού προσανατολισμού με τα σημεία συσχέτισης πλησιάζει περισσότερο τον αληθή σχετικό προσανατολισμό (όπως αυτός υπολογίζεται από τον εξωτερικό προσανατολισμό των δύο φωτογραφιών) από ότι ο σχετικός προσανατολισμός που υπολογίζεται από 18000 χειρωνακτικά συλλεχθέντα σημεία με τον εν λόγω αληθή σχετικό προσανατολισμό. Κατά συνέπεια τα σημεία της συνταύτισης έχουν καλύτερη επίλυση σχετικού από τις χειρωνακτικές μετρήσεις, που στην προκειμένη περίπτωση ήταν λιγότερες από τις μισές του αυτόματου.

5.4. Μέθοδος ελέγχου χωρίς ΨΜΕ αναφοράς.

Η προτεινόμενη μέθοδος δοκιμάστηκε αναλυτικά τόσο στα τεχνητά όσο και στα πραγματικά δεδομένα με τεχνητά παραμορφωμένα ΨΜΕ. Τα αποτελέσματα ήταν πολύ καλά σε όλες τις περιπτώσεις, αφού κατάφερε να ανιχνεύσει με επιτυχία τις τεχνητές παραμορφώσεις και να βελτιώσει το αυτόματα εξαχθέν ΨΜΕ από τα εμπορικά πακέτα φωτογραμμετρίας. Κατά συνέπεια θεωρήθηκε επαρκής για έλεγχο των προτεινόμενων σχημάτων παραθύρου σε πραγματικές φωτογραφίες.

Η συμφωνία της προτεινόμενης μεθόδου με το χειρωνακτικό ΨΜΕ, στους μέσους όρους, στο RMS και την τυπική απόκλιση, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι αφενός η μέθοδος λειτουργεί επαρκώς και αφετέρου ο παρατηρητής του ΨΜΕ αναφοράς δεν είχε μεγάλο συστηματικό σφάλμα.

Επίσης εκείνο που μπορεί να υποστηριχθεί είναι ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος (ανεξαρτήτως χρήσης σχήματος) λειτουργεί εξίσου καλά με εμπορικό λογισμικό, χωρίς χρήση επιπολικής γεωμετρίας, πυραμίδων ή τελεστών σημείων. Αυτό προκύπτει από τους ελέγχους που έγιναν με τα πραγματικά δεδομένα.

Επίσης μπορεί να θεμελιωθεί ότι η προτεινόμενη μέθοδος ελέγχου ΨΜΕ χωρίς δεδομένα αναφοράς μπορεί να λειτουργήσει αρκετά καλά για βελτίωση ΨΜΕ. Αυτό στηρίζεται τόσο στα συνολικά στατιστικά μέτρα, όσο και με την οπτικοποίηση και τον εντοπισμό των σφαλμάτων στις πλέον πιθανές περιοχές (απότομες αλλαγές κλίσης και κατακόρυφες επιφάνειες στο λατομείο, πρανή του δρόμου και σπίτια). Στην περίπτωση ελέγχου απόριψης ή αποδοχής, είναι απαραίτητη η θέσπιση "μονάδας" επιφανείας προς ελέγχο καθώς και συγκεκριμένων κριτηρίων και αντίστοιχων κατωφλιών ελέγχου και απόρριψης.

Ένα ακόμα συμπέρασμα είναι ότι τα αποτελέσματα όλων των εφαρμοσθεισών μεθόδων, αλλά και των εμπορικών πακέτων, δεν ικανοποιούν τα αυστηρά κριτήρια ακρίβειας, με ένα σημαντικό ποσοστό (39 έως

46%) και είναι εκτός απαιτήσεων ακρίβειας. Με υιοθέτηση πιο χαλαρών κριτηρίων ακρίβειας της τάξης του ενός μέτρου τα ποσοστά βελτιώνονται και κυμαίνονται από 25 έως 33%. Από τις συγκεκριμένες αεροφωτογραφίες το σύνηθες προϊόν είναι η δημιουργία ορθοφωτογραφιών κλίμακας 1:5000. Εάν θεωρηθεί ότι η υψομετρική απαίτηση ακρίβειας είναι 2 m, τότε τα αντίστοιχα ποσοστά κυμαίνονται από 2 έως 5% και είναι πλήρως αποδεκτά.

Με βάση την υπόθεση ότι η αβεβαιότητα του παρατηρητή οφείλεται κυρίως σε συστηματικό σφάλμα το οποίο με κατάλληλες διαδικασίες μπορεί να υπολογισθεί και να εφαρμοσθεί αυτόματα στις παρατηρήσεις του, δεν είναι εφικτό οι αυτόματες μέθοδοι να τον υποκαταστήσουν. Η αξιοπιστία του στις παρατηρήσεις και η δυνατότητα επιλογής κατάλληλων σημείων που περιγράφουν την επιφάνεια με τον καλύτερο δυνατό τρόπο είναι ανυπέρβλητη εφόσον χρησιμοποιείται ζεύγος φωτογραφιών. Ο μοναδικός τρόπος να επιτευχθεί καλύτερη αξιοπιστία και ακρίβεια είναι με χρήση πολλαπλών φωτογραφιών.

Συνεπεία αυτού, τα εμπορικά πακέτα που χρησιμοποιούν δύο φωτογραφίες για αυτόματη δημιουργία ΨΜΕ εκτιμάται ότι δεν θα μπορέσουν να ξεπεράσουν τον έμπειρο χειριστή (Karabork et al., 2004), αλλά είναι σε θέση να αποδώσουν ικανοποιητικά σε πληθώρα εφαρμογών, αποτελώντας φθηνή και γρήγορη εναλλακτική λύση, χωρίς μεγάλη αλλαγή στην γραμμή παραγωγής τους.

5.5. Προβλήματα και περιορισμοί στην εφαρμογή της μεθόδου.

Κατά την εφαρμογή όλων των παραπάνω προτεινόμενων μεθόδων αντιμετωπίστηκαν ορισμένα προβλήματα, που δυσχεραίνουν την ευρεία αποδοχή τους.

Τέτοιο πρόβλημα είναι η αδυναμία ελέγχου στις περιοχές κάτω από τα εικονοκέντρα και στην ευθεία τους, που σε μία τυπική πτήση με 20-30% πλάγια επικάλυψη δεν καλύπτεται από άλλες α/φ.

Ένα ανάλογο μειονέκτημα αφορά την στρατηγική συσχέτισης, αφού χρειάζεται αρχικά την χειρωνακτική συλλογή μερικών αρχικών σημείων. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στην συγκεκριμένη εφαρμογή χρειάστηκαν μόλις τρία σημεία για πλήρη κάλυψη, ενώ έχουν προταθεί στη διεθνή βιβλιογραφία μέθοδοι για αυτόματη συλλογή τέτοιων σημείων, αυτοματοποιώντας πλήρως την διαδικασία.

Ο έλεγχος με την προτεινόμενη μέθοδο δεν μπορεί να ελέγξει το πραγματικό έδαφος όταν καλύπτεται από δέντρα. Σε κάθε περίπτωση ο έλεγχος και η διόρθωση αφορούν το μοντέλο επιφάνειας (και όχι εδάφους).

Το κυριότερο πρόβλημα για την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου ελέγχου ΨΜΕ χωρίς δεδομένα αναφοράς είναι ο ορισμός της μονάδας ελέγχου και τα κριτήρια αποδοχής ή απόρριψης. Σε γενικές γραμμές ο μέσος όρος των συσχετισθέντων σημείων είναι εντός των αναμενόμενων ορίων ακρίβειας, γεγονός το οποίο οφείλεται στο μεγάλο πλήθος τους που "απορροφά" τα χονδροειδή σφάλματα. Με αυτό τον τρόπο όμως δεν εξασφαλίζεται ότι όλα τα τμήματα του ΨΜΕ είναι εντός προδιαγραφών, αφού μπορεί σε ιδιόμορφες περιοχές να εμφανίζονται προβλήματα (πχ. λατομείο, ημιαστικές περιοχές κ.λπ).

Έτσι θα πρέπει να καθοριστούν επακριβώς τα ακόλουθα:

- μέγεθος εικονοστοιχείου ορθοφωτογραφιών ελέγχου σε σχέση με τις αρχικές α/φ
- η πυκνότητα των σημείων ελέγχου (σημεία συσχέτισης) επί των ορθοφωτογραφιών
- ο μεμονωμένος ή ομαδοποιημένος έλεγχος κατωφλιού ακρίβειας (εφαρμογή σε κάθε ένα σημείο ή σε "γειτονιές") καθώς και το μέγεθος των ομάδων αυτών
- τα στατιστικά μέτρα που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο
- συσχέτιση των προδιαγραφών ακρίβειας ΨΜΕ με τα στατιστικά μεγέθη ελέγχου

5.6. Γενικά συμπεράσματα.

Σε γενικές γραμμές τα εξαχθέντα συμπεράσματα θα μπορούσαν να συνοψισθούν στα παρακάτω:

4.η δυναμική επιλογή παραθύρου είναι επαρκής,

5.η στρατηγική επιτυχής,

6.το σχήμα αμφίβολο,

7.η μέθοδος ελέγχου επιτυχής.

Τα μειονεκτήματα της ελαχιστοτετραγωνικής συσχέτισης και οι βελτιώσεις με τον συγκεκριμένο

αλγόριθμο φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Μειονέκτημα	Προτεινόμενη λύση	Εκτίμηση εφαρμογής
Μεγάλη ευαισθησία στις αρχικές τιμές	Χρήση στρατηγικής συσχέτισης με μικρά βήματα ώστε το μέγεθος παραθύρου να εμπεριέχει το αληθές ομόλογο και η συσχέτιση να είναι επιτυχής. Παράλληλα, για να μην δημιουργούνται προβλήματα με εμπόδια μικρού πλάτους, χρησιμοποιούνται πολλαπλάσιες αποστάσεις του καθορισθέντος βήματος	Καλή στα ζεύγη που εφαρμόστηκε. Εξαρτάται από τις αρχικές τιμές, και το καθορισμένο βήμα κανάβου.
Πιθανότητα πολλαπλών λύσεων στην γειτονιά και πιθανή σύγκλιση σε λάθος σημείο σε περίπτωση επαναλαμβανόμενων προτύπων	Επιβολή μέγιστων διορθώσεων στις επαναλήψεις των ελαχίστων τετραγώνων	Πολύ καλή ιδίως στα μικρά παράθυρα
Παραδοχή ότι όλα τα εικονοστοιχεία έχουν την ίδια παράλλαξη (ή αδυναμία μοντελοποίησης από το γεωμετρικό μοντέλο)	Χρήση δυναμικού μεγέθους παραθύρου, ώστε να είναι μικρό όπου υπάρχει αρκετή πληροφορία και να αποφεύγονται κατά το δυνατόν τα σφάλματα αυτού του τύπου	Μέτρια αφού τα προβλήματα στις περιοχές με μεγάλες κλίσεις εξακολουθούν να υφίστανται, γιατί δεν υπάρχει εγγύηση ότι σε αυτές θα χρησιμοποιηθούν μικρά παράθυρα
Χρήση λανθασμένου εσωτερικού και σχετικού προσανατολισμού (στις περιπτώσεις που χρησιμοποιείται επιπολική γεωμετρία)	Ικανότητα του αλγορίθμου να συλλέγει σημεία χωρίς χρήση επιπολικής γεωμετρίας ώστε εν συνεχεία να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επίλυση του σχετικού προσανατολισμού	Πολύ καλή
Περιοχές που είναι ορατές μόνο σε μία εκ των δύο εικόνων και κατά συνέπεια καθιστούν αδύνατη την συσχέτιση	Η στρατηγική συσχέτισης κατάφερε να αποφύγει τις αόρατες περιοχές ακόμα και πίσω από δέντρα.	Πολύ καλή αφού δεν υπήρχαν σημεία που να συσχετίσθηκαν λανθασμένα ενώ εμφανίζονται μόνο στην μία φωτογραφία
Χαμηλός λόγος σήματος προς θόρυβο που μπορεί να οδηγήσει σε αργή σύγκλιση ή σε σύγκλιση σε τοπικό και όχι ολικό ελάχιστο	Επιβολή μέγιστων διορθώσεων στις επαναλήψεις των ελαχίστων τετραγώνων σε συνδυασμό με την στρατηγική συσχέτισης	Καλή αλλά παραμένουν αρκετές αστοχίες, έστω και με τα αυστηρά κατώφλια ακρίβειας

Η εφαρμογή των ελλειπτικών παραθύρων αν και έχει πολύ καλύτερα αποτελέσματα στα τεχνητά δεδομένα, δεν έχει την ίδια απόδοση στα πραγματικά. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με τις μικρές διαφορές μεταξύ τους δεν μπορεί να οδηγήσει σε ασφαλή συμπέρασματα σχετικά με την βελτίωση ή όχι που μπορεί να επιφέρει ο αλγόριθμος κατά μήκος γραμμικών σχηματισμών.

5.7. Πιθανές εφαρμογές.

Παρόλο που οι πιθανές εφαρμογές των προτεινόμενων μεθόδων είναι προφανείς, αναφέρονται παρακάτω για λόγους πληρότητας.

- Ταυτόχρονη επίλυση σχετικού προσανατολισμού και δημιουργία ΨΜΕ από τα συλλεχθέντα σημεία, αφού αποδείχθηκε με ασφάλεια ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αυτό τον σκοπό
- Έλεγχος, διόρθωση και ενημέρωση ΨΜΕ με χρήση της προτεινόμενης μεθοδολογίας ελέγχου χωρίς δεδομένα αναφοράς

- Χρήση χωρίς τροποποιήσεις σε ποικιλία αεροφωτογραφιών με σύγχρονες ψηφιακές φωτομηχανές αλλά και δορυφορικές εικόνες. Τα συσχετισθέντα σημεία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για επίλυση σχετικού προσανατολισμού, η οποία μπορεί να γίνει σε ανεξάρτητο στάδιο.
- Χρήση σε μεθόδους παρακολούθησης γραμμών (δρόμων) όπου η εφαρμογή ελλειπτικού παραθύρου μπορεί να βελτιώσει πολύ τις αστοχίες.

5.8. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

5.8.1. Διερεύνηση κριτηρίων τερματισμού ελαχιστοτετραγωνικής συσχέτισης.

Άξια διερεύνησης είναι τα κριτήρια τερματισμού της ελαχιστοτετραγωνικής συσχέτισης ανάλογα με την περιεχόμενη στην γειτονιά πληροφορία. Τα κριτήρια τερματισμού των επαναλήψεων βάσει ελαχίστων διορθώσεων δεν είναι ρεαλιστική σε περιπτώσεις ομοιόμορφων τόνων. Το ίδιο ισχύει και για τις επαναλήψεις. Η σύνδεση της πληροφορίας στην γειτονιά του σημείου με τα κριτήρια τερματισμού των επαναλήψεων θα βοηθούσε στην ομοιόμορφη ακρίβεια όλου του μοντέλου.

5.8.2. Συνδυασμός των τεχνικών συσχέτισης στη φωτογραμμετρία και στην μηχανική όραση.

Ο συνδυασμός των μεθόδων μεγέθους και σχήματος παραθύρου όπως περιγράφονται από τους Veksler (2001), Agrawal et al. (2003), Kanade & Okutomi (1994) με την ελαχιστοποίηση του αθροίσματος των απολύτων διαφορών (LAD) που επιλέγει μόνο εκείνα τα εικονοστοιχεία από το παράθυρο που έχουν παρόμοια παράλλαξη, υπερβαίνοντας το πρόβλημα το παράθυρο να περιέχει δύο πληθυσμούς με διαφορετική παράλλαξη, μπορεί να καταλήξει σε μια μέθοδο που να ξεπερνάει το πρόβλημα περιοχών αλλαγής κλίσεων ή έντονων κλίσεων. Ουσιαστικά αμφότερες οι μέθοδοι προσεγγίζουν το ίδιο πρόβλημα. Η πρώτη με χρήση κατάλληλου μεγέθους και σχήματος παραθύρου και η δεύτερη με επιλογή εκείνων μόνο των εικονοστοιχείων που ανήκουν στον ίδιο πληθυσμό. Έτσι ο συνδυασμός τους ίσως δώσει πολύ καλά αποτελέσματα.

5.8.3. Επιλογή κατάλληλης κατανομής για τον έλεγχο των αποτελεσμάτων

Η υπόθεση της κανονικής κατανομής των διαφορών σε περιπτώσεις ελέγχου ΨΜΕ χρησιμοποιείται ευρέως από όλους τους ερευνητές του αντικειμένου.

Στην παρούσα εργασία, ο έλεγχος κανονικής κατανομής με το Jarque-Bera τεστ έδωσε αρνητικά αποτελέσματα για όλα τα δείγματα. Το γεγονός αυτό επαληθεύτηκε και από την επίθεση της κατανομής των πραγματικών διαφορών στην καμπύλη της κανονικής κατανομής με αντίστοιχο μέσο όρο και τυπική απόκλιση. Η καμπύλη που σχηματίζεται έχει περισσότερες τιμές κοντά στο μέσο όρο, αλλά οι αστοχίες εκτείνονται πολύ μακριά από αυτόν και έχουν σημαντική συχνότητα (σε σχέση με την κανονική κατανομή). Επίσης επαληθεύτηκε και από τα αριθμητικά μεγέθη του πίνακα 4.22, όπου αντιπαραβάλλονται οι αναμενόμενες αστοχίες από την κανονική κατανομή με τις πραγματικές.

Έτσι οι έλεγχοι και η μεθοδολογία τους που εφαρμόζεται ευρέως σε εγχειρίδια ελέγχου γεωγραφικών δεδομένων, με βάση την υπόθεση ότι τα σφάλματα ακολουθούν κανονική κατανομή, χρήζει διερεύνησης.

Η υπόθεση της κανονικής κατανομής υιοθετήθηκε την εποχή που ο έλεγχος ήταν δειγματοληπτικός και λίγα τα σημεία ελέγχου. Ο μικρός αριθμός των σημείων ελέγχου (το πολύ μερικές δεκάδες) δεν αποτελούσαν ικανό δείγμα ελέγχου της κατανομής και έτσι χρησιμοποιήθηκε η υπόθεση της κανονικής κατανομής. Η χρήση GPS διευκόλυνε την συλλογή σημείων ελέγχου, ο έλεγχος έγινε πιο συστηματικός, αλλά και σε αυτή την περίπτωση τα σημεία δεν ξεπερνούσαν τις μερικές εκαντοτάδες. Μόνο σε περιορισμένες εργασίες, όπου ΨΜΕ συγκρίνονταν με ΨΜΕ αναφοράς, υπήρχε ικανό δείγμα σημείων (πολλές χιλιάδες), αλλά σε καμία από αυτές δεν γίνεται αναφορά στο γεγονός ότι η κανονική κατανομή δεν είναι κατάλληλη για αυτούς τους ελέγχους, αφού φαίνεται ότι δεν ακολουθείται. Η ευκολία χρήσης της συγκεκριμένης κατανομής σε συνδυασμό με το ότι η αναζήτηση κάποιας άλλης καλύτερης αποτελεί δύσκολο έργο δίνουν απάντηση στο ζήτημα. Η διπλωματική εργασία της Παπασάικα (2002) κάνει εκτενή αναφορά σε αυτό το γεγονός και δοκιμάζει ελέγχους με άλλες κατανομές.

5.8.4. Χρήση πολλαπλών φωτογραφιών

Η αυξανόμενη χρήση ψηφιακών αισθητήρων (γραμμικών ή επιφανειακών) στις αεροφωτογραφήσεις ευνοεί την συσχέτιση προσφέροντας περισσότερες λήψεις για το ίδιο σημείο, ενώ δυσχεραίνει την εφαρμογή της επιπολικής γεωμετρίας.
Έτσι το πλεονέκτημα της αντίληψης του χειριστή μπορεί να αντισταθμιστεί από τις πολλαπλές φωτογραφίες. Αυτός είναι και ο μόνος τρόπος να ξεπεραστεί ο χειριστής σε αξιοπιστία. Επίσης οι σύγχρονες ψηφιακές εικόνες έχουν μεγαλύτερο δυναμικό εύρος που η οθόνη δεν μπορεί να το εκμεταλλευτεί κατάλληλα (ούτε και ο χειριστής κατά συνέπεια), ενώ οι αλγόριθμοι συσχέτισης μπορούν. Επίσης οι ψηφιακοί αισθητήρες έχουν πολύ υψηλό λόγο σήματος προς θόρυβο με αποτέλεσμα να εξαλείφεται ένα βασικό πρόβλημα της συσχέτισης. Προς το γεγονός αυτό συμβάλει και η ενιαία αντίθεση των ψηφιακών εικόνων τους που δεν παρουσιάζουν μεγάλες μεταβολές από εικόνα σε εικόνα. Κατά συνέπεια οι νέοι ψηφιακοί αισθητήρες αναμένεται να διευκολύνουν πολύ την συσχέτιση.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Συντομογραφίες.

BuL	Bildmessung und Luftbildwesen: Zeitschrift fur Photogrammetrie und Fernerkundung
CGIP	Computer Graphics and Image Processing
CVGIP	Computer Vision, Graphics and Image Processing
CVPR	IEEE Computer Vision and Pattern Recognition
FPPD	Proceedings of the Intercommission conference on Fast-Processing of Photogrammetric Data
IAPRS	International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing
ICCV	IEEE International Conference in Computer Vision
IJCV	IEEE International Journal of Computer Vision
PERS	Photogrammetric Engineering and Remote Sensing
Phia	Photogrammetria
Phot. Rec.	Photogrammetric Record
SPIE	Proceedings of the International Society for Optical Engineering

Στην περίπτωση αναφοράς σε ιστοσελίδα, εντός παρένθεσης η ημερομηνία τελευταίας επίσκεψης.

Ackermann F., Krzystek P., 1991: MATCH-T: Automatic mensuration of digital elevation models, Proceedings, "Sistemas Fotogramétr. Analíticos Dig.: Una nueva generación emergente", Soc. Esp. de Cart., Fotogram. y Teledetección, Barcelona, 67-74.

Ackermann, F., 1984. Digital image correlation: performance and potencial application in photogrammetry. Phot. Rec., 11(64), pp. 429-439.

Ackermann, F., 1994. Digital elevation models - techniques and application, quality standards, development. *IAPRS.* 30(4):421-432

Ackermann, F., 1996. Some considerations about automatic digital aerial triangulation. Proc. OEEPE Workshop on the Applications of Digital Photogrammetric Workstations. Lausanne, Switzerland, March. OEEPE Official Publication No. 33. Http://dgrwww.epfl.ch/PHOT/publicat/wks96/Art_2_5.html (04.05.2001)

Ackermann, F., Schneider, W., 1992. Experience with automatic DEM generation. IASPRS, 29(B4), Washington, pp. 986-989.

Adkins, K., F., Merry, C., J., 1994. Accuracy assessment of elevation data sets using the Global Positioning System. PERS, 60/2, pp. 195-202.

Agouris, P., Stefanidis, A., Gyftakis, S., 2001. Change detection in road segments. PERS 67:(12), pp:1391-1399.

Agrawal, M., Davis, L., 2003. Window-Based, discontinuity preserving stereo. CVPR, June 2003.

Angleraud, C., Becek, K., Trinder, J.C., 1992. DEM determination from SPOT. IASPRS, Washingthon DC, Vol.29(4):969-973

Apaphant, P., Bethel, J., 2000. Integration of object and feature matching for object surface extraction. IAPRS, Vol. 33, Supplement B3, Amsterdam, pp. 4-10.

Atkinson, K., B., 1996. Close range photogrammetry and machine vision. Whittles Publishing, Caithness. 371 pages.

Baillard, C., Maître, H., 1999. 3-D reconstruction of urban scenes from aerial stereo imagery: A focusing strategy.Computer Vision and image Understanding, Vol. 76(3):244-258

Ballard, D., H., 1981. Generalizing the Hough transform to detect arbitrary shapes. Pattern Recognition, 13(2), pp. 111-222.

Ballard, D., H., Brown,C., M., 1982. Computer Vision. Prentice-Hall, Inc.

Baltsavias, E., 1999. A comparison between photogrammetry and laser scanning. ISPRS Journal of

Photogrammetry & Remote Sensing, 54 (1999), pp. 83-94.

Baltsavias, E., P., 1991. Multiphoto geometrically constraint matching. Ph.D. thesis, Institute of geodesy and Photogrammetry, Zurich, pages 221.

Baltsavias, E., P., Kaeser, C., 1998. DTM and Orthoimage Generation - A Thorough Analysis and Comparison of Four Digital Photogrammetric Systems. Paper presented at the ISPRS Com. IV Symposium, 7.-10. September, Stuttgart, Germany. In IAPRS, Vol. 32, Part 4, pp. 42-51.

Baltsavias, E., P., Stallmann, D., 1993. SPOT stereo matching for digital terrain model generation. Proc. Of 2nd Swiss Symposium on Pattern Recognition and Computer Vision, Zurich 19993, pp. 61-72.

Barnard, S., T., Thopson, W., B., 1980. Disparity analysis of images. IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence, Vol. PAMI-2, No 4, pp. 333-340.

Belhumeur, P., N., 1996. A abyesian approach to binocular stereopsis. International Journal of Computer Vision (IJCV), 19(3):237-262.

Benard, M., 1984. Automatic Stereophotogrammetry: A method based on feature detection and dynamic programming. Phia 39, pp. 169-181.

Benard, M., Boutaleb, A., K., Kolbl, O., Penis, C., 1986. Automatic Stereophotogrammetry: Implemantation and comparison of classical correlation methods and dynamic programming based techniques. IAPRS Vol. 26, Part C/3, pp 131-140, Rovaniemi.

Bobick, A., F., Intille, S., S., 1999. Large occlusion stereo. International Journal on Computer Vision (IJCV), 33(3):181-200.

Boochs, F., Heinz, G., 1999. Precise target location using image matching technique. Proceedings of the IASTED International Conference signal and image processing, Oct. 18-21, Nassau, Bahamas.

Börlin, N., 2002. Improving the robustness of least squares template matching with a line-search algorithm. Proc. ISPRS Com V Symposium, 2-6 Sept. Corfu, Greece, pp:7-11

Bosemann, W., 1996. The optical tube measurement system OLM – Photogrammetric methods used for industrial automation and process control. IAPRS, Vol. 31, Part B5. Vienna 1996. 55-58

Bosemann, W., Sinnreich, K., 1994. An Optical 3D tube measurement system for quality control in industry. Automated 3D and 2D vision. SPIE 2249:192-199

Brown, L., G., 1992. A survey of image registration techniques. ACM computing surveys, Vol. 24, No. 4 December 1992, pp 325:376

Burt, P., Julesz, B., 1967. Extension of Panum's fusional area in binocularly stabilized vision. Kournal of the optical society of America, 57:819-830.

Calitz, M., F., Rűther, H., 1996. Least absolute deviation (LAD) image matching. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 51, pp. 223-229

Collins, R., 1996. A space-sweep approach to true multi-image matching. Proceedings of 1996 IEEE Computer Society Conference on Pattern Recognition, San Francisco, CA, pp. 358-363.

Cox, I., J., 1994. A maximum likelihood n-camera stereo algorithm. In Proceedings of International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 733-739, Seattle, Washington, 1994.

Cox, I., J., Higorani, S., L., Rao, S., B., Maggs, B., M., 1996. A maximum likelihood stereo algorithm. Computer Vision and Image Understanding, 63(3):542-567, May 1996.

Cox, I., J., Hingorani, S., Maggas, B., M., Rao, A., B., 1992. Stereo without disparity gradient smoothing: a Bayesian sensor fusion solution. In D. Hogg and R. Boyle, editors, Proceedings of British Machine Vision Conference, pp. 337-346, Leeds, UK, September 1992.

Cross, P. A.,1990. Advanced Least Squares Applied to Position-Fixing. Polytechnic of East London, London, p. 205

Dare, P., M., 2004. Y Investigation of geometric constraints for matching high resolution satellite images. IAPRS, Proceedings XXth Congress, Com. III, Instabul.

Day, T., Muller, J.P., L., 1988. Quality assessment of digital elevation models produced by automatic stereomatchers from SPOT image pairs.

Ebner, H., Heipke, C., 1988. Intergration of digital image matching and object surface reconstruction. IAPRS, Vol. 27(2), Part B11, pp. 534-545

Elaksher, A., F., Bethel, J., S., Mikhail, E., M., 2003. Roof Boundary extraction using multiple images. Photogrammetric Record, 18(101):27-40.

Favey, E., Pateraki, M., Baltsavias, E., P., Bauder, A., Bosch, H., 2000. Surface modelling for apline glacier monitoring by airborne laser scanning and digital photogrammetry. IAPRS, Vol. 33. Amsterdam, 2000.

Federal Geographic Data Committee, 1998. Geospatial Position Accuracy Standards Part 3: National Standard for Spatial Data Accuracy, FGDC-STD-007.3-1998, Federal Geographic Data Comitee, Washington, D.C. http://www.fgdc.gov/publications/documents/standards/endorsed.html (08.9.2003)

Fischler, M., Bolles, R., 1981. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. Communications of the ACM 24 (6) , 381–395.

Förstner, W., 1982. On the geometric precision of digital correlation. IAPRS (Proceedings ISPRS Com. III Symposium, Rovaniemi, Finland, June 1982), 24(3), pp. 176-189.

Förstner, W., 1986. A feature based correspondence algorithm for image matching and least squares matching. IAPRS, Vol. 26, Part B3, Rovaniemi.

Förstner, W., Gulch, E., 1987. A fast operator for detection and precise location of distinct points, corners and centers of circular features. Proceedings ISPRS Intercommission Workshop, Interlaken 1987, pp. 281-305.

Fox, A., J., Gooch, M., J., 2001. Automatic DEM generation for Antarctic terrain. Phot. Rec. 17(98):275-290.

Fraser, C., S., Dare., P., M., Yamakawa, T., 2004. Digital surface modelling from SPOT 5 HRS imagery using the affine projective model. IAPRS, Proceedings XXth Congress, Com. I/2, Instabul, pp. 385-388.

Fusiello, A., Roberto, V., 1997. Efficient stereo with multiple windowing. IEEE, Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp.858-863.

Geiger, D., Ladendorf, B., Yuille, A., 1995. Occlusions and binocular stereo. IJCV, 14(3):211-226.

Geiger, D., Ladendorf, B., Yuille, A., 1995. Occlusions and binocular stereo. International Journal on Computer Vision, 14:211-226, 1995.

Georgopoulos, A., Skarlatos, D., 2003. A novel method for automating the checking and correction of digital elevation models using orthophotograps. Photogrammetric Record, 18(102):156-163.

Georgopoulos, A., Skarlatos, D., 2003. A novel method for automating the checking and correction of digital elevation models using orthophotograps. Photogrammetric Record, 18(102):156-163.

Ghaffary, B., K., 1985. A review of image matching techniques. SPIE 596 pp. 164-172, Cannes.

Greenfeld, J., Shecnk, T., 1989. Experiments with edge-based stereo matching. PERS, 55(12), pp 1771-1777.

Grimson W., E., L., 1984. Binocular shading and visual surface reconstruction. CVGIP 28, pp. 19-43.

Grimson W., E., L., 1985. Computational experiments with a feature based stereo algorithm. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 7(1), pp 17-43.

Gruen, A., 1985. Adaptive least-squares correlation: a powerful image matching technique. South Africa Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Cartography, 14(3), 175-187.

Gruen, A., Agouris, P., 1994. Linear feature extraction by least squares template matching constrained by internal shape forces. IAPRS, 30(3/1):316-322.

Gruen, A., Baltsavias, E., 1987. High-Precision image matching for digital terrain model generation. Phia, 42, pp. 97-112.

Gruen, A., Baltsavias, E., P., 1986. High precision image matching for digital terrain model generatin. IAPRS 26(3/1):284-296.

Gruen, A., Stallmann, D., 1992. High accuracy matching of object edges. Proc. SPIE, "Videometrics", Vol. 1820, pp. 70-82.

Gruen, A., W., Baltsavias, E., P., 1988. Geometrically constrained multiphoto matching. PERS, 54(5), pp. 633-641.

Guelch, E., 1988. Results of test on image matching of ISPRS WG III/4. IASPRS, Vol 27(B4), Com III, Kyoto. pp. 254-271.

Habib, A., F., Lee, Y., Morgan, M., 2001. Surface matching and change detection using a modified Hough transformation for robust parameter estimation. Phot. Rec. 17(98):303-315.

Hannah, M., J., 1988. Digital Stereo Image Matching Techniques. IASPRS, Vol. 27, Part (B4), Com III, Kyoto. Pp280-293

Hannah, M., J., 1989. A system for digital image matching. PERS, 55(12), pp. 1765-1770.

Harris, C., G., Stephens, M., 1988. A combined corner and edge detection. Proceedings of the 4th ALVEY vision conference, University of Manchaster, England, pp 147-151.

Harvey, M., Mustaffar, M., 2000. Repercussions of using surface models of greater fidelity in area-based matching. IAPRS, Vol. 33, Part B5. Amsterdam 2000.

Hattori, S., Mori, C., Uschida, O., 1986. A coarse-to-fine correlation algorithm considering occlusions. IAPRS Vol. 26, Part 3/1, pp. 317-328, Rovaniemi.

Heipke, C., 1992. A global approach for least squares image matching and surface reconstruction in obect space. PERS, 58(3):317-323.

Heipke, C., 1996. Overview of image matching techniques. OEEPE Workshop, "Applications of Digital Photogrammetric Workstations", Lausanne, Switzerland. http://phot.epfl.ch/research/publications.htm (16.11.2003)

Heipke, C., 1997. Automation of interior, relative and absolute orientation. ISPRS Journal Photogrammetry and Remote Sensing 52(1):1-19.

Helava, U., 1978. Digital correlation in photogrammetric instruments. Phia, 34, pp. 19-41.

Helava, U., V., 1988. Object space least squares correlation. IAPRS, Vol. 27, Part B4, Com III, Kyoto, pp 321-331.

Helava, U., V., 1988b. Object-space least squares correlation. PERS 54(6):711-714.

Hobrough G., L., 1978. Digital on-line correlation. BuL 46(3), pp. 79-86.

Hobrough, G. 1959. Automatic stereoplotting. PERS, 25(5), pp. 763-769.

Hobrough, G., 1978. Digital on-line correlation. Bildmessung und Luftbildwesen, 46(3), 79-86.

Huang, J-S., Liu, H-C, 1997. Stereo vision using a microcanonical mean fielf annealing neural network. Computer Neural Systems. Vol. 8, pp 87-104.

Hummel, R., Zucker, S., 1983. On the foundations of relaxation and labeling process. IEEE Transactinos on Pattern Analysis and Machine Intelligence. (5):267-287

ISM, 1998. The fundamentals of Digital Photogrammetry. ISM International Systemap Corporation, Canada. 54 pages.

Joinville, O., D., Maitre, H., Maillet, G., Roux, M., 2004. How to design DEM's assessment maps. IAPRS, Proceedings XXth Congress, Com. II, Instabul.

Kaeser, Chr., Eidenbenz, Chr., Baltsavias, E.P., 1998. Evaluation and Testing of Several Digital Photogrammetric Systems for System Acquisition by a National Mapping Agency. Paper presented at the ISPRS Com. II Symposium, 13.-17. July, Cambridge, UK. In IAPRS, Vol. 32, Part 2, pp. 140-148.

Kanade, T., Okutomi, M., 1994. A stereo matching algorithm with an adaptive window: Theory and

experiment. Proc. IEEE Transactions on Pattern Analysis and machine intelligence, 16(9):920-932.

Kang, S., B., Szeliski, R., Chai, J., 2001. handling occlusions in dense multi view stereo. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Dec. 2001. http://citeseer.nj.nec.com/cache/papers/cs/26309/http:zSzzSzwww.cs.cmu.eduzSz~jchaizSzpaperszSzcvpr01-stereo.pdf/handling-occlusions-in-dense.pdf (25.02.2004)

Karabork, H., Yildiz, F., Coskum, E., Yilmaz, H., M., Yakar, M., 2004. Investigation of accuracy for digital elevation models generated with different methods in photogrammetry. IAPRS, Proceedings XXth Congress, Part B3, Instabul, pp. 156-161.

Karara, H., M., 1989. Non-Topographic Photogrammetry, second edition. American Society of Photogrammetry and remore Sensing, Virginia. 445 pages.

Karras, G., E., Mavrogenneas, N., Mavrommati, D., Tsikonis, N., 1998. Tests on automatic DEM generation in a digital photogrammetric workstation. IASPRS, 32(2):136-139.

Kim, T., Choi, S., D., 1997. Selection of an optimum patch for an area-based stereo matching algorithm. Proc. of IGARSS 97, Singapore, 4-8 August, vol. 4, pp. 1492-1494.

Kim, T., Muller J.-P., 1995. Automated building height estimation and object extraction from multi-resolution imagery. Intergrating Photogrammetric Techniques with Scene Analysis and Machine Vision II, Orlando, SPIE, Vol.2486:267-276.

Kim, T., Park, W., Lee, H., Y., 1998. For better automation in DEM generation from satellite images: Fuzzy logic approach for the determination of match quality. ISPRS Com III Symposium on object Recognition and scene classification from multispectral and multisensor pixels, Ohio, 1998, Vol. 32/3.

Koch, R., 2003. 3D-Scene modeling from image sequences. ISPRS Archives, Vol. 34, Part 3/W8, Munich, 17-19 Sept, 2003.

Kolbl, O., Boutaleb, A., K., Penis, C., 1987. A concept for the automatic derivation of a digital terrain model on the Kern DSR-11. FPPD, pp. 306-317.

Kolmogorov, V., Zabih, R., 2001. Computing Visual Correspondence with occlusions via Graph cuts. Proc. Int. Conference in Computer Vision, 2001. pp. 508-515

Kostkova, J., 2002. Sterescopic Matching: Problems and Solutions. PhD Thesis Proposal, Czech Technical University, Center for machine perception, Department of Cybernetics. Διαθέσιμο από ftp://cmp.felk.cvut.cz/pub/cmp/articles/kostkova/Kostkova-TR-2002-13.pdf (25.02.2004).

Kraus, K., 1993. Photogrammetry, Volume 1. Dümmler, Bonn, pages, 402.

Kraus, K., 1997. Photogrammetry, Volume 2, Advanced methods and applications. Dümmler, Bonn, pages, 466.

Kreiling, W., 1976. Automatische Hertellung von Höhenmodellen und Orthophotos aus Stereobildern durch digitale Korrelation. Diss. Fakultät für Bauingenieur und Vermwssungswesen, Universität Karlsruhe.

Krupnik, A., Schenk, T., 1997. Experiences with matching in the object for aeriotriangulation. ISPRS Journal of Photo-grammetry and Remote Sensing 52 (4), 160-168.

Krzystek, P., 1995. Generation of digital elevation models – 2nd course in digital photogrammetry. Chapter 7. Notes, February 1996. Bonn. Pages 23.

Krzystek, P., 1998. On the use of matching techniques for automatic aerial triangulation. ISPRS Com III Symposium on object Recognition and scene classification from multispectral and multisensor pixels, Ohio, 1998, Vol. 32/3.

Lang, F., Förstner, W., 1995. Matching Techniques – 2nd course in digital photogrammetry. Chapter 4. Notes, February 1995, Bonn. Pages 39

Levine, M., D., O'Handley, D., Yagi, G., M., 1973. Computer determination of depth maps. GCIP, 2(4):131-150

Ley, R., G., 1988. Some aspects of height extraction from SPOT imagery. Phot. Rec. 12(72):823-832.

Lhuillier, M., Quan, L., 2000. Robust Dense Matching Using Local and Global Geometric Constraints. Proceedings of the IAPR International Conference on Pattern Recognition, Barcelone, Spain, September 2000, Volume 2, pages 968-972.

Li, J., C., Schenk, T., 1990. Aerial image matching based on zero-crossings and least-squares correlation. Technical Notes in Photogrammetry, No. 9 Dept. Of Geodetic Science and Surveying. The Ohio State university, Colombus, OH.

Li, M., 1988. High precision relative orientation using the feature based matching techniques. ISPRS, 27(B4), Com III, Kyoto, pp456-465

Li, M., 1991. Hierarchical multipoint matching. PERS, 57(8), pp. 1039-1047.

Li, M., X., 1989. Hierarchical multi-point matching with simultaneous detection and location of breaklines. Ph.D. Thesis, Department of Photogrammetry, Royal Institute of Technology, Stockholm. 177 pages.

Li, Z., Gruen, A., 2004. Automatic DSM generation from linear array imagery data. IAPRS, Proceedings XXth Congress, Com. III, Instabul.

Li., M., 1986. A comparative test of digital elevation model measurement using the Kern DSR-11 analytical plotter. In: Torlegard (ed.) 1987.

Lloyd, S., A., haddow, E., R., Boyce, E., R., 1987. A parallel binocular stereo algorithm Utilizing Dynamic programming and relaxation labelling. CVGIP 39, pp 202-225.

Lu, Y., Kubik, K., 2000. Stereo image matching using robust estimation and image analysis techniques for DEM generation. IAPRS, Vol. 33, Part B3, Amsterdam, pp. 520-527.

Lue, Y., Novak, K., 1992. RG-DW image matching scheme and its application. IASPRS, Vol 29, Part B3, Com III, Washington DC. 813-819

Maas, H., G., 1996. Automatic DEM generation by multi-image feature based matching. IAPRS, 31(B3):484-489.

Malz, R., W., 1996. "Free-flying" 3-D sensors for efficient close-range measurement and reverse engineering. IAPRS, Vol. 31, Part B5. Vienna 1996. 336-346.

Marr, D., Poggio, T., 1976. Cooperative computation of stereo disparity, Science, Vol. 194. pp. 209-236.

Marr, D., Poggio, T., 1977. A theory of human stereo vision. A.I. memo 451, Artificial Intelligence Lab, Massachusetts Institute of Technology, November.

Marr, D., Poggio, T., 1979. A computational theory of human stereo vision. Proceedings Royal Society London B, Vol. 204, pp. 301-328.

Maruya, M., Nemoto, K., Takashima, Y., 1992. Texture based 3-D shape reconstruction from multiple stereo images. Proceedings of 11th IAPR International Conference on Pattern Recognition, The Hague, Netherlands, 30 August – 3 September, pp 137-140.

McGlone, J., C., Mikhail, E., M., Bethel, J., 2004. Manual of photogrammetry, fifth edition. ASPRS, Maryland, p. 1151.

Medioni, G., Nevatia, R., 1989. Stereo error detection, correction and evaluation. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 11(2), pp 113-120.

Milios, E., E., 1989. Shape matching using curvature processes. Computer Vision, Graphics and Image Processing. 47:203-226

Mitchell, H., Mustaffar, M., 2000. Repercussions of using models of greater fidelity in area-based matching. IAPRS, Vol. 33, Part B5, Amsterdam 2000. pp. 539-546.

Mountrakis, G., Agouris, P., Stefanidis, A., 2002. A differential Spatiotemporal model: Primitives and Operators. Advances in Spatial Data Handling, July 2002, Ottawa, Canada pp:255-268

Mühlmann, K., Maier, D., Hesser, J., Männer, R., 2002. Calculating dense disparity maps from color stereo images, an efficient Implementation. International Journal of Computer Vision 47 (1-3): 79-88

Noble, A., 1989. Descriptions of Image Surfaces. PhD thesis, Department of Engineering Science, Oxford University.

Norvelle, F., R., 1992. Stereo Correlation: Window shaping and DEM corrections. PERS, Vol. 58(1):111-115.

Norvelle, F., R., 1994. Using iterative orthophoto refinements to generate and correct digital elevation models. Proceedings: Mapping and remote sensing tools for the 21st century. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, Maryland, USA. 250 pages:134-142.

Norvelle, F., R., 1996. Using iterative orthophoto refinements to generate and correct digital elevation models (DEM's). Digital Photogrammetry: An addendum to the Manual of Photogrammetry. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. Bethesda, Maryland, USA. 247 pages:151-155.

O' Gorman, L., Anderson, A., 1987. A comparison of methods and computation for multi-resolution low- and band-pass transforms for image processing. CVGIP 37, pp. 386-401.

Ohta, Y., Takano, K., Ikeda, K., 1987. A high speed stereo matching system based on dynamic programming. In Proceedings on the International Conference in Computer Vision, London, England. Pp. 335-342.

Okutomi, M., Kanade, T., 1993. A multiple-baseline stereo. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 15(4):353-363.

Okutomi, M., Katayama, Y., Oka, S., 2001. A simple stereo algorithm to recover precise object boundaries and smooth surfaces. In Proceedings of Workshop on Stereo and Multi-Baseline Vision, Kauai, Hawaii, December 2001. pp. 158-165.

Oriot, H., Besnerais, G., L., 1998. Matching aerial stereo images using graduated non convexity techniques. ISPRS Com III Symposium on object Recognition and scene classification from multispectral and multisensor pixels, Ohio, 1998, Vol. 32/3.

Otto, G., P., Chau, T., K., 1989. 'Region-growing' algorithm for matching of terrain images. Image and Vision Computing, 7(2):83-94.

Paparoditis, N., Thom, C., Jibrini, H., 2000. Surface reconstruction in urban areas from multiple views of aerial digital frame cameras. IAPRS, Amsterdam, Vol., 33(B3):43-50.

Pateraki, M., Baltsavias, E., 2003. Analysis and Performance of the Adaptive Multi-image matching Algorithm for Airborne Digital Sensor ADS40. Proc. ASPRS Annual Conference, Anchorage, AK, USA, 5-9 May (on CD-ROM).

Pateraki, M., Baltsavias, E., 2004. Surface discontinuity modelling by LSM through patch adaptation and use of edges. IAPRS, Proceedings XXth Congress, Com. III, Instabul.

Patias, P., Tsioukas, V., Sechidis, L., 2002. A new ''ditigal filter'' for extracting conjucate points on epipolar stereo images. Proceedings of ISPRS Com V Symposium, 2-6 Sept., Corfu, Greece, 34(5):74-78.

Pilgrim, L., 1996. Robust estimation applied to surface matching. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 51, pp. 243-257.

Pollard, S., B., Mayhew, J., E., Frisby, J., P., 1985. PMF: A stereo correspondence algorithm using a disparity gradient limit. Perception, 14:449-470.

Pollefeys, M., Koch, R., Vergauwen, M., van Gool, L., 1999. An automatic method for acquiring 3D models from photographs: Applications to an archaeological site. IAPRS, vol. 32, Part 5W11, Thessaloniki, Greece, pp. 76-80.

Price, K., E., 1985. Relaxation matching techniques – A comparison. IEEE Transactions in Pattern Analysis and machine Intelligence 7(5):617-623

Ranade, S., Rosenfeld, A., 1980. Point pattern matching by relaxation. Pattern Recognition (12):269-275.

Rauhala, U., H., 1986. Compiler positioning of array algebra technology. IAPRS, 26(3/3), pp. 173-198.

Rosenfeld, A., (ed.), 1984. Multiresolution image processing. Springer-Verlag, Berlin.

Rosenfeld, A., 1984b. Image analysi: problems, progress and prospects. Pattern Recognition, 17(1). pp.3-12.

Rosenholm, D. 1987a. Multi-point matching using the least squares technique for evaluation of three-dimensional models. PERS, 53(6), pp. 621-626.

Rosenholm, D., 1987b. Least-squares matchingmethod: some experimental results. Phot. Rec., 12(70), pp 493-512.

Rosenholm, D., 1987c. Empirical investigation of optimal window size using the least squares image matching method. Photogrammetria (PRS), 42(1987), pp:113-125.

Ruther, H., Vlugt, V., D., 1996. Multi-image correlation for digital Photogrammetric measurement systems. IAPRS, Vienna, Vol. 32(B5):499-505.

Sakamoto, M., Lu, W., Kosugi, Y., 2002. Enhanced multi-cluster ANM for stereo matching. Proceedings of ISPRS Com V Symposium, 2-6 Sept., Corfu, Greece, 34(5):84-89.

Scharstein, D., Szeliski, R., 2001. A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms. In IEEE Workshop on Stereo and Multi-Baseline Vision.

Schenk, T., 1999. Digital Photogrammetry. TerraScience, Laurelville, 428 pages.

Schenk, T., Li J.-C., Toth, C., 1990. Hierarchical approach to reconstruct surfaces by using iteratively rectified imagery. In: IAPRS, Vol. 28, Part 5/1, pp. 464-470.

Schenk, T., Li, J., C., Toth, C., 1991. Towards an autonomous system for orientating digital stereopairs. PERS, 57(8), pp 1057-1064.

Schluter, M., 1998. Multi-image matching in object space on the basis of a general 3-D surface model instead of common 2.5-D surface models and its application for urban scenes. The International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume XXXII, Part 4.

Shao., J., Fraser, C., S., 1998. Multi-Image Matching for Automatic Object Reconstruction. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Proceedings of International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 32: 148-154. Hakodate, Japan: Japan Society of Photogrammetry & Remote Sensing.

Shapiro, L., Haralick, R., 1981. Structural Description and Inexact Mapping. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 3:514-519

Shapiro, L., Haralick, R., 1982. Organisation of relational models for scene analysis, IEEE PAMI, Vol. 4/6, 595-602

Shapiro, L., Haralick, R., 1985. A metric for comparing relational descriptions. IEEE PAMI, Vol. 7/1, 90-93.

Skarlatos D., 1999. Orthophotograph production in urban areas. Photogrammetric Record, (16(94):643-650

Skarlatos D., 2000. Image matching towards maturity. IAPRS XXXIII, Amsterdam 2000, TP III-03-03.

Skarlatos, D., Georgopoulos, A., 2004. A new matching algorithm using elliptical areas: results, accuracy, advantages and disadvantages. IAPRS XX. ISPRS Congress, Istanbul, 12-23 July 2004.

Skarlatos, D., Georgopoulos, A., 2004. Automating the checking and correcting of DEMs without reference data. IAPRS XX. ISPRS Congress, Istanbul, 12-23 July 2004.

Sonka, M., Hlavak, V., Boyle, R., 1993. Image processing, analysis and machine vision. Chapman & Hall, London. 555 pages.

Strecha, C., Tuytelaars, T., Van Gool, L., 2003. Dense Matching of Multiple Wide-baseline Views. Proceedings of the Ninth IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV 2003).

Sun, J., Shum, H.-Y., Zheng, N.-N., 2002. Stereo matching using belief propagation. ECCV, LNCS 2351, pp. 510-524.

Sun, S., 1997. A fast stereo matching method. Digital image computing: Techniques and applications. Massey university, Auckland, New Zealand, 10-12 December, 1997. pp. 95-100.

Sun, S., 2001. Rectangular subregioning and 3D maximum-surface techniques for fast stereo matching. IEEE Workshop on stereo and multi-baseline vision, Kauai, Hawaii, 9-10 December, 2001. pp. 44-53.

Sun, S., 2002. Fast stereo matching using rectangular subregioning and 3D maximum-surface techniques. International Journal of Computer Vision, Vol. 47, no 1/2/3. pp. 99-117.

Szeliski, R., Scharstein, D., 2002. Symmetric sub-pixel stereo matching. In Proceedings 7th European Conference on Computer Vision, volume 2, Copenhagen, Denmark, May 2002. pp. 525-540.

Tao, H., Sawhney, H., S., Kumar, R., 2001. A global matching framework for stereo computation. In Proceedings 8th International Conference on Compute Vision, volume 1, Vancouver, Canada, July 2001. pp. 532-539.

Tao, H., Sawhney, Kumar, R., 2001. A global matching framework for stereo computation. ICCV, Vol. 1, pp 532-539

Thurgood, J., Gruber, M., Karner, K., 2004. Multi-Ray matching for automated 3D object modeling. IAPRS XX. ISPRS Congress, Istanbul, 12-23 July 2004.

Thurgood, J., Mikhail, E., 1982. Photogrammetric analysis of digital images. IAPRS, Vol. 24, Com. III, pp 576-590.

Toth, C., K., Grejner-Brzezinska, D., A., 1998. DEM extraction from high-resolution direct digital airborne imagery. Proc. Symposium on object recognition and scene classification from multispectral and multisensor pixels, ISPRS Com. III, WG 2, Ohio, 1998.

Trinder, J., C., Becek, K., Donelly, B., E., 1992. Precision of image matching. IAPRS, Vol. 29(B3):820-823.

Trinder, J., C., Jansa, J., Huang, Y., 1995. An assesment of the precision and accurasy of methods of digital point location. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 50(2):12-20.

Tsai, D., Tsai, Y., 2002. Rotation-invariant pattern matching with color ring-projection. Pattern Recognition 35 (2002), 131-141

Tsay, J-R., 2000. A new algorithm for automatic precise reconstruction of a real object surface. IAPRS, Vol. 33. Amsterdam, pp. 59-66

Tseng, Y.-H., Schenk, T., 1992. A least squares approach to matching lines with Fourier descriptors. In: IAPRS, Vol. 29, Part B3, pp. 469-475.

Veksler, O., 2001. Stereo matching by compact windows via minimum ratio cycle. ICCV01, Vol.1:540-547.

Veksler, O., 2003. Fast Variable Window for stereo correspondence using integral images. CVPR, June 2003.

Walker, A., S., 1999. Responses to users: the continuing evolution of commercial digital photogrammetry. Phot. Rec., 16(93), pp. 469-483.

Wallis, R., 1976. An approach to the space variant restoration and enhancement of images. Proceedings of Symposium on current mathematical problems in image science, Naval Postgraduate School, Monterey, CA, November 1976.

Wang, J-H., Hsiao, C-P., 1999. On disparity matching in stereo vision via a neural network framework. Proc. Natl. Sci. Counc. ROC(A), Vol. 23(5):665-678.

Winter., S., 2000. Location similarity of regions. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 55 (2000) 189-200

Wolff, K., Förstner, W., 2000. Exploiting the multi view geometry for automatic surfaces reconstruction using feature based matching in multi media photogrammetry. ISPRS, 33(B5), Amsterdam, pp 900-907.

Wrobel, B., 1987. Facets Stereo Vision (FAST Vision) – a new approach to computer stereo vision and to digital photogrammetry. Proceedings of ISPRS Intercommission Conference on Fast Processing of Photogrammetric Data, Interlaken, Switzerland, 2-4 June. 437. pp 231-258.

Wrobel, B., P., 1988. Least squares methods for surface reconstruction from images. IAPRS, Vol. 27, Part

B4, Com III, Kyoto, pp. 806-821.

Yagi, G., M, 1973. Computer determination of depth maps. CGIP 2(4):131-150.

Yan, L., 1988. Interest operator and fast implementation. IAPRS 27(B4), Com. III, Kyoto.

Zahran, M., 1997. Shape matching using a modified generalized Hough transform. PhD dissertation, Dept. of Geodetic Science and Surveying, The Ohio State University, OH.

Zemerly, M., J., Holden, M., Muller, J-P., 1992. A multi-resolution approach to parallel stereo matching of airborne imagery. IAPRS, Vol.17(B2):350-357.

Zhang, B., Miller, S., 1997. Adaptive Automatic Terrain Extraction. Proceedings of SPIE, Volume 3072, Integrating Photogrammetric Techniques with Scene Analysis and Machine Vision (edited by D. M. McKeown, J. C. McGlone and O. Jamet). pp. 27-36.

Zhang, Y., Kambhamettu, C., 2002. Stereo matching with segmentation-based cooperation. In Proceedings 7th European Conference on Computer Vision, volume 2, Copenhagen, Denmark, May 2002. pp. 556-571.

Zhang, Z., 1988. A new approach of epipolar line image matching for improving the performance of SODAMS systems. Bericht Nr. 145, ETH Zurich.

Zhizhuo W., 1990. Principles of photogrammetry (with remote sensing). Press of Wuhan University of Surveying and mapping. Publishing house of surveying and mapping Beijing. Pages 575.

Zhu, Q., Zhao, J., Lin, H., Gong, J., 2005. Triangulation of well-defined points as a constraint for reliable image matching. PERS, 71(9), pp.1063-1069.

Zitnick, C., L., Kanade, T., 1998. A volumetric iterative approach to stereo matching and occlusion detection. CMU Technical Report CMU-RI-98-30. http://www.ri.cmu.edu/pub_files/pub1/zitnick_charles_1998_1/zitnick_charles_1998_1.pdf (25.02.2004)

Zitnick, C., L., Kanade, T., 2000. A cooperative algorithm foe stereo matching and occlusion detection. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, July 2000, 22(7):675-684.

Almroth, U., Hendriks, L., 1987. High accuracy digital matching of close range-objects on the analytical plotter Kern DSR-11. FPPD, Interlaken, June 2-4, 1987.

Μπαλοδήμου, Α., 1991. Θεωρία σφαλμάτων και Μ.Ε.Τ. Σημειώσεις μαθήματος, έκδοση Ε.Μ.Π., σελίδες 189.

Παπασάικα, Χ., 2002. Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους από έγχρωμες αεροφωτογραφίες. Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π., σελίδες 89.

Πέτσα, Ε. 2000. Θεμελιώδεις έννοιες και θεμελιώδη προβλήματα της φωτογραμμετρίας. Σημειώσεις μαθήματος, έκδοση Τ.Ε.Ι. Αθηνών, σελίδες 83.