

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει στόχο την παρουσίαση, μελέτη και αξιολόγηση των τεχνικών της γεωμετρικής διόρθωσης και υπέρθεσης δορυφορικών εικόνων. Για την μελέτη αυτή χρησιμοποιήθηκαν τα ψηφιακά δεδομένα εικόνων του θεματικού χαρτογράφου του αμερικανικού δορυφόρου Landsat που κάλυπταν δύο περιοχές μελέτης στην δυτική και ανατολική Κρήτη. Επίσης, χρησιμοποιήθηκαν παγχρωματικές εικόνες που ελήφθησαν από τον γαλλικό δορυφόρο Spot και οι οποίες κάλυπταν τις ίδιες περιοχές μελέτης.

Για την επίτευξη του παραπάνω στόχου δόθηκαν, αρχικά, οι εισαγωγικές έννοιες για την επιστήμη της Τηλεπισκόπησης, την γεωμετρική διόρθωση των δορυφορικών εικόνων καθώς και για το σχήμα και το μέγεθος της Γης. Αφού έγινε εφαρμογή των τεχνικών γεωμετρικής διόρθωσης ακολούθησε σύγκριση των αποτελεσμάτων που επιφέρει κάθε τεχνική στις εικόνες των δύο περιοχών μελέτης.

Κατόπιν, παρουσιάστηκαν τεχνικές υπέρθεσης των δορυφορικών εικόνων οπότε και διαπιστώθηκαν τα πλεονεκτήματα που έχει η υπέρθεση στην ερμηνεία των δορυφορικών δεδομένων. Τέλος, μελετήθηκε ο τρόπος με τον οποίο επιδρούν οι γεωμετρικές διορθώσεις των δορυφορικών εικόνων κατά την υπέρθεσή τους.

Συνέχεια αυτής της εργασίας μπορεί να είναι η χρήση δεδομένων από διαφορετικούς δέκτες για να μελετηθεί η επίδραση των τεχνικών γεωμετρικής διόρθωσης στο είδος των εικόνων που πρόκειται να διορθωθούν. Στην συγκεκριμένη μελέτη μελετήθηκαν δύο τεχνικές υπέρθεσης και σε μελλοντική εργασία θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν άλλες τεχνικές.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η διεκπεραίωση αυτής της διπλωματικής εργασίας θα ήταν αδύνατη χωρίς την συμβολή μερικών ανθρώπων.

Για τον λόγο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω τον αναπληρωτή καθηγητή κ. Στυλιανό Μερτίκα για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση του θέματος της εργασίας αυτής. Οι συμβουλές του κατά την διάρκεια της επεξεργασίας των αποτελεσμάτων ήταν πραγματικά πολύτιμες.

Ο αναπληρωτής καθηγητής κ. Αντώνης Βαφείδης, που ευγενικά δέχτηκε να συμμετάσχει στην εξεταστική επιτροπή της εργασίας αυτής, είχε καθοριστικό ρόλο και στην προμήθεια των εικόνων Landsat της ανατολικής Κρήτης από τον Οργανισμό Ανάπτυξης Δυτικής Κρήτης, συγκεκριμένα τον κ. Αγοραστάκη τον οποίο επίσης ευχαριστώ. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Απόστολο Σαρρή τόσο για τις συμβουλές του κατά τη διάρκεια πραγματοποίησης των μετρήσεων πεδίου όσο και για την διάθεση της εικόνας Spot της ανατολικής Κρήτης για την συγκεκριμένη μελέτη.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον συνάδελφο Χρύσανθο Στειακάκη για την πολύτιμη βοήθειά του κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας αυτής. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον συνάδελφο Δημήτρη Παπαδόπουλο για την ηθική του υποστήριξη όλο αυτό το διάστημα.

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1	Η αρχική και η γεωμετρικά διορθωμένη εικόνα Spot B-Δ Κρήτης	3
Εικόνα 2.1	Ο δορυφόρος Landsat - 5	17
Εικόνα 3.1	Η μετατόπιση των γραμμών σάρωσης	29
Εικόνα 5.1	Η αρχική εικόνα Spot και Landsat της βόρειο - δυτικής Κρήτης	70
Εικόνα 5.2	Η αρχική εικόνα Spot και Landsat της βόρειο - ανατολικής Κρήτης	71
Εικόνα 5.3	Η περιοχή μελέτης στις εικόνες Spot και Landsat της B-Δ Κρήτης	73
Εικόνα 5.4	Η περιοχή μελέτης στις εικόνες Spot και Landsat της B-A Κρήτης	74
Εικόνα 5.5	Η κατανομή των GCP's στις δύο περιοχές μελέτης	84
Εικόνα 5.6	Η διόρθωση της εικόνας Landsat TM2 με τις μεθόδους πολυνύμου και τριγωνισμού στην B - Δ Κρήτη	86
Εικόνα 5.7	Η διόρθωση της εικόνας Landsat TM2 με τις μεθόδους πολυνύμου και τριγωνισμού στην B - Α Κρήτη	87
Εικόνα 5.8	Η διόρθωση της εικόνας Spot της B- Δ Κρήτης με πολυνύμα πρώτου, δευτέρου και τρίτου βαθμού	89
Εικόνα 5.9	Η διόρθωση της εικόνας Spot της B- Α Κρήτης με πολυνύμα πρώτου, δευτέρου και τρίτου βαθμού	91
Εικόνα 5.10	Η διόρθωση της εικόνας Landsat TM7 με τις τρεις μεθόδους επανάληψης της δειγματοληψίας στην B - Δ Κρήτη	94
Εικόνα 5.11	Η διόρθωση της εικόνας Landsat TM7 με τις τρεις μεθόδους επανάληψης της δειγματοληψίας στην B - Α Κρήτη	95
Εικόνα 6.1	Ο συνδυασμός TM1, TM2 και TM3 στην B - Δ Κρήτη	103
Εικόνα 6.2	Η εφαρμογή της μεθόδου RGBI για τον συνδυασμό TM1, TM2 και TM3 στην B - Δ Κρήτη	104
Εικόνα 6.3	Η εφαρμογή του μετασχηματισμού Brovey για τον συνδυασμό TM1, TM2 και TM3 στην B - Δ Κρήτη	105
Εικόνα 6.4	Ο συνδυασμός TM1, TM2 και TM3 στην B - Α Κρήτη	106
Εικόνα 6.5	Η εφαρμογή των μεθόδων RGBI και Brovey στην B -Α Κρήτη	107
Εικόνα 6.6	Ο συνδυασμός TM2, TM3 και TM4 στις περιοχές μελέτης	108
Εικόνα 6.7	Η εφαρμογή των μεθόδων RGBI και Brovey στην B -Δ Κρήτη	109
Εικόνα 6.8	Η εφαρμογή των μεθόδων RGBI και Brovey στην B -Α Κρήτη	110
Εικόνα 6.9	Ο συνδυασμός TM2, TM4 και TM7 στην B - Α Κρήτη στις αρχικές και στις γεωμετρικά διορθωμένες εικόνες	112
Εικόνα 6.10	Η μέθοδος RGBI στις αρχικές και στις γεωμετρικά διορθωμένες εικόνες .	114

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Η τάση των φυσικών αποθεμάτων αρκετών ορυκτών πρώτων ύλων προς εξάντληση και η συνεχής μόλυνση του περιβάλλοντος είναι αποτελέσματα της συχνά απερίσκεπτης επέκτασης του ανθρώπινου πολιτισμού.

Για την αντιμετώπιση των προβλημάτων αυτών πρέπει να χρησιμοποιηθούν όλα τα δυνατά μέσα. Σε αυτά συμπεριλαμβάνεται και η επιστήμη της Τηλεπισκόπησης, από τα δεδομένα της οποίας αντλούνται πολύτιμες πληροφορίες τόσο για τα προβλήματα που αναφέρθηκαν προηγουμένως όσο και για πλήθος άλλων εφαρμογών.

Η ανάγκη για μεγιστοποίηση του βαθμού πληροφοριών που εξάγονται από τα δεδομένα Τηλεπισκόπησης, οδήγησε τους αναλυτές τους να μην επικεντρώνονται μόνο στις φασματικές πληροφορίες που αυτά περιέχουν, όπως γίνονταν μέχρι την τελευταία δεκαετία, αλλά και στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους. Επίσης, γίνονται προσπάθειες εύρεσης τεχνικών με τις οποίες θα συνδυαστούν τα χαρακτηριστικά εικόνων που έχουν ληφθεί από διαφορετικούς δέκτες.

Οι δορυφορικές εικόνες, στις οποίες θα επικεντρωθεί η εργασία αυτή, στην αρχική τους μορφή περιέχουν γεωμετρικά σφάλματα που οφείλονται στο σύστημα ανίχνευσης και καταγραφής, στο τοπογραφικό ανάγλυφο, την καμπυλότητα της Γης κ.ά. Έτσι, δεν υπάρχει σταθερή σχέση, όσον αφορά την γεωμετρία, μεταξύ σημείων στη Γη και των αντίστοιχων σημείων στις δορυφορικές εικόνες.

Σκοπός των γεωμετρικών διορθώσεων είναι να φέρουν την εικόνα σε μορφή χάρτη, έτσι ώστε να υπάρχει σωστή αντιστοιχία μεταξύ περιοχών στην εικόνα και το έδαφος. Για την επίτευξη του σκοπού αυτού, είναι απαραίτητη η μετατροπή του συστήματος συντεταγμένων της εικόνας (γραμμές και στήλες) σε κάποιο γεωδαιτικό σύστημα συντεταγμένων (π.χ. γεωγραφικό μήκος και πλάτος).

Στην εργασία αυτή γίνεται παρουσίαση των κυριότερων μεθόδων γεωμετρικής διόρθωσης και σύγκριση των αποτελεσμάτων που αυτές δίνουν. Οι γεωμετρικές διορθώσεις έγιναν με χρήση επίγειων σημείων ελέγχου. Αρχικά, γίνεται σύγκριση μεταξύ της ακρίβειας των συντεταγμένων που προκύπτουν από τη χρήση του δορυφορικού συστήματος εντοπισμού GPS και από χάρτη. Αφού επιλεγεί η καλύτερη μέθοδος προσδιορισμού συντεταγμένων, στην συνέχεια, συγκρίνεται η μέθοδος του πολωνύμου με τη μέθοδο του τριγωνισμού ενώ στην συνέχεια μελετάται ο βαθμός του πολωνύμου και η μέθοδος επαναδειγματοληψίας που χρησιμοποιείται. Για την επίδειξη των παραπάνω διαδικασιών χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα από εικόνες Spot και Landsat ενώ οι περιοχές μελέτης είναι η δυτική Κρήτη (πόλη Χανίων) και η βορειο - ανατολική Κρήτη (περιοχή Σητεία - Ίτανος - Παλαίκαστρο). Στην Εικόνα 1.1α παρουσιάζεται η αρχική εικόνα Spot της περιοχής της δυτικής Κρήτης και στην Εικόνα 1.1.β η ίδια εικόνα όταν διορθωθεί γεωμετρικά.

Η εργασία ολοκληρώνεται με την επίδειξη τεχνικών υπέρθεσης των δορυφορικών εικόνων. Με τις τεχνικές που παρουσιάζονται επιτυγχάνεται ο συνδυασμός δεδομένων που προέρχονται από δέκτες με υψηλή χωρική ανάλυση (π.χ. εικόνες του δορυφόρου Spot) και αυτών που ελήφθησαν από δέκτες που παρέχουν πολυφασματική πληροφορία

(π.χ. εικόνες Landsat). Τέλος, γίνεται μελέτη της επίδρασης των γεωμετρικών διορθώσεων στην υπέρθεσή τους.

(α)

(β)

Εικόνα 1.1. Η περιοχή μελέτης στην δυτική Κρήτη. Η αρχική εικόνα Spot (α) και η γεωμετρικά διορθωμένη(β).

Κεφάλαιο 2

Βασικές έννοιες Τηλεπισκόπησης

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια πρώτη επαφή με τις βασικές αρχές που διέπουν την επιστήμη της Τηλεπισκόπησης. Έτσι, περιγράφεται η φύση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που τις περισσότερες φορές αποτελεί το μετρούμενο μέγεθος των ανιχνευτών Τηλεπισκόπησης. Επίσης, περιγράφονται τα κυριότερα χαρακτηριστικά των ανιχνευτών αυτών ενώ γίνεται και περιγραφή των δορυφορικών συστημάτων Landsat και SPOT.

2.1 Εισαγωγή

Μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του 1960, ο μόνος τρόπος παρατήρησης της Γης ήταν με τη λήψη φωτογραφιών από φωτομηχανές που βρίσκονταν μέσα σε αεροπλάνα και αερόστατα. Η εκτόξευση, εκείνη την περίοδο, των πρώτων δορυφόρων σήμανε την αρχή της διαστημικής εποχής με αποτέλεσμα να είναι πλέον εφικτή η παρατήρηση και μελέτη της Γης από το διάστημα.

Ο όρος Τηλεπισκόπηση χρησιμοποιείται για να αποδώσει την καταγραφή, ανάλυση και ερμηνεία δεδομένων, σχετικά με ένα αντικείμενο, που λαμβάνονται από απόσταση. Απεικονίσεις Τηλεπισκόπησης θεωρούνται οι αεροφωτογραφίες, οι υποβρύχιες διασκοπήσεις που χρησιμοποιούν ηχητικούς παλμούς, οι δορυφορικές εικόνες κ.ά.

Στις απεικονίσεις αυτές καταγράφεται η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια η οποία είτε εκπέμπεται είτε ανακλάται από την επιφάνεια της Γης και την ατμόσφαιρα. Για την ορθότερη ερμηνεία των δορυφορικών εικόνων είναι πολύ σημαντική η κατανόηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ των διάφορων υλικών και της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας.

2.2 Ηλεκτρομαγνητική ενέργεια

Με τον όρο ηλεκτρομαγνητική ενέργεια αναφερόμαστε σε κάθε είδος ενέργειας που κινείται με την ταχύτητα του φωτός με τη μορφή αρμονικού ημιτονοειδούς κύματος. Η ενέργεια αυτή μπορεί να ανιχνευθεί μέσω της αλληλεπίδρασής της με την ύλη. Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία μπορεί να ερμηνευτεί με δύο μοντέλα: το μοντέλο κύματος του Maxwell και αυτό των κβάντα του Plank.

Η δυαδική αυτή φύση της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας έχει βρεθεί ότι ισχύει σε επίπεδα μικρότερα του ατόμου. Τα κυματοειδή χαρακτηριστικά της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας εξηγούν τον τρόπο διάδοσής της και επιτρέπουν τον διαχωρισμό μεταξύ των διάφορων μορφών της (π.χ. ορατό και μικροκύματα) ενώ με τη σωματιδιακή φύση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ερμηνεύεται η αλληλεπίδραση μεταξύ της γήινης επιφάνειας και ατμόσφαιρας και της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας.

Στην κυματική της μορφή, η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια αποτελείται από δύο συνιστώσες εκ των οποίων η μία είναι προσανατολισμένη κάθετα ως προς την άλλη. Οι δύο αυτές συνιστώσες είναι το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο (Σχήμα 2.1).

Σχήμα 2.1. Ηλεκτρική (E) και μαγνητική (M) συνιστώσα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας
Μήκος κύματος λ ορίζεται η απόσταση μεταξύ οποιουδήποτε σημείου ενός κύκλου ή κύματος και του αντίστοιχου σημείου στον επόμενο κύκλο ή κύμα. Μονάδα μέτρησης του μήκους κύματος είναι το μέτρο (m) αλλά συνήθως χρησιμοποιούνται υποδιαιρέσεις του, όπως είναι το μικρόμετρο ($\mu\text{m} = 10^{-6}\text{m}$) και το νανόμετρο ($\text{nm} = 10^{-9}\text{m}$).

Συχνότητα ν είναι ο αριθμός των κορυφών του κύματος που διέρχονται από δεδομένο σταθερό σημείο στη μονάδα του χρόνου. Μονάδα μέτρησης είναι το Hertz (Hz), που ισοδυναμεί με ένα κύκλο το δευτερόλεπτο, και τα πολλαπλάσιά του.

Η σχέση μεταξύ μήκους κύματος και συχνότητας περιγράφεται από τη σχέση:

$$c = \lambda \nu \quad (2.1)$$

όπου c είναι η ταχύτητα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ίση με 299,793 Km/sec.

Η ενέργεια E των φωτονίων σε σχέση με το μήκος κύματος (ή τη συχνότητα) της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας δίνεται από τον νόμο του Plank:

$$E = \nu h = \frac{ch}{\lambda} \quad (2.2)$$

όπου h η σταθερά του Plank και ίση με $6.62 \cdot 10^{-34}$ Joule/sec. Επομένως, όσο μικρότερο είναι το μήκος κύματος (μεγαλύτερη η συχνότητα) της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας τόσο αυξάνεται η ενέργεια κάθε φωτονίου.

Σε κάθε αλληλεπίδραση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με την ύλη, ένα ποσοστό της προσπίπτουσας ενέργειας σε ένα μήκος κύματος $(E_I)_\lambda$ ανακλάται $(E_R)_\lambda$, απορροφάται $(E_A)_\lambda$ και μεταδίδεται $(E_T)_\lambda$:

$$(E_I)_\lambda = (E_R)_\lambda + (E_A)_\lambda + (E_T)_\lambda \quad (2.3)$$

Το πηλίκο της ανακλώμενης προς την προσπίπτουσα ενέργεια για κάθε μήκος κύματος δίνει το συντελεστή φασματικής ανακλαστικότητας e στο συγκεκριμένο μήκος κύματος:

$$e = (E_R)_\lambda / (E_I)_\lambda \quad (2.4)$$

Ο συντελεστής αυτός είναι σημαντικός παράγοντας στην ερμηνεία δεδομένων Τηλεπισκόπησης, ενώ η γραφική του παράσταση σε σχέση με το μήκος κύματος είναι χαρακτηριστική και μοναδική για κάθε υλικό. Η καμπύλη που δημιουργείται ονομάζεται φασματική ταυτότητα (spectral signature) του υλικού αυτού. Στο Σχήμα 2.2 παρουσιάζονται οι φασματικές ταυτότητες των συνηθέστερων συστατικών της επιφάνειας της Γης.

Σχήμα 2.2. Οι φασματικές ταυτότητες των συνηθέστερων υλικών της επιφάνειας της Γης

2.3 Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα

Η ταξινόμηση της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας μπορεί να γίνει με βάση το μήκος κύματος, τη συχνότητα ή την ενέργεια. Στο Σχήμα 2.3 φαίνεται η ταξινόμηση σύμφωνα με το μήκος κύματος. Ο οριζόντιος άξονας στο σχήμα αυτό βρίσκεται σε λογαριθμική κλίμακα ώστε να καταγραφεί το μεγαλύτερο τμήμα του φάσματος. Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζονται οι διάφορες ζώνες του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.

Σχήμα 2.3. Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα

Πίνακας 2.1. Οι κυριότερες περιοχές του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος

Φασματική Περιοχή	Εύρος μήκους κύματος
Ακτίνες Γάμα	< 0.03 nm
Ακτίνες Χ	0.03 - 300 nm
Υπεριώδης ακτινοβολία	0.30 - 0.38 μm
Ορατό	0.38 - 0.72 μm
Υπέρυθρος ακτινοβολία:	

Εγγύς Υπέρυθρο	0.72 - 1.30 μm
Μέσο Υπέρυθρο	1.30 - 3.00 μm
Θερμικό (Άπω) Υπέρυθρο	7.00 - 15.0 μm
Μικροκύματα	0.3 - 30 cm
Ραδιοφωνικά	≥ 30 cm

Η ατμόσφαιρα της Γης δεν επιτρέπει τη διέλευση ολόκληρου του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, λόγω της ύπαρξης ορισμένων αερίων (όζον, υδρατμοί, διοξείδιο του άνθρακα) τα οποία απορροφούν συγκεκριμένα μήκη κύματος. Για παράδειγμα το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) απορροφά, κυρίως, την ενέργεια που αντιστοιχεί σε μήκη κύματος από 13 έως 17.5 μm .

Τα μήκη κύματος τα οποία διαδίδονται μέσω της ατμόσφαιρας χωρίς ουσιαστικές μεταβολές ονομάζονται ατμοσφαιρικές δίοδοι ακτινοβολίας (atmospheric windows). Οι φασματικές αυτοί δίοδοι χρησιμοποιούνται για τη καταγραφή των δορυφορικών εικόνων και οι κυριότερες παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.2 ενώ στο Σχήμα 2.4 παρουσιάζεται το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα και οι κυριότερες ατμοσφαιρικές δίοδοι ακτινοβολίας σαν συνάρτηση του ποσοστού της ακτινοβολίας που διαδίδεται μέσω της ατμόσφαιρας.

Πίνακας 2.2. Οι κυριότερες ατμοσφαιρικές δίοδοι ακτινοβολίας

Υπεριώδες και ορατό	0.30 - 0.75 μm
	0.77 - 0.91 μm
Εγγύς υπέρυθρο	1.55 - 1.75 μm
	2.05 - 2.40 μm
Θερμικό (άπω) υπέρυθρο	8.00 - 9.20 μm
	10.2 - 12.4 μm
Μικροκύματα	7.50 - 11.5 mm
	20.0 + mm

Σχήμα 2.4. Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα, οι ατμοσφαιρικές δίοδοι ακτινοβολίας.

2.4 Αλληλεπιδράσεις της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία για να καταγραφεί από ένα δορυφορικό σύστημα ανίχνευσης πρέπει να διέλθει δύο φορές μέσα από την ατμόσφαιρα. Η διέλευση αυτή γίνεται μέσα από συγκεκριμένες διόδους όμως επηρεάζεται από ένα αριθμό διεργασιών που συντελούνται μέχρι να φτάσει στην επιφάνεια της Γης και από εκεί να επιστρέψει στο σύστημα ανίχνευσης που βρίσκεται σε κάποιο δορυφόρο. Επίσης, η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία αλληλεπιδρά με τις επιφάνειες και με τον τρόπο αυτό καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό ο τρόπος με τον οποίο θα καταγραφεί από το σύστημα Τηλεπισκόπησης.

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία καθώς διέρχεται μέσα από την ατμόσφαιρα υπόκειται σε φυσικές διεργασίες όπως διάθλαση, σκέδαση, απορρόφηση (Σχήμα 2.5).

Σχήμα 2.5. Οι κυριότερες διεργασίες μεταξύ ακτινοβολίας και ατμόσφαιρας.

Η ακτινοβολία όταν διέρχεται μέσα από τα διάφορα στρώματα της ατμόσφαιρας τα οποία εμφανίζουν διαφορετικές ιδιότητες σε υγρασία, θερμοκρασία κλπ. διαθλάται καθώς μεταβάλλεται ο δείκτης διάθλασης του υλικού.

Ο όρος σκέδαση χρησιμοποιείται για την περιγραφή της εκτροπής της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από σωματίδια που βρίσκονται σε διάφορα στρώματα της ατμόσφαιρας. Η σκέδαση εξαρτάται από το μέγεθος των σωματιδίων, το μήκος κύματος και το πάχος του στρώματος της ατμόσφαιρας στο οποίο βρίσκονται αυτά τα σωματίδια. Η σκέδαση που προκαλείται από σωματίδια των οποίων η διάμετρος είναι πολύ μικρότερη του μήκους κύματος (οξυγόνο, άζωτο) ονομάζεται σκέδαση Rayleigh. Η μορφή αυτή σκέδασης συντελείται, κυρίως, σε υψόμετρο 9 με 10

χιλιόμετρα πάνω από την επιφάνεια της Γης. Τα σωματίδια με διάμετρο περίπου ίση με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας (καπνός, αιθαλομίχλη κ.ά.) προκαλούν τη σκέδαση Mie. Η σκέδαση Mie είναι μεγαλύτερη στα χαμηλότερα στρώματα της ατμόσφαιρας δηλαδή σε υψόμετρο έως 5 χιλιόμετρα. Τέλος, η σκόνη, τα σύννεφα και η ομίχλη προκαλούν μη επιλεκτική σκέδαση καθώς η μορφή αυτή σκέδασης είναι ανεξάρτητη από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Στο Σχήμα 2.6 παρουσιάζονται οι διάφορες μορφές σκέδασης σε σχέση με το μήκος κύματος.

Σχήμα 2.6. Η σχετική σκέδαση σαν συνάρτηση του μήκους κύματος λ για διάφορα επίπεδα ατμοσφαιρικής ομίχλης.

Λόγω της απορρόφησης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από σωματίδια της ατμόσφαιρας όπως το όζον, το διοξείδιο του άνθρακα, η υγρασία και το οξυγόνο δημιουργούνται οι ατμοσφαιρικές διόδους ακτινοβολίας. Στο Σχήμα 2.7 παρουσιάζεται η τελική φασματική κατανομή της ακτινοβολίας που φθάνει στην επιφάνεια της Γης.

Σχήμα 2.7. Η απορρόφηση της ακτινοβολίας από διάφορα αέρια της ατμόσφαιρας, σε διάφορα μήκη κύματος

2.5 Συστήματα ανίχνευσης

Τα συστήματα ανίχνευσης που χρησιμοποιούνται για απεικονίσεις Τηλεπισκόπησης μπορεί να διαφέρουν στο είδος της πηγής ενέργειας που χρησιμοποιούν (π.χ. το ηλιακό φως για φωτογραφίες και τα μικροκύματα σε συστήματα Radar) , στον τρόπο λήψης της εικόνας (π.χ. με σαρωτή ή με φωτογραφική μηχανή).

Τα περισσότερα συστήματα ανίχνευσης χρησιμοποιούν σαρωτές οι οποίοι αποτελούνται από διάφορους δέκτες. Οι δέκτες αυτοί περιέχουν ανιχνευτές στους οποίους, όταν φτάνουν φωτόνια ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας που εκπέμπονται ή

ακτινοβολούνται από το έδαφος, παράγεται ηλεκτρικό σήμα που εξαρτάται και από τον αριθμό των φωτονίων. Η επιλογή ενός συστήματος ανίχνευσης γίνεται με βάση, κυρίως, τη ραδιομετρική, φασματική και τη χωρική ανάλυσή του.

Η ραδιομετρική ανάλυση αναφέρεται στον αριθμό των διαβαθμίσεων (bits) του τόνου του γκρι που χρησιμοποιούνται για την απεικόνιση των δεδομένων που συλλέγει ο δέκτης. Για παράδειγμα, σύστημα ανίχνευσης με ραδιομετρική ικανότητα καταγραφής 8 bit χρησιμοποιεί 256 διαβαθμίσεις για την μετατροπή της έντασης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σε ψηφιακές τιμές. Αυτή είναι και η ραδιομετρική ανάλυση των περισσότερων συστημάτων ανίχνευσης.

Η φασματική ανάλυση (διαχωριστική ικανότητα) αναφέρεται στη ζώνη του μήκους κύματος που λειτουργεί ο ανιχνευτής. Στο Σχήμα 2.8. παρουσιάζεται η φασματική απόκριση ενός ανιχνευτή σαν συνάρτηση του μήκους κύματος. Η ζώνη του μήκους κύματος που καταγράφεται στο 50% της κορυφής της απόκρισης του ανιχνευτή αποτελεί τη φασματική διαχωριστική ικανότητα του ανιχνευτή. Η απόκριση φτάνει στο μέγιστο ποσοστό της στα 0.55 μm οπότε τα όρια του 50% είναι τα μήκη κύματος 0.5 και 0.6 μm . Επομένως, η φασματική ανάλυση του ανιχνευτή είναι 0.1 μm .

Σχήμα 2.8. Φασματική ανάλυση ενός ανιχνευτή

Η χωρική ανάλυση είναι η δυνατότητα διάκρισης στην εικόνα δύο γειτονικών σημείων. Η βασική μέτρηση που καθορίζει την χωρική ανάλυση ενός συστήματος είναι το στιγμιαίο οπτικό πεδίο (IFOV) το οποίο εξαρτάται κυρίως από τη γεωμετρία του συστήματος (Σχήμα 2.9).

Σχήμα 2.9. Το γωνιακό στιγμιαίο οπτικό πεδίο, β , δείχνει τη προβολή XY στο έδαφος. Η απόσταση XY είναι η διάμετρος κύκλου.

Το IFOV κάθε συστήματος καθορίζει τις μικρότερες διαστάσεις που πρέπει να έχει ένα αντικείμενο στο έδαφος για να μπορέσει ο ανιχνευτής να το εντοπίσει. Το μέγεθος αυτό εξαρτάται από το IFOV και το υψόμετρο στο οποίο βρίσκεται ο ανιχνευτής.

2.6 Δορυφορικά Συστήματα Τηλεπισκόπησης

Από την αρχή της διαστημικής εποχής, το 1960, έχουν περάσει σχεδόν τέσσερις δεκαετίες. Στο χρονικό αυτό διάστημα η εκτόξευση δορυφόρων για στρατιωτικούς ή επιστημονικούς σκοπούς έχει γίνει σύνηθες φαινόμενο. Πλήθος δορυφόρων χρησιμοποιούνται σήμερα για επιστημονικούς σκοπούς αλλά στην ενότητα αυτή γίνεται αναφορά στα δύο εμπορικότερα, επιστημονικά προγράμματα: τους δορυφόρους Landsat και SPOT.

2.6.1 Δορυφόροι Landsat

Στις 23 Ιουλίου 1972 έγινε, από τη NASA των ΗΠΑ, η πρώτη εκτόξευση δορυφόρου που περιείχε συστήματα ανίχνευσης σχεδιασμένα για γεωλογικές μελέτες. Αρχικά, ο δορυφόρος αυτός ονομάστηκε ERTS (Earth Resources Technology Satellite) και στη συνέχεια μετονομάστηκε σε Landsat. Από εκείνη την ημέρα μέχρι σήμερα έχουν εκτοξευθεί έξι δορυφόροι ενώ προγραμματίζεται η εκτόξευση ενός ακόμα (Landsat-7) για τα μέσα του 1999. Από τους δορυφόρους αυτούς οι πέντε πρώτοι ανήκουν σε δύο τεχνολογικές γενιές των οποίων τα κύρια χαρακτηριστικά αναφέρονται στον Πίνακα 2.4. Οι δορυφόροι αυτοί βρίσκονται σε ηλιοσύγχρονη τροχιά, περνούν επομένως από κάθε μέρος της Γης την ίδια, περίπου, τοπική ώρα.

Τα συστήματα ανίχνευσης τα οποία λειτούργησαν ικανοποιητικά στους δορυφόρους Landsat 4 και 5 είναι ο πολυφασματικός σαρωτής MSS (Multispectral Scanner) και ο θεματικός χαρτογράφος TM (Thematic Mapper). Πρόκειται για δύο όργανα σάρωσης με το θεματικό χαρτογράφο TM να αποτελεί ουσιαστική βελτίωση του

πολυφασματικού σαρωτή MSS. Οι δίαυλοι καταγραφής των οργάνων αυτών παρουσιάζονται στο Πίνακα 2.5.

Πίνακας 2.4. Χαρακτηριστικά τροχιάς και συστήματα ανίχνευσης των δύο γενεών Landsat

Γενιά	Landsat 1,2 και 3	Landsat 4 και 5
Υψόμετρο	918	705
Τροχιές ανά ημέρα	14	14.5
Αριθμός τροχιών (περάσματα) / έτος	251	233
Κύκλος επανάληψης	18 ημέρες	16 ημέρες
Πλευρική επικάλυψη στον Ισημερινό	14.0 %	7.6 %
Ωρα διέλευσης σε $\phi = 40^\circ$	9:30 π.μ.	10:30 π.μ.
Λειτουργία	1972 - 1984	1982 έως σήμερα
Αποθήκευση δεδομένων στο δορυφόρο	Ναι	Όχι
Όργανα καταγραφής		
Πολυφασματικός σαρωτής	Ναι	Ναι
Θεματικός χαρτογράφος	Όχι	Ναι
RBV	Ναι	Όχι

Πίνακας 2.5. Οι δίαυλοι καταγραφής των σαρωτών MSS και TM

Δίαυλοι MSS ⁽¹⁾	Μήκος κύματος, μm	Φασματική ζώνη
1 (4)	0.5 - 0.6	Πράσινο
2 (5)	0.6 - 0.7	Κόκκινο
3 (6)	0.7 - 0.8	Ανακλώμενο υπέρυθρο
4 (7)	0.8 - 1.1	Ανακλώμενο υπέρυθρο
Δίαυλοι TM	Μήκος κύματος, μm	Φασματική ζώνη
1	0.45 - 0.52	Ιώδες - πράσινο
2	0.52 - 0.60	Πράσινο
3	0.63 - 0.69	Κόκκινο
4	0.76 - 0.90	Ανακλώμενο υπέρυθρο
5	1.55 - 1.75	Ανακλώμενο υπέρυθρο
6	10.4 - 12.5	Θερμικό υπέρυθρο
7	2.08 - 2.35	Ανακλώμενο υπέρυθρο

(1): Οι αριθμοί στην παρένθεση αφορούν την αρίθμηση στους δορυφόρους Landsat 1,2,3

Το IFOV των διαύλων αυτών είναι για τον πολυφασματικό σαρωτή 79m×79m και για το θεματικό χαρτογράφο 30m×30m με εξαίρεση το δίαυλο TM-6 με IFOV 120m×120m.

Ο δορυφόρος Landsat-6 δεν έλαβε ποτέ μετρήσεις. Ο δορυφόρος Landsat-7 που πρόκειται να εκτοξευθεί στις αρχές του 1999 θα περιέχει το βελτιωμένο θεματικό χαρτογράφο ETM (Enhanced Thematic Mapper) που θα διατηρήσει τα ίδια κύρια χαρακτηριστικά με τον θεματικό χαρτογράφο TM αλλά θα περιέχει ένα επιπλέον δίαυλο ETM-8 σε μήκη κύματος από 0.50-0.90μm με IFOV 15m×15m. Επίσης, το IFOV του θερμικού υπέρυθρου ETM-6 θα είναι 60m×60m.

Στην Εικόνα 2.1 φαίνεται ο δορυφόρος Landsat-5 ενώ στο Σχήμα 2.10 παρουσιάζονται οι τροχιές των δορυφόρων Landsat δεύτερης γενιάς.

Εικόνα 2.1 Ο δορυφόρος Landsat 5

Σχήμα 2.10. Οι τροχιές των δορυφόρων Landsat 4 και 5

Στο σχήμα 2.11 παρουσιάζεται ο τρόπος λήψης των δεδομένων από το θεματικό χαρτογράφο TM.

Σχήμα 2.11. Ο τρόπος σάρωσης του θεματικού χαρτογράφου TM.

Τα ψηφιακά δεδομένα στέλνονται στους επίγειους σταθμούς λήψης (Σχήμα 2.12) όπου γίνεται και η διανομή των εικόνων. Τα κενά μεταξύ των διαφόρων σταθμών είναι περιοχές για τις οποίες γίνεται καταγραφή των δεδομένων από τους δορυφόρους αλλά δεν στέλνονται στα κέντρα ελέγχου μέχρι ο δορυφόρος να φτάσει εντός του κύκλου επιρροής κάποιου σταθμού.

Σχήμα 2.12. Οι επίγειοι σταθμοί λήψης των δορυφόρων Landsat 4 και 5 και το εύρος κάλυψής τους

2.6.2 Δορυφόροι SPOT

Η ευρωπαϊκή απάντηση στους αμερικανικούς δορυφόρους ήρθε τον Φεβρουάριο του 1986 με την εκτόξευση του γαλλικού δορυφόρου SPOT 1. Μέχρι σήμερα έχουν εκτοξευθεί 4 δορυφόροι ενώ προγραμματίζεται η εκτόξευση του επόμενου (SPOT-5) στις αρχές του 2000.

Οι δορυφόροι αυτοί έχουν βρίσκονται σε υψόμετρο $h=832$ Km, σε ηλιοσύγχρονη τροχιά. Έχουν κλίση $i=98$ μοιρών και περνούν πάνω από κάθε σημείο της Γης την ίδια τοπική ώρα, περίπου, στις 10:30 π.μ. Για να καλύψουν όλη την επιφάνεια της υδρογείου χρειάζονται 26 ημέρες.

Οι δορυφόροι SPOT χρησιμοποιούν δύο όμοιους δέκτες, τους HRV. Κάθε HRV καλύπτει στο έδαφος λωρίδα πλάτους 60 Km ενώ υπάρχει επικάλυψη μεταξύ των εικόνων που δημιουργούν οι δύο HRV της τάξης των 3 Km με αποτέλεσμα η λωρίδα που δημιουργείται να έχει τελικά συνολικό πλάτος 117 Km (Σχήμα 2.13).

Σχήμα 2.13. Ο δορυφόρος Spot ενώ φαίνονται και τα ίχνη που προκαλούν τα δύο οπτικά συστήματα HRV.

Η τομή ενός από αυτούς φαίνεται στο Σχήμα 2.14α ενώ στο Σχήμα 2.14β φαίνεται ο τρόπος λήψης δεδομένων από τους δέκτες HRV. Το κάτοπτρο που βρίσκεται στους δέκτες δίνει τη δυνατότητα λήψης εικόνων και σε εκτός ναδίρ γωνίες μέχρι 27^0 (από τη κατακόρυφο) που αντιστοιχεί σε συνολική περιοχή 950 Km (Σχήμα 2.15).

(α)

(β)

Σχήμα 2.14. α) Τομή του HRV β) Τρόπος λήψης δεδομένων από το HRV

Σχήμα 2.15. Το μετακινούμενο κάτοπτρο του SPOT δίνει τη δυνατότητα λήψης εικόνων μέχρι 450 Km ανατολικά ή δυτικά του ίχνους της τροχιάς

Οι δέκτες των δορυφόρων SPOT αποτελούνται από δύο ομάδες ανιχνευτών (συνολικά 6000 στοιχεία) εκ των οποίων η μία καταγράφει στη πανχρωματική περιοχή ενώ η δεύτερη αποτελείται από 3 υπο-ομάδες ανιχνευτών που καταγράφουν σε πολυζωνική περιοχή του φάσματος (Πίνακας 2.6).

Πίνακας 2.6. Οι διάλυτοι καταγραφής του Spot

	Πανχρωματική περιοχή (Pan)	Πολυφασματική περιοχή (XS)
Επιφάνεια εδάφους	60km x 60km	60km x 60km
Χωρική ανάλυση	10m×10m	20m×20m
Μήκη κύματος	0.51 - 0.73 μm	0.50 - 0.59 μm 0.61 - 0.68 μm 0.79 - 0.89 μm

Η ικανότητα του δέκτη να καταγράφει και να καλύπτει περιοχές της Γης εκτός ναδίου επιτρέπει την λήψη εικόνων μιας περιοχής συχνότερα από το διάστημα των 26 ημερών (Σχήμα 2.16). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να είναι δυνατή η στερεοσκοπική κάλυψη μιας περιοχής γεγονός που δεν είναι εφικτό με τους δορυφόρους Landsat (Σχήμα 2.17).

Σχήμα 2.16. Η εκτός ναδίου ικανότητα παρατήρησης του Spot μπορεί να δημιουργήσει πολλαπλές εικόνες μιας περιοχής κατά τη διάρκεια του κύκλου των 26 ημερών.

Σχήμα 2.17. Η δυνατότητα δημιουργίας στερεοσκοπικών εικόνων από το δορυφόρο Spot.

2.6.3 Σύγκριση μεταξύ των εικόνων Spot και Landsat

Οι εικόνες που προκύπτουν από τα συστήματα αυτά αποτελούν την πλειοψηφία των δορυφορικών εικόνων που είναι σήμερα εμπορεύσιμες. Είναι επομένως χρήσιμη η

σύγκριση των εικόνων αυτών με βάση τη καταλληλότητά τους για ερμηνεία δεδομένων Τηλεπισκόπησης.

Στο σχήμα 2.18α. συγκρίνεται η κάλυψη του εδάφους από μία εικόνα Landsat (185×170Km) και μια εικόνα Spot (60×60Km). Απαιτούνται σχεδόν 12 εικόνες Spot για την κάλυψη της ίδιας περιοχής στο έδαφος με μία εικόνα Landsat.

(β)

(α)

Σχήμα 2.18. Σύγκριση των εικόνων Landsat και Spot αναφορικά α) με την επιφάνεια στο έδαφος που καλύπτουν β) με τη χωρική διαχωριστική ικανότητα

Η χωρική διαχωριστική ικανότητα συγκρίνεται στο Σχήμα 2.18β και διαπιστώνεται ότι οι εικόνες SPOT έχουν πολύ καλύτερη χωρική διαχωριστική ικανότητα σε σχέση με τις εικόνες Landsat.

Οι εικόνες από το Landsat έχουν καλύτερη φασματική διαχωριστική ικανότητα από αυτές του SPOT και αυτό γιατί ο θεματικός χαρτογράφος TM του Landsat καταγράφει σε 7 φασματικές ζώνες σε αντίθεση με τον Spot XS που καταγράφει μόνο σε 3 διαύλους (XS1, XS2, XS3).

Ο συνδυασμός επομένως των δορυφορικών εικόνων που προκύπτουν από τα διαφορετικά είδη ανιχνευτών φαίνεται να είναι ιδιαίτερα χρήσιμος. Πριν γίνει όμως αυτό πρέπει να γίνει επεξεργασία των εικόνων και διόρθωση των ραδιομετρικών, ατμοσφαιρικών και γεωμετρικών σφαλμάτων που περιέχουν στην αρχική τους μορφή.

Κεφάλαιο 3

Προετοιμασία δορυφορικών εικόνων για επεξεργασία

Στο κεφάλαιο αυτό αρχικά γίνεται μια σύντομη εισαγωγή στην έννοια της ψηφιακής εικόνας. Στη συνέχεια περιγράφονται οι κυριότερες μέθοδοι ραδιομετρικής, ατμοσφαιρικής διόρθωσης των δορυφορικών εικόνων ενώ δίνεται έμφαση στις τεχνικές γεωμετρικής διόρθωσης. Οι διορθώσεις αυτές είναι απαραίτητο να γίνουν, για την ορθότερη ερμηνεία των δεδομένων Τηλεπισκόπησης.

3.1 Εισαγωγή

Τα ψηφιακά δεδομένα των δορυφορικών εικόνων από τη στιγμή που θα φτάσουν σε κάποιο κέντρο ελέγχου που βρίσκεται στη Γη και μέχρι να είναι κατάλληλα για να χρησιμοποιηθούν για ανάλυση πρέπει να υποβληθούν σε κάποια προετοιμασία.

Υπάρχουν διάφορες τεχνικές προετοιμασίας των δορυφορικών εικόνων. Οι σημαντικότερες διορθώσεις που πρέπει να γίνουν αφορούν στη ραδιομετρική, ατμοσφαιρική και στη γεωμετρική ποιότητα των ψηφιακών δεδομένων. Ο αναλυτής της δορυφορικής εικόνας εφαρμόζει όσες διορθώσεις αυτός κρίνει απαραίτητες ανάλογα με τον σκοπό της μελέτης. Έτσι εάν, για παράδειγμα, επιθυμεί τον διαχωρισμό

μεταξύ διαφορετικών ειδών εδαφικής κάλυψης μιας περιοχής τότε δεν ενδιαφέρεται τόσο για τις απόλυτες αλλά περισσότερο για τις σχετικές ψηφιακές τιμές των εικονοστοιχείων με αποτέλεσμα να μην χρειάζεται, πιθανόν, να πραγματοποιηθεί ατμοσφαιρική διόρθωση των δεδομένων.

Γενικά, εάν ο αναλυτής, θέλει να συνδυάσει τα δεδομένα Τηλεπισκόπησης με άλλα δεδομένα που περιέχονται σε ένα γεωγραφικό σύστημα πληροφοριών (GIS) τότε είναι απαραίτητη η γεωμετρική διόρθωση της δορυφορικής εικόνας σε κάποιο κοινό, με τα υπόλοιπα στοιχεία, γεωγραφικό σύστημα συντεταγμένων.

3.2 Ψηφιακή εικόνα

Με τον όρο εικόνα εννοείται η συνάρτηση του φωτός σε σχέση με την ένταση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Η συνάρτηση αυτή συμβολίζεται με $f(x,y)$ όπου η τιμή ή το πλάτος της f , στις χωρικές συντεταγμένες x,y , δίνει την φωτεινότητά της στο σημείο που αντιστοιχεί σε αυτές τις συντεταγμένες.

Η ψηφιοποίηση της εικόνας $f(x,y)$ είναι απαραίτητη έτσι ώστε να είναι δυνατή η επεξεργασία της από ηλεκτρονικούς υπολογιστές. Έστω ότι μια συνεχής εικόνα $f(x,y)$ μπορεί να αναπαρασταθεί με στοιχεία που ισαπέχουν, διατεταγμένα σε μορφή πίνακα διαστάσεων N γραμμών και M στηλών (σχέση 3.1) όπου κάθε στοιχείο του πίνακα είναι ξεχωριστή ποσότητα:

$$f(x,y) = \begin{bmatrix} f(0,0) & f(0,1) & . & . & . & f(0,M-1) \\ f(1,0) & f(1,1) & . & . & . & f(1,M-1) \\ . & . & & & & . \\ . & . & & & & . \\ . & . & & & & . \\ f(N-1,0) & f(N-1,1) & . & . & . & f(N-1,M-1) \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Το δεύτερο μέλος της σχέσης (3.1) αποτελεί την ψηφιακή μορφή της εικόνας. Κάθε στοιχείο του πίνακα αυτού ονομάζεται εικονοστοιχείο ή ψηφίδα (pixel).

Για τη ψηφιοποίηση της εικόνας πρέπει να διευκρινιστεί το πλήθος των γραμμών, των στηλών καθώς και ο αριθμός των επιπέδων των διαβαθμίσεων του τόνου του γκρι που θα δοθεί σε κάθε εικονοστοιχείο. Οι ποσότητες αυτές δίνονται ως ακέραιες δυνάμεις του 2

$$N=2^n, \quad M=2^k \text{ και } G=2^m \quad (3.2)$$

όπου G ο αριθμός των διαβαθμίσεων του τόνου του γκρι (bit) και n, k, m ακέραιοι αριθμοί.

Έτσι, κβαντοποίηση των 8-bit σημαίνει ότι χρησιμοποιούνται $2^8=256$ διαβαθμίσεις, ενώ για την καταγραφή μιας εικόνας μεγέθους 128×128 εικονοστοιχείων, με κβαντοποίηση 6-bit, απαιτείται αποθηκευτικός χώρος 98304 bit.

3.3 Ραδιομετρικές διορθώσεις

Οι ψηφιακές τιμές των εικονοστοιχείων μιας εικόνας περιέχουν σφάλματα που προκαλούνται κατά τη διάρκεια σάρωσης, μετάδοσης και καταγραφής της εικόνας. Τα κυριότερα από τα σφάλματα αυτά είναι η απώλεια γραμμών σάρωσης, η απορύθμιση του ανιχνευτή, η μετατόπιση γραμμών (line offset) και ο θόρυβος.

3.3.1 Απώλεια γραμμών σάρωσης

Η απώλεια γραμμών σάρωσης γίνεται αντιληπτή από την ύπαρξη, στην εικόνα, οριζόντιων μαύρων ή λευκών γραμμών, δηλαδή γραμμών που αποτελούνται από εικονοστοιχεία με τιμές φωτεινότητας 0 ή 255 αντίστοιχα, εάν χρησιμοποιείται ψηφιοποίηση 8-bit.

Η διόρθωση του σφάλματος αυτού μπορεί να γίνει με αντικατάσταση των ψηφιακών τιμών των εικονοστοιχείων της ελαττωματικής γραμμής (έστω $v_{i,j}$ με i =γραμμή, j =στήλη) με:

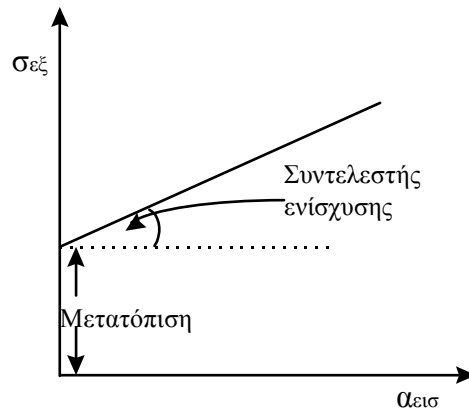
α) την ψηφιακή τιμή του εικονοστοιχείου που βρίσκεται στην προηγούμενη γραμμή σάρωσης. Δηλαδή χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος: $v_{i,j} = v_{i,j-1}$. Στη περίπτωση που η ελαττωματική γραμμή είναι η πρώτη, ο αλγόριθμος τροποποιείται και γίνεται: $v_{i,j} = v_{i,j+1}$.

β) τον μέσο όρο των ψηφιακών τιμών των εικονοστοιχείων που βρίσκονται στην προηγούμενη και στην επόμενη γραμμή σάρωσης. Δηλαδή:

$$v_{i,j} = (v_{i,j-1} + v_{i,j+1})/2 \quad (3.3)$$

3.3.2 Απορύθμιση του ανιχνευτή

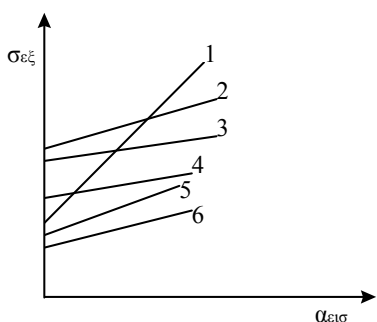
Εάν υπήρχε ιδανικός ανιχνευτής θα έπρεπε να εμφανίζει γραμμικά χαρακτηριστικά της συνάρτησης μεταφοράς (εισερχόμενη ακτινοβολία, $\alpha_{\text{εισ}}$ - εξερχόμενο σήμα, $\sigma_{\text{εξ}}$) όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.1.



Σχήμα 3.1. Χαρακτηριστικά μεταφοράς ενός ανιχνευτή ακτινοβολίας

Στην πραγματικότητα, όμως, οι ανιχνευτές δεν εμφανίζουν πλήρη γραμμικότητα ενώ ακόμα και εάν δεν δέχονται ακτινοβολία παράγουν ένα μικρό σήμα. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται μετατόπιση (offset) ενώ η κλίση της γραμμής ονομάζεται συντελεστής ενίσχυσης (gain) του ανιχνευτή.

Ο θεματικός χαρτογράφος TM του δορυφόρου Landsat έχει 16 ανιχνευτές και καταγράφει σε 7 φασματικές ζώνες ενώ ο πολυφασματικός σαρωτής του ίδιου δορυφόρου 6 ανιχνευτές. Καθένας από αυτούς τους ανιχνευτές έχει ελαφρώς, διαφορετικά χαρακτηριστικά (μετατόπιση, συντελεστή συσχέτισης). Στο Σχήμα 3.2 παρουσιάζεται η συνάρτηση μεταφοράς για τους 6 ανιχνευτές του πολυφασματικού σαρωτή και φαίνονται οι διαφοροποιήσεις στα χαρακτηριστικά τους. Οι διαφοροποιήσεις αυτές είναι υποθετικές, με την έννοια ότι δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ποσοτική ερμηνεία των ανωμαλιών.



Σχήμα 3.2. Υποθετικές ανωμαλίες στους ανιχνευτές του MSS.

Οι ανωμαλίες αυτές προκαλούν απορύθμιση του ανιχνευτή η οποία είναι εμφανής όταν παρατηρηθούν στην εικόνα περιοχές μικρής φωτεινότητας ενώ στην πραγματικότητα αναμένονται περιοχές υψηλής φωτεινότητας.

Μία από τις μεθόδους που έχουν αναπτυχθεί για τη διόρθωση του σφάλματος αυτού είναι η γραμμική μέθοδος. Σύμφωνα με αυτή γίνεται υπολογισμός της μέσης τιμής και της τυπικής απόκλισης του σήματος που δημιουργεί κάθε ανιχνευτής σε ένα διάυλο. Με την προϋπόθεση ότι η πληροφορία που περιέχεται στο διάυλο δεν μεταβάλλεται σημαντικά για κάθε σάρωση (που για το θεματικό χαρτογράφο TM του δορυφόρου Landsat ισούται με 480m, Σχήμα 3.3) τότε αναμένεται οι μέσες τιμές και οι τυπικές αποκλίσεις των τιμών φωτεινότητας των εικονοστοιχείων κάθε ανιχνευτή να είναι περίπου οι ίδιες.

Οι διαφοροποιήσεις σε αυτά τα στατιστικά στοιχεία ανάμεσα στους ανιχνευτές μπορούν να αποδοθούν στις ανωμαλίες στην μετατόπιση και το συντελεστή συσχέτισης των ανιχνευτών (Σχήμα 3.2). Η διόρθωση επιτυγχάνεται με την εξίσωση των μέσων τιμών και των τυπικών αποκλίσεων των ανεξάρτητων (16 για το θεματικό χαρτογράφο) ιστογραμμάτων με τη μέση τιμή και τη τυπική απόκλιση ολόκληρης της εικόνας.

Σχήμα 3.3. Τα χαρακτηριστικά σάρωσης του θεματικού χαρτογράφου του δορυφόρου Landsat.

3.3.3 Μετατόπιση γραμμών σάρωσης

Το φαινόμενο αυτό δεν είναι ιδιαίτερα συνηθισμένο και συμβαίνει όταν γραμμές σάρωσης μετατοπίζονται ανατολικά ή δυτικά των σωστών τους θέσεων. Στην Εικόνα 3.1α. φαίνεται η μετατόπιση των γραμμών που παριστάνουν ξηρά προς τα δυτικά όπου βρίσκεται ο ωκεανός. Αυτό συμβαίνει γιατί οι προβληματικές γραμμές σάρωσης αντί να ξεκινούν από τη πρώτη στήλη της εικόνας ξεκινούν από μεταγενέστερες της πρώτης στήλες.

Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται με τη μετάθεση των αρχικών εικονοστοιχείων κάθε προβληματικής γραμμής στην πρώτη στήλη της εικόνας. Στην Εικόνα 3.1β. παρουσιάζεται η διορθωμένη εικόνα.

(α)

(β)

Εικόνα 3.1. (α) Η αρχική εικόνα με την μετατόπιση των γραμμών σάρωσης και (β) η διορθωμένη εικόνα.

3.3.4 Τυχαίος θόρυβος

Το φαινόμενο κατά το οποίο μερικά εικονοστοιχεία έχουν τιμές φωτεινότητας αρκετά διαφορετικές από αυτές των γειτονικών εικονοστοιχείων ονομάζεται τυχαίος θόρυβος. Οι τιμές φωτεινότητας των εικονοστοιχείων αυτών διορθώνονται με ψηφιακά φίλτρα. Πρόκειται για δισδιάστατες περιοχές εικονοστοιχείων με περιττό αριθμό εικονοστοιχείων τόσο στην οριζόντια όσο και στην κατακόρυφη διεύθυνση. Με την

απαίτηση αυτή εξασφαλίζεται η ύπαρξη ενός κεντρικού εικονοστοιχείου. Στο Σχήμα 3.4 παρουσιάζονται οι υποθετικές τιμές φωτεινότητας 9 εικονοστοιχείων. Το κεντρικό εικονοστοιχείο εμφανίζει τιμή φωτεινότητας πολύ μεγαλύτερη από τα γειτονικά του. Προφανώς πρέπει να διορθωθεί η τιμή φωτεινότητας του κεντρικού εικονοστοιχείου. Η μέση τιμή φωτεινότητας των 9 εικονοστοιχείων είναι ίση με 51. Η τιμή αυτή εξακολουθεί να είναι πολύ διαφορετική από τις γειτονικές της. Όμως η διάμεση τιμή φωτεινότητας της ακολουθίας 24, 25, 26, 26, 27, 27, 255 είναι η τιμή 26. Καθώς η τιμή αυτή προσεγγίζει καλύτερα την τιμή των υπόλοιπων εικονοστοιχείων, είναι αυτή που επιλέγεται για το κεντρικό εικονοστοιχείο που εμφάνιζε το πρόβλημα.

24	26	25
27	255	26
26	25	27

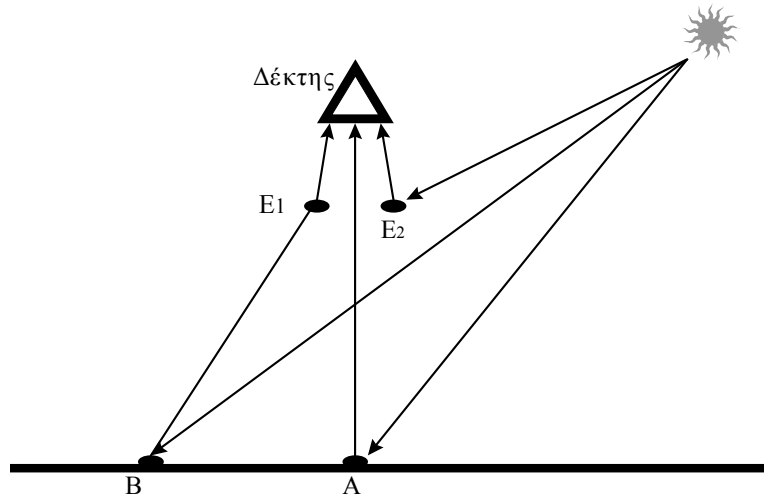
Σχήμα 3.4. Η περιοχή αυτή των τιμών φωτεινότητας για ένα 3×3 μέρος μιας εικόνας αποτελείται από 8 φυσιολογικές τιμές φωτεινότητας που περιβάλλουν μια πολύ υψηλή τιμή φωτεινότητας που δημιουργεί τον τυχαίο θόρυβο. Η αντικατάσταση της τιμής 255 με τη διάμεσο τιμή φωτεινότητας των 9 εικονοστοιχείων απομακρύνει τον τυχαίο θόρυβο.

Η μέθοδος που περιγράφηκε ονομάζεται *μέθοδος του διάμεσου φίλτρου*. Συνήθως, εφαρμόζεται με τη χρησιμοποίηση ενός τετραγωνικού 3×3 πίνακα. Γενικά, τα φίλτρα που χρησιμοποιούνται δεν επηρεάζουν σημαντικά τις περισσότερες αρχικές τιμές φωτεινότητας.

3.4 Ατμοσφαιρικές διορθώσεις

Το ποσό της ακτινοβολίας που φτάνει στο δέκτη Τηλεπισκόπησης δεν είναι ίδια με αυτό που εκπέμπεται από ένα σημείο της επιφάνειας του εδάφους. Η ακτινοβολία που

προέρχεται από το σημείο (A) συνδυάζεται με την ανακλώμενη ενέργεια (E_1) που προέρχεται από κάποιο γειτονικό σημείο (B) και από την ανακλώμενη από την ατμόσφαιρα (E_2) ενέργεια (Σχήμα 3.5).



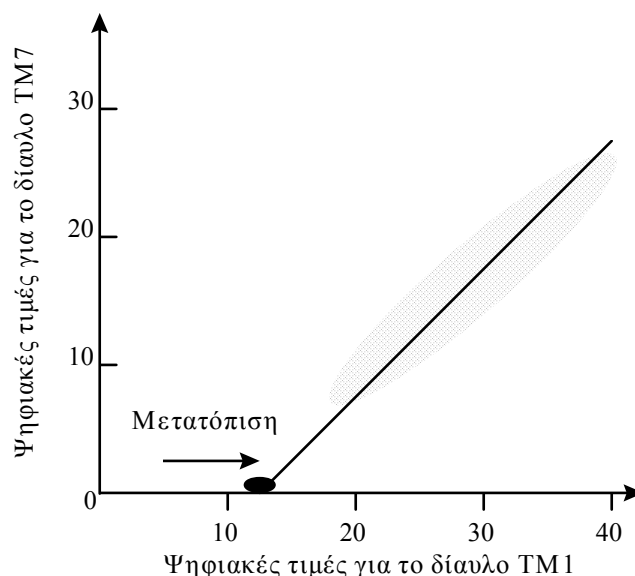
Σχήμα 3.5. Η σύνθεση του σήματος που λαμβάνει ένας δέκτης Τηλεπισκόπησης

Το ανακλώμενο υπέρυθρο ($1.55\text{-}1.75\mu\text{m}$ και $2.08\text{-}2.35\mu\text{m}$, διάυλοι TM5 και TM7 του θεματικού χαρτογράφου) είναι περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος στην οποία η επίδραση της ατμόσφαιρας είναι αμελητέα. Στη περιοχή αυτή, εικονοστοιχεία που απεικονίζουν περιοχές όπως νερό και άσφαλτο θα έχουν μηδενικές τιμές φωτεινότητας.

Για τη διόρθωση του σφάλματος που προκαλεί η ατμόσφαιρα δημιουργείται η γραφική παράσταση των εικονοστοιχείων, σε έναν από τους δύο διαύλους π.χ. το διάυλο TM7, σε συνάρτηση με τις τιμές φωτεινότητας που τα ίδια εικονοστοιχεία έχουν στους υπόλοιπους διαύλους, π.χ. το διάυλο TM1.

Η συσχέτιση μεταξύ των δύο διαύλων προσεγγίζεται με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Η μετατόπιση που παρατηρείται στην ευθεία που δημιουργείται από τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων ως προς την αρχή των αξόνων οφείλεται στην επίδραση της ατμόσφαιρας. Για την απαλοιφή της επίδρασης αυτής, η τιμή της μετατόπισης πρέπει να αφαιρεθεί από όλες τις τιμές φωτεινότητας του διαύλου TM1

(Σχήμα 3.6). Η τεχνική αυτή ονομάζεται τεχνική παλινδρομικής εξίσωσης (regression method).



Σχήμα 3.6. Γραφική παράσταση των τιμών φωτεινότητας στους διαύλους TM1 και TM7 μιας περιοχής εικονοστοιχείων.

Μια άλλη μέθοδος είναι αυτή του ελαχίστου ιστογράμματος. Η μέθοδος στηρίζεται στην ίδια βασική αρχή και για την εφαρμογή της σχεδιάζονται τα ιστογράμματα των τιμών φωτεινότητας των εικονοστοιχείων στους δύο διαύλους (Σχήμα 3.7). Όπως είναι αναμενόμενο, παρατηρείται μετατόπιση των τιμών φωτεινότητας των εικονοστοιχείων του διαύλου TM1 η οποία πρέπει να αφαιρεθεί από όλες τις τιμές φωτεινότητας του διαύλου αυτού.

Η μετατόπιση που συνήθως παρατηρείται είναι για παράδειγμα της τάξης των 20 τιμών φωτεινότητας για το διάυλο 1 του θεματικού χαρτογράφου, μικρότερη των 10 τιμών φωτεινότητας για το διάυλο 2 και ακόμα μικρότερη για το διάυλο 3 (Sabins, 1997). Έτσι, για τη επίτευξη της ατμοσφαιρικής διόρθωσης αρκεί να αφαιρεθούν οι τιμές αυτές από τις αρχικές τιμές φωτεινότητας των εικονοστοιχείων. Οι αριθμοί που αναφέρονται είναι ενδεικτικοί και εξαρτώνται πάντα από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες.

(α)

(β)

Σχήμα 3.7. Τα ιστογράμματα μιας ομάδας εικονοστοιχείων στους διαύλους TM1 και TM7.

3.5 Γεωμετρικές διορθώσεις

Οι γεωμετρικές διορθώσεις είναι τεχνικές που εφαρμόζονται για την αντιμετώπιση των παραμορφώσεων των εικόνων. Οι κυριότεροι παράγοντες που προκαλούν την αλλοίωση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των δορυφορικών εικόνων είναι:

- η περιστροφή της Γης κατά τη διάρκεια της λήψης
- το ευρύ οπτικό πεδίο ορισμένων ανιχνευτών
- η καμπυλότητα της Γης
- τα σφάλματα των ανιχνευτών
- οι μεταβολές στο ύψος πτήσης, την ταχύτητα του δορυφόρου
- οι πανοραμικές παραμορφώσεις

Υπάρχουν δύο μεθοδολογίες διόρθωσης των γεωμετρικών σφαλμάτων των δορυφορικών εικόνων. Η πρώτη απαιτεί να είναι γνωστά με ακρίβεια τα στοιχεία της τροχιάς του δορυφόρου. Η δεύτερη χρησιμοποιεί μαθηματικές σχέσεις για τη συσχέτιση των συντεταγμένων των εικονοστοιχείων στην εικόνα με τα αντίστοιχα σημεία στο έδαφος.

3.5.1 Διόρθωση βάση της γεωμετρίας της τροχιάς του δορυφόρου

Αλλαγή της κλίμακας

Το IFOV του πολυφασματικού σαρωτή του Landsat είναι διαστάσεων 79m. Επομένως, το κάθε εικονοστοιχείο έχει διαστάσεις 79m×79m. Όμως η δειγματοληψία των

δεδομένων γίνεται με πιο ταχύ ρυθμό στην μία διεύθυνση με αποτέλεσμα τα κέντρα των εικονοστοιχείων να απέχουν 56m. Με τον τρόπο αυτό υπάρχει πλευρική επικάλυψη της τάξης 23m (Σχήμα 3.8) και οι πραγματικές διαστάσεις του εικονοστοιχείου είναι 79m×56m.

Σχήμα 3.8. Η σχέση μεταξύ IFOV και επικάλυψης των εικονοστοιχείων για το MSS

Τα εικονοστοιχεία είναι προτιμότερο να έχουν τετραγωνική και όχι ορθογώνια μορφή. Για τον λόγο αυτό πρέπει να μεταβληθεί μία εκ των δύο διαστάσεων των εικονοστοιχείων. Η διαδικασία που περιγράφεται στη συνέχεια μετατρέπει τα εικονοστοιχεία σε τετραγωνικά διαστάσεων 79m×79m.

Ο οριζόντιος άξονας του εικονοστοιχείου διατηρείται αμετάβλητος αλλά ο κατακόρυφος επεκτείνεται κατά ένα συντελεστή ίσο με $79/56 = 1.411$. Έστω (r, c) οι συντεταγμένες ενός εικονοστοιχείου στην εικόνα τότε οι συντεταγμένες στο έδαφος (x, y) προκύπτουν από την εξίσωση:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1.411 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r \\ c \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

ή αντίστροφα

$$\begin{bmatrix} r \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0.709 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Με όμοιο τρόπο μπορεί να γίνει η μετατροπή τους σε διαστάσεις 56m×56m.

Προσανατολισμός στον άξονα Βορρά-Νότου

Οι τροχιές των δορυφόρων Landsat έχουν κλίση περίπου $i=9^0$ στη διεύθυνση Βορρά-Νότου. Αυτό σημαίνει πως οι εικόνες των δορυφόρων αυτών πρέπει να στραφούν αριστερόστροφα κατά μία γωνία. Η γωνία αυτή, δίνεται από τη σχέση:

$$\theta=90-\cos^{-1}\left(\frac{\sin(\theta_E)}{\cos(\varphi)}\right) \quad (3.5)$$

όπου θ_E είναι η κλίση του δορυφόρου στον Ισημερινό και φ είναι το γεωγραφικό πλάτος του κέντρου της εικόνας που πρόκειται να διορθωθεί (Mather, 1987). Έτσι, διατηρώντας του ίδιους συμβολισμούς, ο μετασχηματισμός που πρέπει να γίνει δίνεται από τη σχέση:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r \\ c \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

ή αντίστροφα

$$\begin{bmatrix} r \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Περιστροφή της Γης

Καθώς ο δορυφόρος καταγράφει δεδομένα και μετακινείται νότια, η περιστροφή της Γης έχει ως αποτέλεσμα να παρατηρείται μετατόπιση προς τα δυτικά ανά ομάδα γραμμών σάρωσης (π.χ. 16 για το θεματικό χαρτογράφο-Σχήμα 3.9).

(α)

(β)

Σχήμα 3.9. Η επίδραση της περιστροφής της Γής στην αρχική εικόνα (α) έχει ως αποτέλεσμα τη παραμόρφωσή της (β).

Το ποσό της προς τα δυτικά μετατόπισης της εικόνας εξαρτάται από τις σχετικές ταχύτητες του δορυφόρου, της Γης καθώς και από τις διαστάσεις της εικόνας που πρόκειται να διορθωθεί.

Η ταχύτητα περιστροφής της Γης σε γεωγραφικό μήκος λ , δίνεται από τη σχέση:

$$V_E = R \cos(\lambda) \omega_E \quad (3.8)$$

όπου R είναι η ακτίνα της Γης και ω_E η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής της Γης.

Ο χρόνος λήψης μιας εικόνας μήκους L_{EIK} από ένα δορυφόρο δίνεται από τη σχέση:

$$t = \frac{L_{EIK}}{R \cdot \omega_\delta} \quad (3.9)$$

όπου ω_δ η γωνιακή ταχύτητα του δορυφόρου. Το γινόμενο των σχέσεων (3.8) και (3.9) δίνει τη μετατόπιση της Γης κατά τη διάρκεια λήψης της εικόνας. Η μετατόπιση αυτή πρέπει να διορθωθεί ως προς τον προσανατολισμό Βορρά-Νότου και τελικά, διατηρώντας τους ίδιους συμβολισμούς, δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta X = V_E \cdot t \cdot \cos(\theta) \quad (3.10)$$

Ο μετασχηματισμός που πρέπει να γίνει είναι ο ακόλουθος:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r \\ c \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

ή αντίστροφα

$$\begin{bmatrix} r \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Πανοραμικές παραμορφώσεις

Οι δέκτες που χρησιμοποιούνται στους δορυφόρους έχουν σταθερό στιγμιαίο γωνιακό οπτικό πεδίο IFOV. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.10, οι διαστάσεις του εικονοστοιχείου στο έδαφος είναι μεγαλύτερες στα όρια της σάρωσης από ότι στο ναδίρ.

Συγκεκριμένα, εάν το γωνιακό πεδίο IFOV είναι β και οι διαστάσεις του εικονοστοιχείου στο ναδίρ είναι p τότε οι διαστάσεις του σε γωνία θ είναι κατά μήκος της γραμμής σάρωσης είναι:

$$p_{\theta} = \beta \cdot h \cdot \sec^2(\theta) = p \cdot \sec^2(\theta) \quad (3.13)$$

ενώ κάθετα στη διεύθυνση σάρωσης είναι:

$$p_{\theta} = p \cdot \sec(\theta) \quad (3.14)$$

Σχήμα 3.10. Η επίδραση της γωνίας σάρωσης στο μέγεθος του εικονοστοιχείου με σταθερό, γωνιακό IFOV.

Η παραμόρφωση, επομένως, της κλίμακας που δημιουργείται κάθετα στη διεύθυνση σάρωσης είναι $SN/TN = \theta/\tan(\theta)$. Σε μορφή πίνακα η παραμόρφωση αυτή δίνεται από τη σχέση:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tan(\theta) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r \\ c \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

όπου θ η στιγμιαία γωνία σάρωσης.

Τελικά, η διόρθωση των πανοραμικών παραμορφώσεων επιτυγχάνεται με τη χρησιμοποίηση του αλγόριθμου:

$$\begin{bmatrix} r \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{h \cdot \tan^{-1}(\frac{x}{h})}{x} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

3.5.2 Διόρθωση με τη χρήση επίγειων σημείων ελέγχου

Η μέθοδος αυτή για να λύσει το πρόβλημα των γεωμετρικών παραμορφώσεων των εικόνων δεν εξετάζει τις αιτίες που προκαλούν τα σφάλματα αλλά συνδυάζει τις διαφορές μεταξύ των θέσεων σημείων που είναι εύκολα αναγνωρίσιμα τόσο στην εικόνα όσο και στον χάρτη. Προφανώς, για την σωστή εφαρμογή της μεθόδου απαιτείται η ύπαρξη χαρτών καλής ακρίβειας. Όπου αυτό δεν είναι δυνατό, μπορούν να χρησιμοποιηθούν δέκτες του παγκόσμιου δορυφορικού συστήματος εντοπισμού (GPS) για την εύρεση των συντεταγμένων των σημείων ελέγχου (Ground Control Points, GCP's). Στην περίπτωση αυτή πρέπει τα σημεία ελέγχου να βρίσκονται σε προσβάσιμες περιοχές.

Από τη στιγμή που έχουν βρεθεί κοινά σημεία μεταξύ χάρτη και εικόνας χρησιμοποιούνται πολώνυμα για τη μετατροπή από τις συντεταγμένες της εικόνας (r, c) στις συντεταγμένες του χάρτη (x, y). Τα πολώνυμα που χρησιμοποιούνται στην πράξη είναι μέχρι τρίτου βαθμού (Richards, 1997).

Τα πολώνυμα πρώτου βαθμού ενδέχεται να έχουν τη μορφή:

$$\begin{aligned} r &= \alpha_0 + \alpha_1 \cdot x + \alpha_2 \cdot y \\ c &= \beta_0 + \beta_1 \cdot x + \beta_2 \cdot y \end{aligned} \quad (3.18)$$

όπου $\alpha_i, \beta_i, i=0,1,2$ είναι οι συντελεστές του πολυωνύμου. Εάν προσδιοριστούν οι συντελεστές αυτοί τότε, με γνωστές τις συντεταγμένες ενός σημείου στο χάρτη, μπορούν να προσδιοριστούν οι συντεταγμένες του σημείου αυτού στην εικόνα. Στις περισσότερες περιπτώσεις ισχύει και το αντίστροφο.

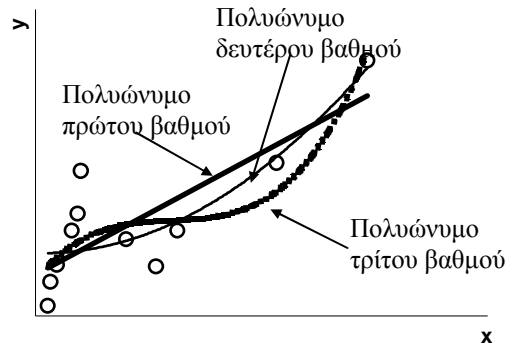
Για την εύρεση των συντελεστών απαιτούνται 3 σημεία GCP's αλλά στα διάφορα λογισμικά προγράμματα επεξεργασίας δορυφορικών εικόνων προτείνεται να μην χρησιμοποιούνται λιγότερα από 6. Στην περίπτωση που υπάρχουν περισσότερα κοινά σημεία ελέγχου, οι συντελεστές υπολογίζονται με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων.

Το πολυώνυμο δευτέρου βαθμού έχει τη μορφή

$$\begin{aligned} r &= \alpha_0 + \alpha_1 \cdot x + \alpha_2 \cdot y + \alpha_3 \cdot x^2 + \alpha_4 \cdot y^2 + \alpha_5 \cdot x \cdot y \\ c &= \beta_0 + \beta_1 \cdot x + \beta_2 \cdot y + \beta_3 \cdot x^2 + \beta_4 \cdot y^2 + \beta_5 \cdot x \cdot y \end{aligned} \quad (3.19)$$

Για πολυώνυμο αυτής της μορφής ο απαιτούμενος αριθμός κοινών σημείων, για την εύρεση των συντελεστών, είναι 6 αλλά όπως και για τα πολυώνυμα πρώτου βαθμού πρακτικά σαν όριο χρησιμοποιείται ο διπλάσιος αριθμός σημείων, δηλαδή τουλάχιστον 12.

Στο Σχήμα 3.11 παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο προσεγγίζεται μια ομάδα εικονοστοιχείων (ανοιχτοί κύκλοι) από τους διάφορους βαθμούς πολυωνύμων. Γίνεται αντιληπτό ότι όσο ο βαθμός του πολυωνύμου αυξάνει, η ακρίβεια του μετασχηματισμού θα είναι υψηλή στην περιοχή ανάμεσα στα GCP's, αλλά στις περιοχές της εικόνας εκτός των GCP's, είναι πιθανή η παραμόρφωση της εικόνας.



Σχήμα 3.11. Παρουσίαση της προβληματικής συμπεριφοράς των πολυωνύμων μεγάλων βαθμών.

3.5.3 Τεχνικές επαναδειγματοληψίας

Με δεδομένο ότι οι συντελεστές των πολυωνύμων μετασχηματισμού έχουν υπολογιστεί πρέπει, στη συνέχεια, να βρεθούν οι συντεταγμένες στο χάρτη των ορίων της εικόνας και να υπολογιστεί ο αριθμός και η απόσταση (σε μέτρα) μεταξύ των κέντρων των εικονοστοιχείων που είναι απαραίτητα για να προσδιοριστεί η κλίμακα του χάρτη (Σχήμα 3.12).

Σχήμα 3.12. Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας επαναδειγματοληψίας. Με "+" παριστάνονται τα κέντρα των εικονοστοιχείων στη διορθωμένη εικόνα και με "ο" τα κέντρα των εικονοστοιχείων στην αρχική, αδιόρθωτη εικόνα.

Με τα πολυώνυμα μετασχηματισμού, δίνοντας τις συντεταγμένες στο χάρτη του κέντρου ενός εικονοστοιχείου προσδιορίζονται οι συντεταγμένες του κέντρου αυτού στην εικόνα. Οι συντεταγμένες αυτές αναφέρονται στις γραμμές και τις στήλες της αρχικής εικόνας και σε ελάχιστες περιπτώσεις είναι ακέραιες τιμές. Αυτό σημαίνει πως το κέντρο του εικονοστοιχείου βρίσκεται ανάμεσα στις γραμμές και τις στήλες των αρχικών εικονοστοιχείων. Έτσι, δεν είναι σαφές το πια τιμή φωτεινότητας πρέπει να δοθεί στο διορθωμένο εικονοστοιχείο. Υπάρχουν 3 τεχνικές που δίνουν λύση στο πρόβλημα αυτό.

1. Επαναδειγματοληψία του πλησιέστερου γειτονικού σημείου

Η τεχνική αυτή δίνει στο διορθωμένο εικονοστοιχείο τη τιμή φωτεινότητας του αρχικού εικονοστοιχείου του οποίου το κέντρο είναι πιο κοντά στο κέντρο του (Σχήμα 3.13). Έτσι, το διορθωμένο εικονοστοιχείο με κέντρο που έχει συντεταγμένες (u, v) θα πάρει τη τιμή φωτεινότητας του πλησιέστερου εικονοστοιχείου η οποία στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι η $\varphi(i+1, j+1)$.

Σχήμα 3.13. Η επαναδειγματοληψία πλησιέστερου σημείου.

Η τεχνική αυτή έχει το πλεονέκτημα ότι είναι γρήγορη καθώς και το ότι διατηρεί τις αρχικές τιμές φωτεινότητας. Χρησιμοποιείται κυρίως για πολυφασματικά δεδομένα καθώς κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας διατηρείται η συσχέτιση μεταξύ των διάφορων διαύλων.

2. Διγραμμική επαναδειγματοληψία

Η τεχνική αυτή χρησιμοποιεί τα τέσσερα πλησιέστερα εικονοστοιχεία για τη διεξαγωγή μιας δισδιάστατης γραμμικής παρεμβολής έτσι ώστε να ληφθεί η τιμή φωτεινότητας του διορθωμένου εικονοστοιχείου (Σχήμα 3.14).

Σχήμα 3.14. Η διγραμμική επαναδειγματοληψία. Η τιμή του εικονοστοιχείου $V(r,c)$ προκύπτει από τις τιμές των τεσσάρων πλησιέστερων εικονοστοιχείων

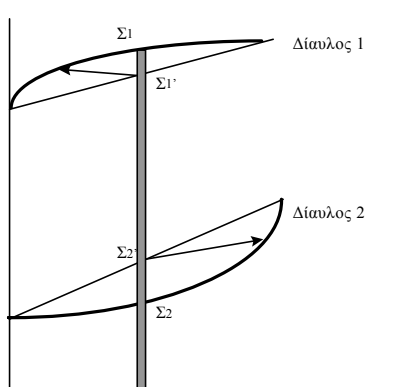
Η τιμή φωτεινότητας δίνεται από τη σχέση (Mather, 1987):

$$V = (1 - \alpha) \cdot (1 - b) \cdot V_{i,j} + \alpha \cdot (1 - b) \cdot V_{i,j+1} + b \cdot (1 - \alpha) \cdot V_{i+1,j} + \alpha \cdot b \cdot V_{i+1,j+1} \quad (3.17)$$

όπου $\alpha = c-j$ και $b = r-i$.

Η τεχνική δεν δίνει αποτελέσματα όταν το σημείο (c,r) ταυτίζεται με κάποιο από τα τέσσερα σημεία $V_{i,j}$. Λόγω της δισδιάστατης γραμμικής παρεμβολής ελαττώνονται τα υψηλής συχνότητας στοιχεία της εικόνας με αποτέλεσμα μιας πιο ομαλής μορφής της

εικόνας. Η τεχνική αυτή δεν πρέπει να εφαρμόζεται σε πολυφασματικές εικόνες γιατί κατά τη διάρκεια της δισδιάστατης παρεμβολής η συσχέτιση μεταξύ δύο διαύλων μπορεί να μεταβληθεί σημαντικά (Σχήμα 3.15). Από το σχήμα φαίνεται πως η αρχική διαφορά μεταξύ των Σ_1 και Σ_2 , είναι διαφορετική από τη διαφορά των αντίστοιχων τιμών Σ'_1 και Σ'_2 λόγω της γραμμικής παρεμβολής στους δύο διαύλους.



Σχήμα 3.15. Η διαφορά μεταξύ των νέων τιμών Σ'_1 και Σ'_2 δεν είναι η ίδια με αυτή των αρχικών τιμών Σ_1 και Σ_2 .

3. Κυβική επαναδειγματοληψία

Η τεχνική αυτή χρησιμοποιεί τα 16 πλησιέστερα εικονοστοιχεία σε ένα πίνακα 4x4 και υπολογίζει τη τιμή φωτεινότητας του διορθωμένου εικονοστοιχείου χρησιμοποιώντας δισδιάστατη παρεμβολή τρίτης τάξης.

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.16 για να σχηματιστούν οι 4 παρεμβολές χρησιμοποιούνται πολυώνυμα τρίτης τάξης κατά μήκος των τεσσάρων γραμμών των τεσσάρων εικονοστοιχείων που περιβάλλουν το σημείο της εικόνας. Στη συνέχεια χρησιμοποιείται ένα πέμπτο πολυώνυμο τρίτης τάξης για τη δημιουργία της τιμής φωτεινότητας του σημείου αυτού από τη σχετική του θέση στο κάνναβο.

Σχήμα 3.16. Η κυβική επαναδειγματοληψία. Η τιμή φωτεινότητας, $\varphi(i,j)$, του κάθε εικονοστοιχείου προκύπτει από τις τιμές φωτεινότητας των 16 πλησιέστερων εικονοστοιχείων με χρήση 5 πολυωνύμων τρίτης τάξης.

Με τη εφαρμογή της τεχνικής αυτής δημιουργούνται εικόνες πιο ομαλές από ότι στη διγραμμική τεχνική και χρησιμοποιείται, κυρίως, όταν η εικόνα προορίζεται για φωτοερμηνεία. Ωστόσο, σε αντίθεση με τις δύο άλλες τεχνικές ακόμα και εάν κάποιο διορθωμένο εικονοστοιχείο ταυτίζεται με κάποιο αρχικό, δεν λαμβάνει αμέσως την τιμή φωτεινότητας του σημείου αυτού με αποτέλεσμα να θεωρείται ως ιδιαίτερα χρονοβόρα τεχνική.

3.5.4 Υπέρθεση εικόνων

Αρκετές από τις εφαρμογές της Τηλεπισκόπησης απαιτούν δύο ή περισσότερες εικόνες της ίδιας περιοχής, που καταγράφηκαν σε διαφορετικές χρονικές περιόδους, να υποστούν ταυτόχρονη επεξεργασία. Σε αυτή τη περίπτωση ή θα διορθωθεί η κάθε μία ξεχωριστά σε ένα κοινό γεωγραφικό σύστημα συντεταγμένων ή θα διορθωθεί η μία εικόνα βάση της άλλης.

Τότε η πρώτη εικόνα επιλέγεται ως η κύρια εικόνα και η δεύτερη διορθώνεται με βάση τις συντεταγμένες της κύριας. Χρησιμοποιούνται οι ίδιες τεχνικές που αναφέρθηκαν στις προηγούμενες ενότητες με τη διαφορά ότι τώρα τον ρόλο των συντεταγμένων του χάρτη τον έχουν οι συντεταγμένες της κύριας εικόνας.

Εάν, επομένως, σκοπός του αναλυτή είναι η γεωμετρική διόρθωση μιας εικόνας ή η συνένωση διάφορων εικόνων, είναι απαραίτητη η πολύ καλή γνώση των χαρτογραφικών προβολών που χρησιμοποιούνται.

Κεφάλαιο 4

Χαρτογραφικές απεικονίσεις - GPS

Σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι να δώσει τις έννοιες των χαρτογραφικών απεικονίσεων και του δορυφορικού συστήματος εντοπισμού GPS. Η κατανόηση των πρώτων είναι απαραίτητη στην περίπτωση που απαιτείται η γεωμετρική διόρθωση ή συνένωση δορυφορικών εικόνων. Το GPS εφαρμόζεται σε περιπτώσεις γεωμετρικών διορθώσεων με βάση επίγεια σημεία ελέγχου και είναι σημαντικό να έχουν κατανοηθεί οι βασικές αρχές λειτουργίας του.

4.1 Εισαγωγή

Για να γίνει η γεωμετρική διόρθωση των δορυφορικών εικόνων με τη χρήση GCP's πρέπει να είναι γνωστές οι συντεταγμένες των σημείων αυτών. Ο πιο απλός τρόπος

προσδιορισμού των συντεταγμένων είναι η χρησιμοποίηση κάποιου χάρτη ενώ η πιο σύγχρονη μέθοδος είναι η χρήση του δορυφορικού συστήματος GPS. Η επιτυχία επομένως μιας γεωμετρικής διόρθωσης εξαρτάται, εκτός των άλλων, και από το επίπεδο γνώσης του αναλυτή αναφορικά με το τι αναπαριστά ένας χάρτης, τι ακριβώς είναι οι συντεταγμένες ενός χάρτη και ποια η διαφορά τους από τις συντεταγμένες που προκύπτουν από το GPS.

Οι γεωδαιτικές συντεταγμένες και τα υψόμετρα που χρησιμοποιούνται για να προσδιορίσουν τη θέση ενός σημείου στην επιφάνεια της Γης δεν έχουν φυσική σημασία εάν δεν καθοριστούν σύμφωνα με ένα σύστημα αναφοράς το οποίο να έχει οριστεί σε σχέση με το στερεό φλοιό της Γης (Μερτίκας, 1995). Έτσι, είναι απαραίτητο να είναι γνωστό το σχήμα και το μέγεθος της Γης. Η αναπαράσταση της επιφάνειας της Γης στο επίπεδο ονομάζεται χαρτογραφική απεικόνιση.

Στο κεφάλαιο αυτό δίνεται ο ορισμός του γεωειδούς ενώ γίνεται αναφορά και στα κυριότερα γεωδαιτικά συστήματα αναφοράς που χρησιμοποιούνται στην Ελλάδα και στον υπόλοιπο κόσμο. Επίσης, περιγράφονται τα κυριότερα χαρακτηριστικά του παγκόσμιου δορυφορικού συστήματος εντοπισμού GPS η συμμετοχή του οποίου, σε εφαρμογές Τηλεπισκόπησης συνεχώς αυξάνει.

4.2 Το σχήμα και το μέγεθος της Γης

Οι χαρτογραφικές απεικονίσεις που χρησιμοποιούνται για τις γεωμετρικές διορθώσεις δορυφορικών εικόνων προσπαθούν να αποδώσουν στο επίπεδο, την τρισδιάστατη επιφάνεια της Γης. Μια συνεχής μαθηματική σχέση που καλύπτει το μεγαλύτερο μέρος της γήινης επιφάνειας μπορεί να αναπαραστήσει το σχήμα της Γης. Έτσι, εάν προσαρμοστεί μια συνεχής επιφάνεια στην θαλάσσια επιφάνεια της Γης θα έχει επιτευχθεί κάλυψη του 72% της συνολικής επιφάνειας της Γης.

Το πρόβλημα που δημιουργείται σε αυτή τη μαθηματική σχέση είναι η αστάθεια της στιγμιαίας επιφάνειας της θάλασσας λόγω κυμάτων, ανέμων κ.ά. Όμως οι ετήσιοι μέσοι όροι της μέσης στάθμης της θάλασσας (ΜΣΘ) δεν μεταβάλλονται περισσότερο από 10 εκατοστά σε περίοδο μερικών δεκαετιών (Μερτίκας, 1995).

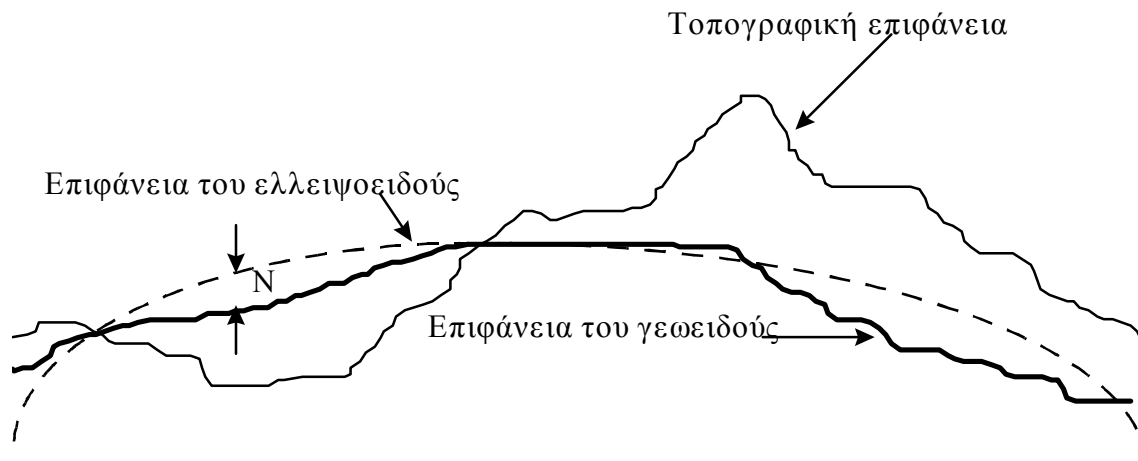
Με τον όρο "σχήμα" και "μέγεθος" της Γης νοείται η ισοδυναμική επιφάνεια, που εκτείνεται και κάτω από τις ηπείρους, που προσεγγίζει καλύτερα τη μέση στάθμη της θάλασσας. Η επιφάνεια αυτή ονομάζεται *γεωειδές*.

Η μαθηματική αναπαράσταση του γεωειδούς γίνεται με τη χρησιμοποίηση του ελλειψοειδούς εκ περιστροφής (ΕΕΠ). Λόγω του ότι η μία επιφάνεια (ΕΕΠ) είναι ομαλή, αφού είναι μαθηματικά ορισμένη, και η άλλη (γεωειδές) είναι μια επιφάνεια που ορίζεται με μετρήσεις φυσικών μεγεθών είναι αναμενόμενο αυτές οι δύο επιφάνειες να μην ταυτίζονται πλήρως.

Η διαφορά, σε ένα σημείο, μεταξύ του γεωειδούς και του ελλειψοειδούς ονομάζεται υψόμετρο του γεωειδούς N και μετράται από το ελλειψοειδές μέχρι το γεωειδές και μπορεί να πάρει και αρνητικές τιμές (Σχήμα 4.1). Το υψόμετρο ενός σημείου πάνω από το γεωειδές ονομάζεται ορθομετρικό υψόμετρο H ενώ το υψόμετρο πάνω από το ελλειψοειδές ονομάζεται γεωμετρικό υψόμετρο h .

Τα υψόμετρα αυτά συνδέονται με τη σχέση:

$$N \approx h - H \quad (4.1)$$



Επιφάνειες αναπαράστασης της Γης

Σχήμα 4.1. Η διαφορά μεταξύ τοπογραφικής επιφάνειας και των επιφανειών του ελλειψοειδούς και του γεωειδούς. Η διαφορά ελλειψοειδούς-γεωειδούς (N) ονομάζεται υψόμετρο του γεωειδούς.

Ένα ελλειψοειδές εκ περιστροφής δημιουργείται με τη περιστροφή μιας έλλειψης, γύρω από το μικρό ημι-άξονά της. Η εξίσωσή του, σε ένα τρισδιάστατο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων, είναι:

$$\frac{X^2 + Y^2}{a^2} + \frac{Z^2}{b^2} = 1 \quad (4.2)$$

όπου a, b ο μεγάλος και ο μικρός ημι-άξονας της έλλειψης, αντίστοιχα. Η τριάδα (X, Y, Z) προσδιορίζεται βάση ενός συστήματος συντεταγμένων που ονομάζεται Γήινο Σύστημα Αναφοράς (Conventional Terrestrial System, CTS).

Ένα ελλειψοειδές, συνήθως ορίζεται με βάση τον μεγάλο ημι-άξονά του και ένα παράγοντα που ονομάζεται επιπλάτυνση. Η επιπλάτυνση f δίνεται από τη σχέση:

$$f = \frac{a - b}{a} \quad (4.3)$$

ενώ η ποσότητα $\frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a}$ ονομάζεται κύρια εκκεντρότητα e της έλλειψης.

Στον Πίνακα 3.1. παρουσιάζονται οι παράμετροι των κυριοτέρων ελλειψοειδών εκ περιστροφής.

Πίνακας 3.1. Τα κυριότερα ελλειψοειδή εκ περιστροφής

Ελλειψοειδές	Μεγάλος ημι-άξονας (m)	1/επιπλάτυνση (1/f)
Airy 1830	6377563.396	299.324964600
Bessel 1841	6377397.155	299.152812800
Clarke 1866	6378206.400	294.978698200
Clarke 1880	6378249.145	293.465000000
Everest 1830	6377276.345	300.801700000
Διεθνές 1924	6378388.000	297.000000000
Hough 1956	6378270.000	297.000000000
Fischer 1960 (Mercury)	6378166.000	298.300000000
GRS 1967	6378160.000	298.247167427
GRS 1975	6378140.000	298.257000000
GRS 1980	6378137.000	298.257222101
WGS 1966	6378145.000	298.250000000
WGS 1972	6378135.000	298.260000000
WGS 1984	6378137.000	298.257223563

Οι καρτεσιανές συντεταγμένες (x,y,z) μπορούν να μετατραπούν σε γεωδαιτικές, καμπυλόγραμμες συντεταγμένες (ϕ,λ,h) και το αντίστροφο μέσω διάφορων μαθηματικών σχέσεων (Σχήμα 4.2).

Σχήμα 4.2. Τα γεωδαιτικά μήκη και πλάτη

Πριν ξεκινήσει μια χαρτογραφική απεικόνιση πρέπει να αποφασιστεί η φύση του επιπέδου της, να επιλεγεί η αρχή των αξόνων, ο προσανατολισμός του ελλειψοειδούς σε σχέση με το χαρτογραφικό επίπεδο κ.ά. Για ένα χάρτη συνήθως επιλέγεται ένα ορθογώνιο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων με τη διεύθυνση του άξονα των x προς την Ανατολή (Easting) και τη διεύθυνση του άξονα των y προς το Βορρά (Northing). Η αρχή (ϕ_0, λ_0) των συντεταγμένων του συστήματος αυτού προσδιορίζεται από τις σχέσεις:

$$0 = x(\phi, \lambda)$$

$$0 = y(\phi, \lambda)$$

Σε περίπτωση μεγάλων τιμών x, y μετατίθεται η αρχή των αξόνων ώστε αυτές να είναι πάντα θετικές και να έχουν, σχετικά, μικρές τιμές.

Αφού έχει γίνει αναφορά στο σχήμα και το μέγεθος της Γης, το επόμενο βήμα για την κατανόηση της φύσης των γεωμετρικών διορθώσεων των δορυφορικών εικόνων, είναι η κατανόηση του τι είναι ένας χάρτης.

4.3 Χαρτογραφικές απεικονίσεις

Οι χαρτογραφικές απεικονίσεις υλοποιούνται με τον υπολογισμό των καρτεσιανών συντεταγμένων x, y για κάθε ζευγάρι γεωδαιτικών καμπυλόγραμμων συντεταγμένων φ, λ . Υπάρχουν δύο μέθοδοι χαρτογραφικής απεικόνισης: η μαθηματική και η γεωμετρική.

Στη μαθηματική απεικόνιση δεν υπάρχει συγκεκριμένη γεωμετρική προβολή. Με τη χρησιμοποίηση μαθηματικών σχέσεων γίνεται η μετατροπή των γεωδαιτικών συντεταγμένων φ, λ στις καρτεσιανές x, y .

Στη γεωμετρική απεικόνιση μια επιφάνεια που μπορεί να αναπτυχθεί σε επίπεδο (αναπτυκτή επιφάνεια) επιλέγεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να τέμνει ή να εφάπτεται της Γης. Οι επιφάνειες αναφοράς είναι το ελλειψοειδές εκ περιστροφής ή η σφαίρα ενώ υπάρχουν 3 αναπτυκτές επιφάνειες: το επίπεδο, ο κώνος και ο κύλινδρος.

Η απεικόνιση η οποία χρησιμοποιείται πιο συχνά σήμερα σε παγκόσμιο επίπεδο είναι η παγκόσμια εγκάρσια μερκατορική (Universal Transverse Mercator, UTM). Πρόκειται για κυλινδρική απεικόνιση με το κύλινδρο εφαπτόμενο σε κάποιο μεσημβρινό (Σχήμα 4.3) ενώ ως ελλειψοειδές αναφοράς, για την Ευρώπη χρησιμοποιεί το GRS-80. Αυτό εξαρτάται από την απεικόνιση που χρησιμοποιείται.

Σχήμα 4.3. Η προβολή UTM.

Η απεικόνιση αυτή καλύπτει σχεδόν όλη τη Γη και χωρίζεται σε 60 ζώνες των 6° η κάθε μία με επικάλυψη $30'$. Η κάθε ζώνη έχει δύο κεντρικούς μεσημβρινούς έτσι ώστε να περιορίζεται η παραμόρφωση κάθε ζώνης (Σχήμα 4.4).

Σχήμα 4.4. Οι ζώνες της UTM

Η UTM έχει σχεδόν παγκόσμια κάλυψη (84°N έως 80°S) ενώ η αρχή κάθε ζώνης στο βόρειο ημισφαίριο είναι στον Ισημερινό 500,000 μέτρα δυτικά του κεντρικού μεσημβρινού και στο νότιο ημισφαίριο 10,000,000 μέτρα νότια της βόρειας αρχής της (Σχήμα 4.5). Η αρχή των αξόνων για τα γεωδαιτικά μήκη λ είναι στον κεντρικό μεσημβρινό ενώ για τα γεωδαιτικά πλάτη φ στον Ισημερινό.

Σχήμα 4.5. Οι μετατοπίσεις κάθε ζώνης της UTM στο βόρειο και το νότιο ημισφαίριο

Η παγκόσμια εγκάρσια μερκατορική προβολή είναι η προβολή που χρησιμοποιείται περισσότερο για τις χαρτογραφικές απεικονίσεις στη Γη. Το ερώτημα που τίθεται είναι ποιά είναι η προβολή με την οποία λαμβάνονται οι δορυφορικές εικόνες.

Οι δορυφορικές εικόνες από τον Landsat και από άλλους δορυφόρους που βρίσκονται σε ηλιοσύγχρονη τροχιά χρησιμοποιούν μια παραλλαγή της UTM που ονομάζεται διαστημική πλάγια μερκατορική προβολή (Space Oblique Mercator, SOM - Σχήμα 4.6). Το ίχνος του δορυφόρου στο έδαφος δημιουργεί ένα κύκλο. Στη προβολή αυτή ο κύλινδρος εφάπτεται στον κύκλο ενώ το ότι, στη περίπτωση του Landsat, το πλάτος του ίχνους κάθε εικόνας είναι 185 Km καθορίζεται από το γωνιακό οπτικό πεδίο του δέκτη και το ύψος πτήσης του δορυφόρου.

Σχήμα 4.6. Η προβολή SOM στην περίπτωση των εικόνων του δορυφόρου Landsat

4.4 Γεωδαιτικά συστήματα αναφοράς

Για να οριστεί ένα γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς (ΓΣΑ) πρέπει να επιλεγεί ένα γεωδαιτικό datum το οποίο δίνει τις αρχικές συντεταγμένες σε ένα σημείο καθώς και τις διαστάσεις ενός ελλειψοειδούς αναφοράς. Η υλοποίηση του ΓΣΑ επιτυγχάνεται με τις μετρήσεις ενός γεωδαιτικού δικτύου και εφαρμόζεται με την απεικόνιση του ελλειψοειδούς σε ένα επίπεδο που δίνει τις επίπεδες συντεταγμένες (x,y) του δικτύου. Η επιλογή του datum πρέπει να γίνεται έτσι ώστε να προσαρμόζεται όσο το δυνατό καλύτερα στο γεωειδές της περιοχής.

Στην Ελλάδα χρησιμοποιείται, σήμερα, το Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς του 1987 (ΕΓΣΑ-87) σε συνδυασμό με παλαιότερα όπως το ED50 και το παλιό ελληνικό datum. Τα κυριότερα παγκόσμια συστήματα αναφοράς είναι το WGS84 και την τελευταία πενταετία τα ITRF (International Terrestrial Reference Frame).

4.4.1 Το ED50

Πρόκειται για το ευρωπαϊκό datum του 1950 το οποίο χρησιμοποιεί το διεθνές ελλειψοειδές του 1924 και ως χαρτογραφική προβολή την εγκάρσια μερκατορική. Στους παλιούς χάρτες της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού (ΓΥΣ) αναγράφεται και το παλιό ελληνικό datum το οποίο χρησιμοποιούσε το ελλειψοειδές του Bessel του 1841 και την προβολή Hatt.

4.4.2 Το ΕΓΣΑ-87

Πρόκειται για το πιο σύγχρονο σύστημα αναφοράς της Ελλάδας και όλες οι γεωδαιτικές μετρήσεις πρέπει να γίνονται αναφορικά με το σύστημα αυτό. Χρησιμοποιεί το ελλειψοειδές GRS-80 και την εγκάρσια μερκατορική προβολή με μία

όμως μόνο ζώνη των 12^0 έτσι ώστε να καλύπτεται όλη η χώρα από μία ζώνη. Ο κεντρικός μεσημβρινός έχει γεωδαιτικό μήκος $\lambda_0 = +24^0$ και ο συντελεστής κλίμακας για τον παραπάνω κεντρικό μεσημβρινό είναι $m_0 = 0.9994$. Αρχή των αξόνων θεωρείται η τομή του ισημερινού με τον κεντρικό μεσημβρινό ενώ η αρχή των τετμημένων έχει αρχική τιμή $X_0 = 500,000\text{m}$.

4.4.3 To WGS-84

Το γεωδαιτικό αυτό σύστημα αναφοράς συντεταγμένων είναι το σύστημα στο οποίο συνηθίζεται να μετατρέπονται οι συντεταγμένες ενός τοπικού datum όταν πρόκειται να χρησιμοποιηθούν για διεθνή αναφορά. Χρησιμοποιεί το ελλειψοειδές WGS-84 το οποίο έχει ελάχιστες διαφορές από το ελλειψοειδές του GRS-80. Συγκεκριμένα υπάρχει διαφορά μόνο στην επιπλάτυνση και αυτή είναι ίση με -0.0016 .

Το WGS-84 είναι το datum που χρησιμοποιεί το GPS. Είναι, επομένως, απαραίτητο να είναι γνωστή στον μελετητή που χρησιμοποιεί, για κάποιο σκοπό το GPS, η σχέση μεταξύ του WGS-84 και του τοπικού datum.

4.4.4 To ITRS

Το Διεθνές Γήινο Σύστημα Αναφοράς (International Terrestrial Reference System, ITRS) έχει την αρχή των αξόνων του στο κέντρο μάζας όλης της Γης, συμπεριλαμβανομένων των ωκεανών και της ατμόσφαιρας. Το ITRS υλοποιείται με τις εκτιμήσεις των συντεταγμένων και των ταχυτήτων ενός αριθμού σταθμών παρατήρησης (SSCs) που αποτελούν το Διεθνές Γήινο Πλαίσιο Αναφοράς ITRF (Σχήμα 4.7).

Σχήμα 4.7. Το δίκτυο των 201 σταθμών που αποτελούν το ITRF-94

Με τον όρο *πλαίσιο αναφοράς* (reference frame) στη γεωδαισία καλείται ένα σύνολο σημείων με τις συντεταγμένες τους (με την ευρεία έννοια) τα οποία αποτελούν ένα ιδανικό σύστημα αναφοράς. Η παρατήρηση και ανάλυση των δεδομένων γίνεται με τη

χρησιμοποίηση διάφορων τεχνικών όπως VLBI (Very Long Baseline Interferometry), LLR (Lunar Laser Ranging) καθώς και διαστημικές γεωδαιτικές τεχνικές όπως GPS, SLR (Satellite Laser Ranging), DORIS (Doppler Orbitography by Radiopositioning Intergrated on Satellite). Για παράδειγμα για την υλοποίηση του ITRF-94 χρησιμοποιήθηκαν 104 VLBI, 62 SLR, 66 GPS και 52 DORIS συντεταγμένες σταθμών.

Κάθε χρόνο δημοσιεύονται οι λύσεις για τους σταθμούς του ITRF. Έτσι, το ITRF-94 αναφέρεται στο πλαίσιο των συντεταγμένων και των ταχυτήτων που αναλύθηκαν το 1995 με τη χρησιμοποίηση όλων των δεδομένων του έτους 1994.

4.5 Το δορυφορικό σύστημα εντοπισμού GPS

Το παγκόσμιο δορυφορικό σύστημα εντοπισμού GPS δίνει τη δυνατότητα στους χρήστες του να μπορούν να υπολογίσουν τη θέση τους σε οποιοδήποτε μέρος της επιφάνειας της Γης αρκεί να υπάρχει το απαιτούμενο οπτικό πεδίο προς τους δορυφόρους. Το γεγονός αυτό έχει ιδιαίτερη σημασία στην γεωμετρική διόρθωση των δορυφορικών εικόνων καθώς είναι δυνατός ο προσδιορισμός των συντεταγμένων διάφορων σημείων ανεξάρτητα του εάν υπάρχει ή όχι χάρτης της περιοχής.

Σήμερα υπάρχουν δύο δορυφορικά συστήματα εντοπισμού που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ελεύθερα. Το σύστημα NAVSTAR ιδρύθηκε και λειτουργεί μέσω του Υπουργείου Αμύνης των ΗΠΑ (DoD). Το σύστημα GLONASS ελέγχεται και λειτουργεί από τη Ρωσική κυβέρνηση. Στις επόμενες ενότητες γίνεται αναφορικά στο σύστημα NAVSTAR ή απλά GPS.

4.5.1 Αρχές λειτουργίας

Το σύστημα GPS για τον καθορισμό της θέσης χρησιμοποιεί ραδιοκύματα τα οποία στέλνονται από τους δορυφόρους. Σε αντίθεση με τα προηγούμενα συστήματα εντοπισμού τα οποία βασίζονταν σε επίγειους πομπούς, η χρησιμοποίηση πομπών σε δορυφόρους για την κάλυψη της επιφάνειας της Γης έχει ως αποτέλεσμα την επίτευξη υψηλότερης ακρίβειας.

Κάθε δορυφόρος GPS εκπέμπει σε δύο συχνότητες: την L_1 (1575.42 MHz) και την L_2 (1227.60 MHz). Στις συχνότητες αυτές μεταδίδονται πληροφορίες σχετικές με τον χρόνο, τη θέση του δορυφόρου καθώς και για τις συνθήκες λειτουργίας του δορυφόρου. Για το σύστημα GPS υπάρχουν 24 δορυφόροι σε 6 τροχιακά επίπεδα (Σχήμα 4.8). Οι δορυφόροι βρίσκονται σε υψόμετρο 20,200 Km, με τροχιά που έχει κλίση $i=55^\circ$ ως προς τον Ισημερινό. Ο όρος *δορυφορικό τμήμα* χρησιμοποιείται για την περιγραφή των δορυφόρων που ανήκουν στο σύστημα.

Σχήμα 4.8. Οι δορυφόροι GPS περιστρέφονται σε 6 τροχιακά επίπεδα. Κάθε τροχιακό επίπεδο έχει 4 δορυφόρους ενώ η κλίση του είναι $i=55^\circ$

Για να ληφθούν τα δεδομένα που μεταδίδονται από τους δορυφόρους, πρέπει ο χρήστης να έχει ένα ειδικό δέκτη ραδιοκυμάτων. Ο δέκτης αυτός περιέχει ένα ειδικό επεξεργαστή που υπολογίζει τη θέση στην οποία βρίσκεται, βασιζόμενος στα σήματα των δορυφόρων. Ο χρήστης δεν μπορεί να στείλει κανένα μήνυμα στο δορυφόρο ενώ και η ύπαρξη του χρήστη δεν είναι γνωστή από το δορυφόρο. Υπάρχει απεριόριστος αριθμός χρηστών που μπορούν να χρησιμοποιούν το σύστημα ταυτόχρονα. Οι χρήστες μαζί με τους δέκτες αποτελούν το *τμήμα του χρήστη*.

Οι δορυφόροι ελέγχονται και παρακολουθούνται από επίγειους σταθμούς (το *τμήμα ελέγχου*). Οι σταθμοί παρακολούθησης καταγράφουν δεδομένα από τους δορυφόρους τα οποία στη συνέχεια τα μεταδίδουν στο κεντρικό σταθμό ελέγχου που βρίσκεται στην αεροπορική βάση Falcon στις ΗΠΑ (Σχήμα 4.9). Από το κεντρικό σταθμό ελέγχου στέλνονται, σε τακτά χρονικά διαστήματα, διορθώσεις στα χρονόμετρα των δορυφόρων, στις παραμέτρους της τροχιάς κ.ά. (Σχήμα 4.10)

Τόσο το σύστημα NAVSTAR όσο και το GLONASS παρέχουν σήματα για τον προσδιορισμό της θέσης δύο ειδών. Το σήμα με το οποίο είναι δυνατό να επιτευχθεί ακρίβεια της τάξης των χιλιοστών δεν είναι διαθέσιμο σε όλους τους χρήστες αλλά είναι κωδικοποιημένο και χρησιμοποιείται για τους στρατιωτικούς σκοπούς κάθε χώρας (ΗΠΑ και Ρωσία, αντίστοιχα). Το σύστημα με τη μικρότερη ακρίβεια μπορεί να το χρησιμοποιήσει όποιος το επιθυμεί.

Σχήμα 4.9. Οι σταθμοί παρακολούθησης και ελέγχου του συστήματος NAVSTAR GPS

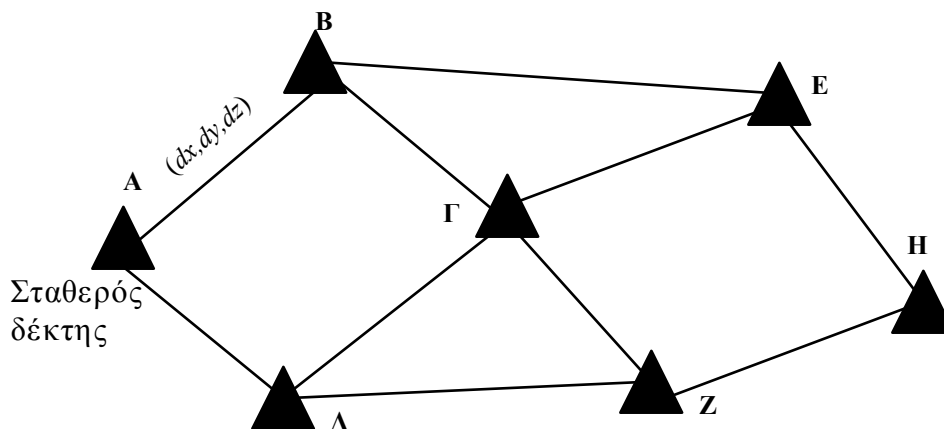
Σχήμα 4.10. Η διαδικασία ελέγχου των δορυφόρων GPS

4.5.2 Μέθοδοι προσδιορισμού θέσης

Οι μετρήσεις με GPS μπορούν να γίνουν χρησιμοποιώντας διάφορες τεχνικές παρατήρησης και επεξεργασίας. Αυτές διαφέρουν ως προς τον χρόνο παρατήρησης, την αποτελεσματικότητα και την ακρίβεια. Ανάλογα με την εφαρμογή και το περιβάλλον της μελέτης, γίνεται η επιλογή της πιο κατάλληλης τεχνικής.

Στατικός προσδιορισμός

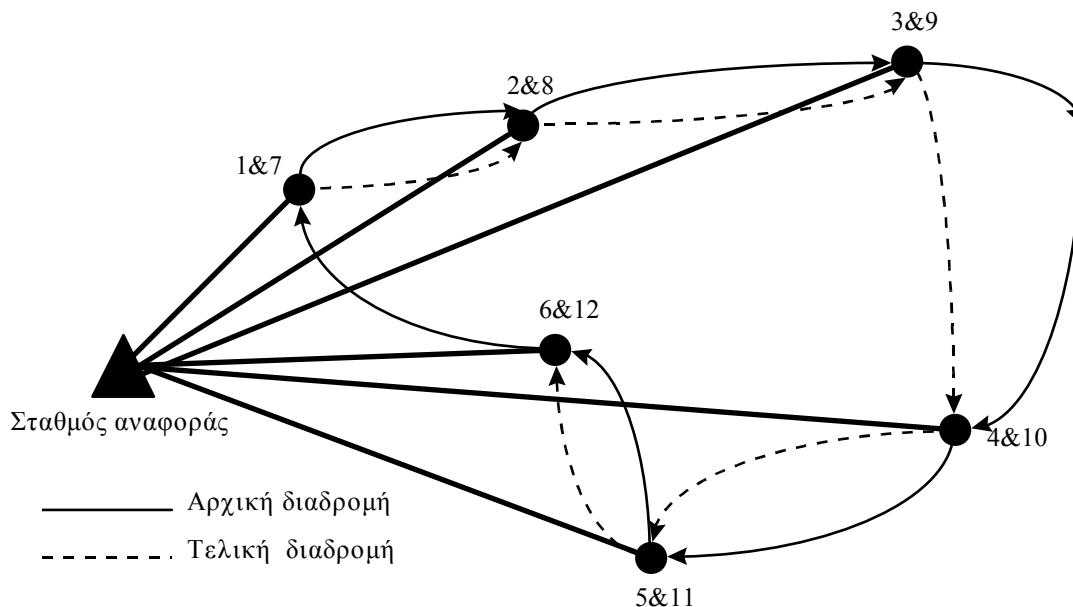
Η τεχνική αυτή βασίζεται στη ταυτόχρονη παρατήρηση δύο ή περισσότερων δεκτών για περίπου μία ώρα ή και περισσότερο. Ο ένας δέκτης συλλέγει δεδομένα από ένα γνωστό σημείο (γνωστών συντεταγμένων) ενώ ο άλλος από ένα άγνωστο σημείο. Αφαιρώντας τις μετρήσεις φάσης των δορυφορικών σημάτων επιτυγχάνονται διαφορές συντεταγμένων (dx, dy, dz) της τάξης των χιλιοστών (Σχήμα 4.11). Επίσης, η απόσταση μεταξύ των δύο δεκτών μπορεί, σπανίως, να είναι μεγαλύτερη των 500 Km. Το μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι απαιτείται η παραμονή σε ένα σημείο για αρκετή ώρα.



Σχήμα 4.11. Ο στατικός προσδιορισμός θέσης. Ο ένας δέκτης (σταθερός) καταγράφει σε σημείο γνωστών συντεταγμένων (Α) ενώ ο άλλος πηγαίνει σε σημεία αγνώστων συντεταγμένων (Β, Γ, Δ...Η) και καταγράφει μετρήσεις σε κάθε ένα από αυτά για περίπου μία ώρα.

Μέθοδος ανακατάληψης (re-occupation) των σημείων μέτρησης

Η τεχνική αυτή βασίζεται σε επαναλαμβανόμενες παρατηρήσεις των ίδιων σημείων. Συνήθως, γίνονται μετρήσεις στα σημεία για τουλάχιστον δύο σύντομα χρονικά διαστήματα (μετρώντας κοινά δεδομένα για 5-10 λεπτά) τα οποία όμως πρέπει να διαφέρουν περίπου μία ώρα. Το πλεονέκτημα της μεθόδου έναντι του στατικού προσδιορισμού είναι το μικρότερο διάστημα παρατήρησης και έναντι του κινηματικού ότι δεν χρειάζεται ο δέκτης να έχει συνεχώς, τουλάχιστον 4 δορυφόρους. Η ακρίβεια της μεθόδου, με σωστή εφαρμογή, είναι περίπου ένα εκατοστό ενώ οι δύο δέκτες, για πρακτικούς λόγους, πρέπει να βρίσκονται σε απόσταση περίπου 15 Km. Το μειονέκτημα είναι ότι είναι πιο επιρρεπής στις ιονοσφαιρικές μεταβολές. Στο Σχήμα 4.12 παρουσιάζεται μια τυπική διαδρομή ενός ψευδο-κινηματικού προσδιορισμού. Ο μετακινούμενος δέκτης αφού πραγματοποιήσει μετρήσεις στα σημεία 1 μέχρι 6, για περίπου 5-10 λεπτά στο κάθε σημείο, στη συνέχεια και αφού έχει περάσει μία ώρα επαναλαμβάνει τις μετρήσεις των ίδιων σημείων με την ίδια σειρά. Οι μετρήσεις θεωρείται ότι έχουν ολοκληρωθεί όταν πραγματοποιηθούν μετρήσεις, για δεύτερη φορά, στο σημείο 6(12).



Σχήμα 4.12. Η μέθοδος ανακατάληψης των σημείων μέτρησης. Ένας σταθερός δέκτης και ένας μετακινούμενος.

Κινηματικός προσδιορισμός

Στον κινηματικό προσδιορισμό ο ένας δέκτης είναι σταθερός και καταγράφει συνέχεια σε ένα σημείο γνωστών συντεταγμένων το οποίο βρίσκεται σε σχετικά μικρή απόσταση (μερικά χιλιόμετρα) από τον δεύτερο δέκτη που μετακινείται και καταγράφει συνεχώς. Ο κινηματικός προσδιορισμός ξεκινά με τον προσδιορισμό μιας βάσης αναφοράς (baseline) και στη συνέχεια τον προσδιορισμό των συντεταγμένων του συνεχώς μετακινούμενου δέκτη (Σχήμα 4.13). Για την καλύτερη εφαρμογή της τεχνικής αυτής, οι δύο δέκτες πρέπει να βρίσκονται σε απόσταση μικρότερη των 20 Km.

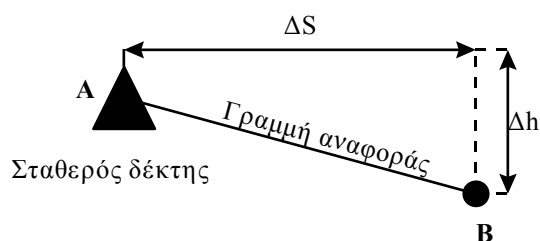


Σχήμα 4.13. Ο κινηματικός προσδιορισμός θέσης

Για τη δημιουργία της βάσης αναφοράς έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές οι οποίες εξαρτώνται από τη περιοχή μελέτης.

Η τεχνική του γνωστού σημείου είναι η απλούστερη καθώς αρκεί να πραγματοποιηθούν μετρήσεις σε ένα σημείο γνωστών συντεταγμένων. Απαιτούνται μετρήσεις μερικών δευτερολέπτων αν και η ακρίβεια της μεθόδου βελτιώνεται όσο αυξάνεται ο χρόνος παραμονής του μετακινούμενου δέκτη στο γνωστό σημείο. Το γνωστό σημείο στο οποίο τοποθετείται ο μετακινούμενος δέκτης μπορεί να έχει προκύψει είτε από στατικό προσδιορισμό είτε να είναι κάποιο γνωστό τριγωνομετρικό σημείο.

Μια παραλλαγή της τεχνικής αυτής είναι η μέθοδος της πολύ κοντινής γραμμής αναφοράς (Very Short Fixed Baseline - VSFB). Κατά τη τεχνική αυτή ο μετακινούμενος δέκτης τοποθετείται πολύ κοντά στον σταθερό δέκτη και σε γνωστή απόσταση από αυτόν. Για την επιτυχή εφαρμογή της μεθόδου πρέπει να είναι γνωστή με πολύ καλή ακρίβεια η απόσταση (ΔS) και η υψομετρική διαφορά (Δh) μεταξύ των σημείων στα οποία βρίσκονται οι δύο δέκτες (Σχήμα 4.14).



Σχήμα 4.14. Η μέθοδος VSFB

Η τεχνική αυτή απαιτεί την πραγματοποίηση μετρήσεων μερικών λεπτών στο σημείο (B) όπου βρίσκεται ο μετακινούμενος δέκτης. Χρησιμοποιείται κυρίως όταν η περιοχή μελέτης είναι κοντά στο σημείο αναφοράς A.

Στην περίπτωση που δεν είναι δυνατή η εφαρμογή καμίας από τις παραπάνω τεχνικές τότε χρησιμοποιείται η μέθοδος της εναλλαγής των κεραιών. Σύμφωνα με τη τεχνική αυτή, προσδιορίζονται οι συντεταγμένες ενός αγνώστου σημείου τοποθετώντας τον ένα δέκτη (σταθερός) σε κάποιο γνωστό σημείο και τον δεύτερο σε κάποιο κοντινό,

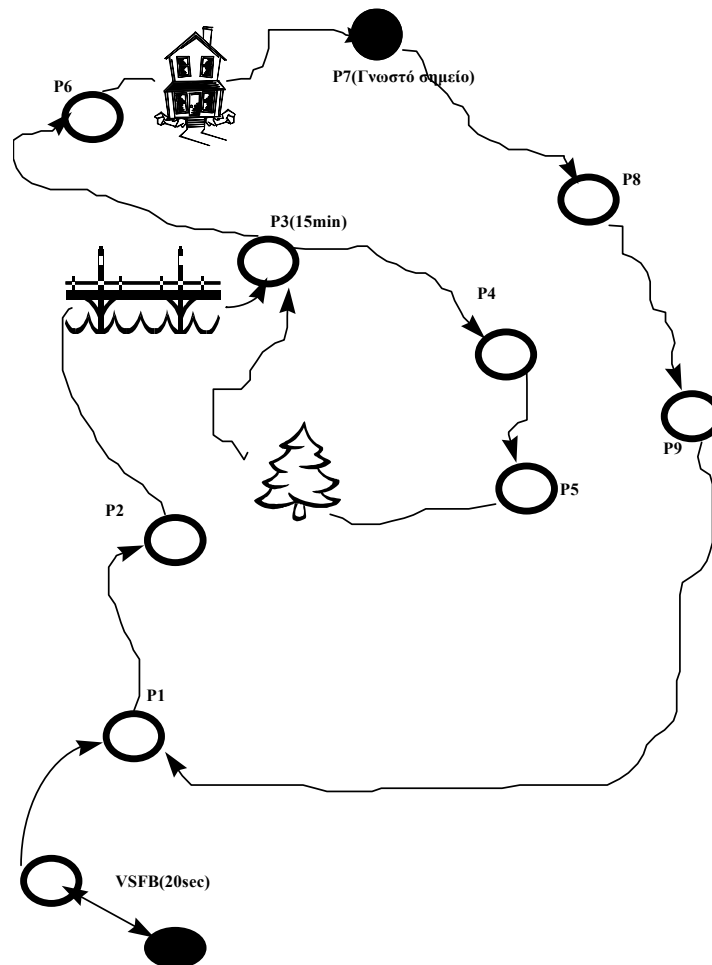
Figure 1 consists of two diagrams, (a) and (b), illustrating the geometry of the problem. In diagram (a), a fixed receiver (Staθερός δέκτης) is located at point A (known), and a mobile receiver is located at point B (unknown). In diagram (b), a fixed receiver is located at point B (unknown), and a mobile receiver is located at point A (known).

Από τη στιγμή που έχει οριστεί η γραμμή αναφοράς ο μετακινούμενος δέκτης πραγματοποιεί συνεχής μετρήσεις.

Η μέθοδος αυτή συνδυάζει τα πλεονεκτήματα του στατικού και του κινηματικού προσδιορισμού. Εμφανίζει τη παραγωγικότητα του κινηματικού εντοπισμού και την ακρίβεια του στατικού εντοπισμού σε επιλεγμένα σημεία. Η ακρίβεια αυτή είναι της τάξης του εκατοστού ενώ οι δύο δέκτες πρέπει να βρίσκονται σε απόσταση μικρότερη των 20 Km.

Με τη μέθοδο αυτή είναι δυνατή η μέτρηση εκατοντάδων σημείων, με ακρίβεια εκατοστού, σε διάστημα μισής ώρας. Ένα τυπικό παράδειγμα εφαρμογής της μεθόδου στάσης - αναχώρησης είναι αυτό που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.16.

Έστω ότι για τη δημιουργία της γραμμής αναφοράς επιλέγεται η μέθοδος VSFB και πραγματοποιούνται μετρήσεις για 20sec. Στη συνέχεια ο χρήστης πραγματοποιεί μετρήσεις στα σημεία *P1* και *P2* για διάστημα από 3-5min, σε κάθε ένα. Αφού περάσει κάτω από μια γέφυρα, επέρχεται απώλεια της συνεχούς μέτρησης από 4 δορυφόρους. Στη περίπτωση αυτή, στο σημείο *P3*, πραγματοποιούνται μετρήσεις για περίπου 15min. Στη συνέχεια λαμβάνονται μετρήσεις στα σημεία *P4* και *P5* ώσπου λόγω του δέντρου έχουμε λιγότερους από 4 δορυφόρους. Τότε επαναλαμβάνονται μετρήσεις στο σημείο *P3* για περίπου 20sec ενώ, στη συνέχεια, γίνονται μετρήσεις στο σημείο *P6*. Η απώλεια δορυφόρων, λόγω του σπιτιού, αντιμετωπίζεται με μέτρηση στο σημείο *P7* το οποίο είναι ήδη γνωστό ενώ οι μετρήσεις ολοκληρώνονται με τα σημεία *P8* και *P9*. Γενικά είναι καλό γίνονται όσο το δυνατόν περισσότερες επαναληπτικές μετρήσεις σε κάποια σημεία. Έτσι ο χρήστης πρέπει να επιστρέψει στο σημείο *P1* μετά το *P9*.



Σχήμα 4.16. Η μέθοδος στάσης και αναχώρησης

Μέθοδος RTK

Η μέθοδος του άμεσου κινηματικού προσδιορισμού (real-time-kinematic) έχει τα ίδια χαρακτηριστικά με αυτή του κινηματικού προσδιορισμού με τη διαφορά ότι γίνεται άμεση μετάδοση των διορθώσεων φάσης από τον σταθερό στον μετακινούμενο δέκτη. Η μετάδοση αυτή μπορεί να γίνει είτε με τη χρήση τηλεφωνικών γραμμών (modems) είτε με εκπομπή σε κάποια συχνότητα π.χ. HF, UHF ή VHF.

Η μέθοδος OTF (On-The-Fly) είναι η μέθοδος που επιλέγεται στις περισσότερες εφαρμογές του κινηματικού προσδιορισμού όταν απαιτείται ακρίβεια εκατοστού. Για να ξεκινήσει η OTF δεν χρειάζεται να δημιουργηθεί γραμμή αναφοράς και έτσι ο μετακινούμενος δέκτης μπορεί να ξεκινήσει χωρίς καθόλου καθυστέρηση. Χρησιμοποιείται, κυρίως, σε εφαρμογές όπως ο καθορισμός πτήσεων αεροπλάνων καθώς και σε θαλάσσιες εφαρμογές. Για να ξεκινήσει η εφαρμογή της μεθόδου απαιτείται ένα χρονικό διάστημα μεταξύ 1 και 7 λεπτών. Το χρονικό αυτό διάστημα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον αριθμό (στην αρχή τουλάχιστον 5) και τη γεωμετρία των δορυφόρων.

Διαφορικό GPS (DGPS)

Οι μέθοδοι μετρήσεων που περιγράφηκαν μέχρι τώρα, στηρίζονται στις μετρήσεις φάσης (Σχήμα 4.17).

Σχήμα 4.17. Ο προσδιορισμός της θέσης βάση μετρήσεων φάσης. Ο σταθερός και ο μετακινούμενος δέκτης κατά τις χρονικές στιγμές 1 και 2, παρουσιάζουν διαφορά φάσης στις μετρήσεις που λαμβάνουν από τους δορυφόρους. Βάση αυτών των διαφορών φάσης υπολογίζονται οι διαφορές στις συντεταγμένες ΔX , ΔY , ΔZ και η θέση του μετακινούμενου δέκτη από το άθροισμα της θέσης του σταθερού δέκτη με αυτές τις διαφορές.

Στη ναυσιπλοΐα και σε αρκετές εφαρμογές των GIS, προτιμούνται οι μετρήσεις ψευδο-απόστασης. Ο σταθερός δέκτης διορθώνει τις ψευδο-αποστάσεις για κάθε δορυφόρο.

Αυτές οι διορθώσεις μεταδίδονται στον μετακινούμενο δέκτη (Σχήμα 4.18) και η μετάδοση αυτή μπορεί να είναι σε άμεση (real-time) ή να γίνει στη συνέχεια. Η άμεση μετάδοση μπορεί να γίνει με τους ίδιους τρόπους όπως και στη μέθοδο RTK.

Σχήμα 4.18. Ο διαφορικός εντοπισμός GPS

Οι μεθοδολογίες μετρήσεων με δέκτες GPS που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο αυτό δεν είναι οι μόνες που υπάρχουν. Υπάρχουν και άλλες τεχνικές όπως επίσης συνηθίζεται κατά τη διάρκεια μιας μελέτης να μη χρησιμοποιείται αποκλειστικά μια μεθοδολογία αλλά να γίνεται συνδυασμός τους.

Στην εργασία αυτή, μέχρι τώρα, έχουν αναφερθεί οι στοιχειώδεις θεωρητικές γνώσεις που πρέπει να έχει κανείς έτσι ώστε να μπορεί να κατανοήσει τη διαδικασία της ανάλυσης των δεδομένων που ακολουθεί.

Κεφάλαιο 5

Μέθοδοι γεωμετρικών διορθώσεων

Σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι η μελέτη των τεχνικών που έχουν αναπτυχθεί για τη γεωμετρική διόρθωση των δορυφορικών εικόνων. Οι τεχνικές αυτές έχουν αναφερθεί, συνοπτικά, σε προηγούμενο κεφάλαιο αλλά τώρα γίνεται πρακτική εφαρμογή και αξιολόγησή τους.

5.1 Εισαγωγή

Οι γεωμετρικές διορθώσεις είναι απαραίτητο να γίνουν στις δορυφορικές εικόνες όταν αυτές πρόκειται, για παράδειγμα, να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με άλλα δεδομένα στα πλαίσια ενός γεωγραφικού συστήματος πληροφοριών. Η πραγματοποίηση γεωμετρικών διορθώσεων έχει σκοπό να φέρει τη δορυφορική εικόνα σε μορφή χάρτη.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές γεωμετρικών διορθώσεων. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται εφαρμογή των μεθόδων που βασίζονται στο μετασχηματισμό με τη χρήση επίγειων σημείων ελέγχου καθώς δεν ήταν δυνατή η συγκέντρωση των στοιχείων που είναι απαραίτητα για τη διόρθωση βάση της γεωμετρίας της τροχιάς των δορυφόρων.

Αρχικά, γίνεται παρουσίαση των περιοχών μελέτης και του τρόπου επιλογής των GCP's. Συγκεκριμένα, πραγματοποιείται σύγκριση της μεθόδου προσδιορισμού των συντεταγμένων των GCP's ενώ αναφέρεται και η ακρίβεια τοποθέτησης τους στην εικόνα. Στη συνέχεια, γίνεται σύγκριση μεταξύ της μεθόδου του πολυωνύμου και του τριγωνισμού, επιλογή του βέλτιστου βαθμού πολυωνύμου καθώς και της καλύτερης μεθόδου επαναδειγματοληψίας. Τέλος, παρουσιάζεται σύγκριση, μεταξύ αρχικής και γεωμετρικά διορθωμένης εικόνας.

Η επεξεργασία έγινε με το πρόγραμμα ERMapper 5.2 στο σταθμό εργασίας Sun Sparkstation 10 Model 40 με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- 4 σκληρούς δίσκους συνολικής χωρητικότητας 7 Gbytes
- Μνήμη τυχαίας προσπέλασης (RAM) 96 Mbytes
- Οθόνη 17" έγχρωμη
- Μονάδα οπτικού δίσκου (CD-ROM)
- 1 Dat Streamer που χρησιμοποιεί ταινία 4mm.

Για τη πραγματοποίηση των μετρήσεων GPS χρησιμοποιήθηκαν δύο δέκτες της εταιρείας Ashtech, μοντέλα Z-12 και τα προγράμματα Ashtech Office Suite και GeoTrans.

5.2. Καθορισμός των περιοχών μελέτης

Οι εικόνες που θα χρησιμοποιηθούν για τη μελέτη αποτελούν τμήματα των εικόνων που προέκυψαν από τους δορυφόρους Spot και Landsat. Οι εικόνες Spot είναι παγχρωματικές ενώ οι εικόνες Landsat είναι του TM. Οι περιοχές που καλύπτουν οι αρχικές εικόνες είναι η Β-Δ και η Β-Α Κρήτη. Η Εικόνα 5.1. παρουσιάζει τις αρχικές εικόνες των δορυφόρων Spot και Landsat για την περιοχή της δυτικής Κρήτης ενώ στην Εικόνα 5.2. εμφανίζονται οι αρχικές εικόνες της ανατολικής Κρήτης.

(α)

(β)

Εικόνα 5.1. Η αρχική εικόνα της δυτικής Κρήτης (α) του δορυφόρου Spot και (β) του δορυφόρου Landsat-5

(α)

(β)

Εικόνα 5.2. Η αρχική εικόνα της ανατολικής Κρήτης (α) του δορυφόρου Spot και (β) του δορυφόρου Landsat-5.

Στις εικόνες 5.3 και 5.4 παρουσιάζονται τα τμήματα των αρχικών εικόνων που αποτελούν τις περιοχές μελέτης. Οι διαστάσεις των εικόνων μελέτης παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.1.

Πίνακας 5.1. Οι διαστάσεις των εικόνων μελέτης

Εικόνα	Περιοχή	Διαστάσεις (εικονοστοιχεία)
Spot	Δυτική Κρήτη	456 × 675
Landsat	Δυτική Κρήτη	157 × 207
Spot	Ανατολική Κρήτη	1945 × 2249
Landsat	Ανατολική Κρήτη	636 × 743

Από τον Πίνακα 5.1. διαπιστώνεται ότι οι περιοχές μελέτης είναι ανομοιόμορφες. Συγκεκριμένα, οι εικόνες της ανατολικής Κρήτης καλύπτουν πολύ μεγαλύτερη περιοχή από ότι οι εικόνες της δυτικής Κρήτης. Οι διαστάσεις των εικονοστοιχείων των εικόνων Spot είναι 10m×10m ενώ των εικόνων Landsat είναι 30m×30m.

(α)

(β)

Εικόνα 5.3. Η περιοχή μελέτης στη δυτική Κρήτη (α) Spot και (β) Landsat

(α)

(β)

Εικόνα 5.4. Η περιοχή μελέτης στην ανατολική Κρήτη (α) Spot και (β) Landsat

5.3 Επιλογή των επίγειων σημείων ελέγχου (GCP's)

Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή των GCP's είναι η πηγή από την οποία θα ληφθούν οι συντεταγμένες τους, η αναγνώρισή τους και ο τρόπος διασποράς τους στην εικόνα.

Συνήθως, χρησιμοποιούνται δύο μέθοδοι προσδιορισμού των συντεταγμένων των GCP's. Η μία περιλαμβάνει την χρησιμοποίηση χάρτη ενώ η άλλη τη χρήση του

δορυφορικού συστήματος GPS. Εάν, πρόκειται να χρησιμοποιηθεί χάρτης, αυτός πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο ακριβής, ενώ τα GCP's πρέπει να είναι εύκολα αναγνωρίσιμα τόσο στην εικόνα όσο και στο χάρτη. Στη περίπτωση χρήσης GPS, τα GCP's επιλέγονται με τέτοιο τρόπο ώστε αφενός μεν να είναι αναγνωρίσιμα στην εικόνα, αλλά και να είναι δυνατή η εύκολη πρόσβαση σε αυτά. Τέλος, ανεξαρτήτως της μεθόδου που θα χρησιμοποιηθεί, τα GCP's πρέπει να είναι όσο το δυνατό πιο ομοιόμορφα καταναμημένα στην εικόνα.

5.3.1. Προσδιορισμός των συντεταγμένων των GCP's

Στην περιοχή των εικόνων της δυτικής Κρήτης (πόλη Χανίων), υπήρχε διαθέσιμο το φύλλο χάρτη "Χανιά" του 1972 της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού (ΓΥΣ), κλίμακας 1:50000 που χρησιμοποιεί προβολή Hatt. Επίσης, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις, με τη μέθοδο του στατικού εντοπισμού, με τους δέκτες GPS της εταιρείας Ashtech. Επειδή στην Ελλάδα, τα τελευταία χρόνια, όλες οι συντεταγμένες αναφέρονται στο σύστημα ΕΓΣΑ-87 έγινε μετατροπή των συντεταγμένων του χάρτη από τη προβολή Hatt στο ΕΓΣΑ-87. Η μετατροπή αυτή έγινε με την εφαρμογή των πολωνύμων μετατροπής της ΓΥΣ για το συγκεκριμένο φύλλο χάρτη.

Τα πολωνύμια αυτά έχουν την γενική μορφή που παρουσιάζεται στην σχέση (5.1). Ανάλογα με το φύλλο χάρτη (κλίμακας 1:100000) στο οποίο βρίσκεται η περιοχή μελέτης χρησιμοποιούνται οι αντίστοιχοι συντελεστές. Στον Πίνακα 5.2 αναγράφονται οι συντελεστές των πολωνύμων για την περιοχή μελέτης στην δυτική Κρήτη.

$$\begin{aligned} X &= A_0 + A_1 \cdot x + A_2 \cdot y + A_3 \cdot x^2 + A_4 \cdot y^2 + A_5 \cdot x \cdot y \\ Y &= B_0 + B_1 \cdot x + B_2 \cdot y + B_3 \cdot x^2 + B_4 \cdot y^2 + B_5 \cdot x \cdot y \end{aligned} \quad (5.1)$$

όπου:

(X,Y) είναι οι ζητούμενες συντεταγμένες στο προβολικό σύστημα ΕΓΣΑ-87.

(x,y) είναι οι γνωστές, προς μετατροπή, συντεταγμένες στο προβολικό σύστημα Hatt.

$A_i, B_i, i=0,1,2,3,4,5$ οι συντελεστές των πολυωνύμων μετατροπής.

Πίνακας 5.2. Οι συντελεστές των πολυωνύμων μετατροπής στην περιοχή μελέτης της δυτικής Κρήτης.

A_0	496938.36	B_0	3900618.84
A_1	0.9996032	B_1	-0.0003713
A_2	0.0003666	B_2	0.9995887
A_3	$0.13 \cdot 10^{-9}$	B_3	$0.59 \cdot 10^{-9}$
A_4	$0.24 \cdot 10^{-9}$	B_4	$-0.09 \cdot 10^{-9}$
A_5	$-0.85 \cdot 10^{-9}$	B_5	$0.09 \cdot 10^{-9}$

Το δορυφορικό σύστημα GPS χρησιμοποιεί το σύστημα WGS-84. Πραγματοποιήθηκε μετατροπή των συντεταγμένων στο ΕΓΣΑ-87 με τη χρήση των λογισμικών πακέτων Ashtech Office Suite και GeoTrans. Στον Πίνακα 5.3 παρουσιάζονται οι συντεταγμένες των GCP's όπως αυτές προέκυψαν από το χάρτη και με τη χρήση του GPS.

Πίνακας 5.3 Οι διαφορές των συντεταγμένων των GCP's από χάρτη και από GPS.

GCP's	Τετμημένες ¹ (Easting) σε μέτρα (m)		Τεταγμένες ¹ (Northing) σε μέτρα (m)	
	Χάρτης	GPS	Χάρτης	GPS
1	501364.04	501388.27	3930374.95	3930375.51
2	501524.17	501547.67	3930372.86	3930369.47
3	501528.63	501552.30	3930322.63	3930319.58
4	501657.92	501802.45	3930293.14	3930289.12
5	501799.65	501656.52	3930294.11	3930322.39
6	501356.50	501440.98	3930151.69	3930110.54
7	502566.91	502534.54	3930084.28	3930008.26
8	502671.92	502637.13	3929963.97	3929872.23
9	501852.20	501775.43	3929808.09	3929781.32
10	505599.69	505687.35	3927276.53	3927198.25
11	502117.05	502186.37	3929698.66	3929566.83
12	501780.56	501692.63	3929804.98	3929741.92
13	506491.79	506422.25	3928548.25	3928368.56
14	504080.97	²	3930805.76	²
Σταθερό σφάλμα	86.85 m		50.65 m	

1. Οι συντεταγμένες δίνονται στο ΕΓΣΑ-87
2. Δεν στάθηκε δυνατή η πρόσβαση στο σημείο αυτό

Από τον Πίνακα 5.3 γίνεται αντιληπτή η διαφορά που υπάρχει στις συντεταγμένες των GCP's ανάλογα με τον τρόπο που αυτές προκύπτουν. Τίθεται επομένως, το πρόβλημα της επιλογής μιας από τις δύο ομάδες συντεταγμένων. Οι χάρτες κλίμακας 1:50000 είναι κατασκευασμένοι με ακρίβεια $\pm 0.5\text{mm}$ που αντιστοιχεί, σε 25 μέτρα στο έδαφος. Επιπλέον, η ακρίβεια του μετασχηματισμού από τη προβολή Hatt στο ΕΓΣΑ-87 με τη χρησιμοποίηση των πολωνύμων μετατροπής δεν έχει ακόμα υπολογιστεί ακριβώς. Αντίθετα, με το σύστημα GPS και τη τεχνική του στατικού εντοπισμού που ακολουθήθηκε επιτυγχάνονται ακρίβειες, στον υπολογισμό των συντεταγμένων, της τάξης των εκατοστών. Για τους λόγους αυτούς οι εικόνες της δυτικής Κρήτης διορθώθηκαν με βάση τις συντεταγμένες που προέκυψαν από το GPS.

Για τη διόρθωση των εικόνων της ανατολικής Κρήτης (περιοχή Ιτάνου) χρησιμοποιήθηκαν δύο φύλλα χάρτη με ονομασίες "Ν^{οι} Διονυσάδες" και "Σητεία". Οι χάρτες αυτοί εκδόθηκαν από τη ΓΥΣ το 1994, είναι κλίμακας 1:50000 και χρησιμοποιούν τόσο τη προβολή Hatt όσο και το ΕΓΣΑ-87. Επίσης, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις στην περιοχή μελέτης με τους ίδιους δέκτες GPS. Τίθεται ξανά το πρόβλημα της ακρίβειας των συντεταγμένων που πρέπει να χρησιμοποιηθούν για τη μελέτη. Στον Πίνακα 5.4. αναγράφονται οι συντελεστές των πολωνύμων μετατροπής (σχέση 5.1) για την περιοχή μελέτης της ανατολικής Κρήτης.

Πίνακας 5.4. Οι συντελεστές των πολωνύμων μετατροπής στην περιοχή μελέτης της ανατολικής Κρήτης.

A_0	678873.31	B_0	3902383.78
A_1	0.9997753	B_1	0.0197793
A_2	-0.0197930	B_2	0.9997773
A_3	$2.40 \cdot 10^{-9}$	B_3	$0.16 \cdot 10^{-9}$
A_4	$-2.18 \cdot 10^{-9}$	B_4	$0.27 \cdot 10^{-9}$
A_5	$0.21 \cdot 10^{-9}$	B_5	$4.62 \cdot 10^{-9}$

Στον Πίνακα 5.5 αναγράφονται οι συντεταγμένες, στο ΕΓΣΑ-87, 17 τριγωνομετρικών σημείων του φύλλου χάρτη "Ν^{οι} Διονυσάδες" όπως αυτές προκύπτουν απευθείας από το χάρτη, με τη χρήση των πολωνύμων μετατροπής καθώς και με τις επίσημες τιμές

που δίνει η ΓΥΣ. Οι τελευταίες αυτές τιμές ταυτίζονται με τις μετρήσεις GPS με ακρίβεια χιλιοστού (mm).

Πίνακας 5.5. Οι συντεταγμένες των τριγωνομετρικών σημείων του φύλλου χάρτη "Ν^{οι} Διονυσάδες" όπως αυτές προέκυψαν με 3 διαφορετικούς τρόπους και η μέση διαφορά τους.

Συντεταγμένες από χάρτη			Συντεταγμένες μέσω πολυωνύμου μετατροπής		Συντεταγμένες από μετρήσεις ακριβείας (GPS)	
A/A	E(m)	N(m)	E(m)	N(m)	E(m)	N(m)
1	697253.730	3916664.995	697226.980	3916659.620	697254.876	3916677.940
2	697626.866	3912962.963	697579.240	3912996.070	697612.683	3912980.143
3	697194.389	3911253.780	697237.740	3911277.860	697214.254	3911282.607
4	698612.224	3911611.280	698545.710	3911624.200	698628.863	3911644.413
5	709208.416	3909690.000	709239.230	3909702.170	709218.284	3909700.784
6	708150.550	3907945.000	707659.320	3907924.880	708161.980	3907929.089
7	706963.030	3906355.670	707004.120	3906315.150	706992.005	3906306.232
8	705455.450	3905831.630	705473.460	3905799.850	705459.503	3905801.328
9	703042.290	3900641.410	703054.700	3905658.620	703052.325	3905629.764
10	713374.630	3905527.640	713378.060	3905537.050	713377.417	3905519.336
11	704727.180	3904563.690	704734.610	3904547.620	704739.260	3904528.311
12	702872.020	3904147.440	707883.750	3904273.210	702885.907	3904129.427
13	702597.400	3907901.610	702601.060	3902893.680	702595.828	3902875.347
14	703880.590	3901390.560	703873.910	3902387.830	703870.848	3902370.707
15	700968.060	3901546.180	700731.950	3901564.690	700737.194	3901545.876
16	705950.250	3901395.580	705689.510	3901372.400	705716.856	3901351.457
17	702094.520	3901326.630	702105.720	3901226.860	702111.873	3901326.868
Μέση διαφορά στις συντεταγμένες των σημείων μεταξύ πολυωνύμου και μετρήσεων ακριβείας						
ΔΕ = 258.18 m			ΔΝ = 9.53 m			
Μέση διαφορά στις συντεταγμένες των σημείων μεταξύ χάρτη και μετρήσεων ακριβείας						
ΔΕ = 20.09 m			ΔΝ = -49.62 m			

Με τα στοιχεία του Πίνακα 5.5 γίνεται αντιληπτό πως η ακρίβεια της γεωμετρικής διόρθωσης βελτιώνεται όταν για την εύρεση των συντεταγμένων των GCP's χρησιμοποιείται το σύστημα GPS. Οι διαφορές των συντεταγμένων που παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.5 αναφέρονται αποκλειστικά στο φύλλο χάρτη "Ν^{οι} Διονυσάδες" και δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για άλλα φύλλα χάρτη ενώ δεν ενδείκνυται ούτε η χρήση τους για άλλα σημεία του ίδιου φύλλου χάρτη.

5.3.2. Τοποθέτηση των GCP's στην εικόνα

Η σωστή τοποθέτηση των GCP's στην εικόνα αποτελεί παράγοντα μείζονος σημασίας για τη γεωμετρική της διόρθωση. Αυτό γιατί, όταν εντοπίζεται ένα GCP, η ακρίβεια

προσδιορισμού του πρέπει να είναι μικρότερη από τις διαστάσεις δύο εικονοστοιχείων. Επομένως, στη περίπτωση των εικόνων Spot η ακρίβεια προσδιορισμού των GCP's πρέπει να είναι καλύτερη από 10m ενώ στην περίπτωση των εικόνων Landsat η ακρίβεια αυτή πρέπει να είναι 30m.

Ο μετασχηματισμός των γεωδαιτικών συντεταγμένων των επίγειων σημείων ελέγχου σε συντεταγμένες εικόνας γίνεται με τη χρησιμοποίηση πολυωνύμων. Στην περίπτωση πολυωνύμου πρώτου βαθμού απαιτούνται 3 σημεία ελέγχου για την εύρεση των συντελεστών του (παράγραφος 3.5.2). Στην περίπτωση ύπαρξης περισσότερων σημείων ελέγχου χρησιμοποιείται η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων για τον προσδιορισμό των συντελεστών του πολυωνύμου. Αφού υπολογιστούν οι συντελεστές αυτοί γίνεται μετασχηματισμός των συντεταγμένων εικόνας σε γεωδαιτικές συντεταγμένες.

Επειδή, κατά το μετασχηματισμό υπάρχουν συνήθως σφάλματα, οι συντεταγμένες που προκύπτουν από το πολυώνυμο διαφέρουν από αυτές που έχουν οριστεί από το χρήστη. Η απόσταση μεταξύ της αρχικής θέσης (x_i , y_i) ενός σημείου ελέγχου και στη διορθωμένη θέση (x_r , y_r) του ίδιου σημείου αποτελεί το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (Root Mean Square, RMS).

$$RMS = \sqrt{(x_r - x_i)^2 + (y_r - y_i)^2}$$

(5.2)

Το σφάλμα RMS συνήθως επιλέγεται να έχει τιμή μικρότερη από 2. Στη περίπτωση αυτή τα σημεία απέχουν μεταξύ τους κατά 2 εικονοστοιχεία (Γιαβή, 1995).

Στους Πίνακες 5.6 και 5.7 παρουσιάζονται οι συντεταγμένες (X-Easting, Y-Northing) των GCP's των εικόνων της δυτικής Κρήτης, των δορυφόρων Spot και Landsat αντίστοιχα, όπως αυτές ορίστηκαν με τη βοήθεια του συστήματος GPS και όπως προκύπτουν από πολυώνυμο μετατροπής πρώτου βαθμού. Επίσης, παρουσιάζεται το

σφάλμα RMS κάθε σημείου ελέγχου και το σταθερό σφάλμα (standard error) στην επιφάνεια του εδάφους.

Πίνακας 5.6. Οι συντεταγμένες στο ΕΓΣΑ-87 των GCP's και το σφάλμα RMS για την εικόνα Spot της δυτικής Κρήτης.

GCP's	Συντεταγμένες από GPS		Συντεταγμένες από πολυώνυμο		Σφάλμα RMS
	Easting	Northing	Easting	Northing	
1	501388.27	3930375.51	501386.24	3930381.68	0.698
2	501547.67	3930369.47	501543.39	3930374.60	0.544
3	501552.30	3930319.58	501550.51	3930320.34	0.233
4	501656.52	3930322.39	501652.71	3930329.30	0.851
5	501802.45	3930289.12	501801.36	3930290.12	0.242
6	501440.98	3930110.54	501447.95	3930102.52	1.029
7	502534.54	3930008.26	502540.89	3930000.44	1.044
8	502637.13	3929872.23	502637.85	3929868.51	0.468
9	501775.43	3929781.32	501783.85	3929776.94	0.920
10	502186.37	3929566.83	502182.94	3929561.13	0.652
11	501692.63	3929741.92	501687.59	3929748.62	0.767
12	506470.77	3927231.29	506469.77	3927234.24	0.338
13	506422.25	3928368.56	506498.99	3928198.18	18.081
Σταθερό σφάλμα (standard error) στο Easting:					4.85 m
Σταθερό σφάλμα (standard error) στο Northing:					6.31 m

Πίνακας 5.7. Οι συντεταγμένες στο ΕΓΣΑ-87 των GCP's και το σφάλμα RMS για την εικόνα Landsat της δυτικής Κρήτης.

GCP's	Συντεταγμένες από GPS		Συντεταγμένες από πολυώνυμο		Σφάλμα RMS
	Easting	Northing	Easting	Northing	
1	501388.27	3930375.51	501400.53	3930359.31	0.676
2	501547.67	3930369.47	501537.33	3930371.03	0.347
3	501552.30	3930319.58	501547.51	3930323.24	0.200
4	501656.52	3930322.39	501666.55	3930363.16	1.399
5	501802.45	3930289.12	501819.20	3930283.48	0.587

6	501440.98	3930110.54	501413.56	3930099.14	0.986
7	502534.54	3930008.26	502563.98	3929982.55	1.300
8	502637.13	3929872.23	502642.13	3929861.61	0.390
9	501775.43	3929781.32	501781.43	3929780.96	0.200
10	502186.37	3929566.83	502177.72	3929560.20	0.362
11	501692.63	3929741.92	501671.39	3929766.07	1.070
12	506422.25	3928368.56	506394.59	3928380.83	1.005
13	506470.77	3927231.29	506491.35	3927225.44	0.710
Σταθερό σφάλμα (standard error) στο Easting:					19.20 m
Σταθερό σφάλμα (standard error) στο Northing:					18.31 m

Από τους Πίνακες 5.6 και 5.7 γίνεται αντιληπτό ότι το σφάλμα που δημιουργείται κατά τον υπολογισμό των συντεταγμένων των GCP's με το πολυώνυμο (σταθερό σφάλμα) είναι και στις δύο περιπτώσεις μικρότερο από το μέγεθος ενός εικονοστοιχείου. Στην περίπτωση της εικόνας Spot από τα 13 αρχικά GCP's παρουσιάζονται στοιχεία για τα 12 από αυτά. Ένα από τα GCP's (συγκεκριμένα το 13) παρουσίαζε υψηλό σφάλμα RMS και για το λόγο αυτό εξαιρέθηκε από τον μετασχηματισμό.

Στους πίνακες 5.8 και 5.9 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα στοιχεία για τις εικόνες Spot και Landsat της ανατολικής Κρήτης.

Πίνακας 5.8. Οι συντεταγμένες στο ΕΓΣΑ-87 των GCP's και το σφάλμα RMS για την εικόνα Spot της ανατολικής Κρήτης.

GCP's	Συντεταγμένες από GPS		Συντεταγμένες από πολυώνυμο		Σφάλμα RMS
	Easting	Northing	Easting	Northing	
1	703499.50	3902265.76	703501.58	3902261.82	0.438
2	704671.12	3903484.38	704676.96	3903492.06	0.952
3	705634.65	3903273.50	705629.42	3903280.99	0.900
4	703037.89	3901759.83	703041.38	3901759.47	0.349
5	708054.45	3906890.27	708050.56	3906888.91	0.410
6	704964.25	3904976.09	704959.37	3904966.69	1.041

7	706510.73	3898956.86	706531.06	3898959.43	2.041
8	706824.59	3899766.19	706819.39	3899765.85	0.519
9	706108.64	3899663.86	706111.42	3899672.99	0.936
10	698765.51	3898372.11	698762.95	3898367.52	0.516
11	693443.76	3896914.87	693444.55	3896912.56	0.239
12	692372.75	3899437.67	692378.73	3899428.29	1.094
13	691890.97	3897826.39	691890.56	3897842.10	1.575
14	693346.38	3896538.64	693346.05	3896538.42	0.039
15	703901.06	3896923.40	703901.83	3896914.27	1.355
16	702876.79	3896494.07	702871.22	3896493.04	0.564
17	706117.75	3896923.22	706117.76	3896922.62	0.059
18	704205.56	3897610.22	704043.61	3897457.75	21.987
Σταθερό σφάλμα (standard error) στο Easting: 7.09 m					
Σταθερό σφάλμα (standard error) στο Northing: 7.10 m					

Από τα 18 αρχικά GCP's για την περιοχή της ανατολικής Κρήτης υπήρχε, σε κάθε περίπτωση, ένα που εμφάνιζε υψηλή τιμή σφάλματος RMS οπότε και εξαιρέθηκε. Το σημείο αυτό παρουσιάζεται στο τέλος κάθε πίνακα ενώ είναι σαφής η μεγάλη τιμή του σφάλματος RMS σε σχέση με τα υπόλοιπα GCP's. Τόσο στην εικόνα Spot όσο και στην εικόνα Landsat το σταθερό σφάλμα είναι μικρότερο από το μέγεθος ενός εικονοστοιχείου.

Πίνακας 5.9. Οι συντεταγμένες στο ΕΓΣΑ-87 των GCP's και το σφάλμα RMS για την εικόνα Landsat της ανατολικής Κρήτης.

GCP's	Συντεταγμένες από GPS		Συντεταγμένες από πολύγωνο		Σφάλμα RMS
	Eastings	Northing	Eastings	Northing	
1	703499.50	3902265.76	703508.31	3902282.48	0.620
2	704671.12	3903484.38	704658.91	3903500.25	0.658
3	705634.65	3903273.50	705634.23	3903282.78	0.304
4	703037.89	3901759.83	703035.87	3901778.02	0.598
5	708054.45	3906890.27	708072.44	3906852.75	1.363
6	704964.25	3904976.09	704947.71	3904977.84	0.553

7	706510.73	3898956.86	706515.21	3898956.86	0.149
8	706824.59	3899766.19	706826.76	3899764.78	0.085
9	706108.64	3899663.86	706116.82	3899658.32	0.326
10	698765.51	3898372.11	698766.47	3898366.17	0.196
11	693443.76	3896914.87	693452.54	3896875.23	1.327
12	691893.97	3897826.39	691876.82	3897859.04	1.209
13	693346.38	3896538.64	693360.46	3896532.42	0.510
14	704205.56	3897610.22	704188.50	3897625.29	0.751
15	703912.06	3896923.40	703905.17	3896907.32	0.573
16	702876.79	3896494.07	702892.79	3896483.10	0.641
17	706117.75	3896923.22	706108.64	3896936.97	0.542
Σταθερό σφάλμα (standard error) στο Easting:					12.02 m
Σταθερό σφάλμα (standard error) στο Northing:					19.83 m

5.4 Επιλογή μεταξύ της μεθόδου του πολυωνύμου και του τριγωνισμού

Με τη μέθοδο του πολυωνύμου ο μετασχηματισμός των συντεταγμένων ενός σημείου της εικόνας σε συντεταγμένες χάρτη γίνεται βάση μιας μαθηματικής σχέσης, όπως έχει αναφερθεί στην ενότητα 3.5.2. Η μέθοδος του τριγωνισμού χρησιμοποιεί ένα δίκτυο τριγώνων από τα GCP's. Τα τρίγωνα κατασκευάζονται έτσι ώστε η περιφέρεια του εξωτερικού κύκλου κάθε τριγώνου να περιέχει μόνο τις καθέτους του τριγώνου. Στην συνέχεια υπολογίζονται οι συντελεστές του πολυωνύμου κάθε τριγώνου. Η διόρθωση των εικόνων έγινε χρησιμοποιώντας γραμμική προσέγγιση εντός κάθε τριγώνου.

Στην Εικόνα 5.5 παρουσιάζεται η κατανομή των GCP's στις δύο περιοχές μελέτης.

(α)

(β)

Εικόνα 5.5. Η κατανομή των GCP's στην περιοχή μελέτης στην δυτική (α) και ανατολική (β) Κρήτη.

Στις Εικόνες 5.6 και 5.7 παρουσιάζονται οι εικόνες Landsat, του διαύλου TM2 κάθε περιοχής μελέτης όταν αυτές διορθωθούν βάση πολυωνύμου πρώτου βαθμού ή με τη μέθοδο του τριγωνισμού.

Από τις εικόνες αυτές παρατηρούμε ότι όταν χρησιμοποιείται η μέθοδος του τριγωνισμού, η παραμόρφωση των εικόνων είναι σημαντική. Αυτό συμβαίνει γιατί η μέθοδος του τριγωνισμού έχει το χαρακτηριστικό να εξομαλύνει τις τοπικές παραμορφώσεις που δημιουργούνται σε μία εικόνα. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται συνήθως σε εικόνες που έχουν ληφθεί από σαρωτές που βρίσκονται σε αεροπλάνα.

Μια άλλη πιθανή αιτία της παραμόρφωσης που δημιουργείται, είναι η θέση των GCP's στις εικόνες. Στη περίπτωση της πόλης των Χανίων, τα GCP's είναι συγκεντρωμένα σε μια μικρή, σχετικά, περιοχή της εικόνας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η διόρθωση της εικόνας να γίνεται εντός της περιοχής των μικρών τριγώνων που σχηματίζονται από τα GCP's. Έτσι, οι περιοχές που δεν περιέχουν GCP's υπόκεινται σε σημαντική παραμόρφωση.

Στις εικόνες της ανατολικής Κρήτης η διασπορά των GCP's στην εικόνα είναι καλύτερη. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα η διορθωμένη, με τη μέθοδο του τριγωνισμού, εικόνα να παραμορφώνεται αλλά σε μικρότερο βαθμό από ότι στη περίπτωση των εικόνων της πόλης των Χανίων.

(α)

(β)

Εικόνα 5.6. Διόρθωση της εικόνας Landsat TM2 της δυτικής Κρήτης με τη μέθοδο (α) του πολωνύμου και (β) του τριγωνισμού

(α)

(β)

Εικόνα 5.7. Διόρθωση της εικόνας Landsat TM2 της ανατολικής Κρήτης με τη μέθοδο (α) του πολωνύμου και (β) του τριγωνισμού

5.5 Επιλογή μεταξύ του βαθμού του πολωνύμου

Από τη προηγούμενη ενότητα έχει γίνει αντιληπτό ότι η γεωμετρική διόρθωση των συγκεκριμένων εικόνων πρέπει να γίνει με τη μέθοδο του πολωνύμου. Τίθεται το ερώτημα του βαθμού του πολωνύμου που πρέπει να επιλεγεί. Όπως έχει ήδη αναφερθεί ο βαθμός του πολωνύμου συνηθίζεται να είναι το πολύ, μέχρι τρίτου βαθμού.

Στις Εικόνες 5.8 και 5.9 παρουσιάζονται οι εικόνες Spot κάθε περιοχής διορθωμένες με πολωνύμο πρώτου, δευτέρου και τρίτου βαθμού. Στη περίπτωση των εικόνων της

δυτικής Κρήτης παρατηρείται παραμόρφωση τους όταν αυξάνει ο βαθμός του πολωνύμου. Η αιτία αυτής της παραμόρφωσης είναι το γεγονός ότι τα περισσότερα GCP's είναι συγκεντρωμένα σε μια μικρή περιοχή της εικόνας. Συγκεκριμένα, παρατηρείται παραμόρφωση στα άκρα της εικόνας όταν αυτή διορθώνεται με δευτέρου βαθμού πολωνύμο (Εικόνα 5.8β) ενώ στη περίπτωση του πολωνύμου τρίτου βαθμού η παραμόρφωση είναι σημαντικά μεγαλύτερη (Εικόνα 5.8γ). Στην περίπτωση του πολωνύμου τρίτου βαθμού διαπιστώνεται ότι η εικόνα είναι σωστά διορθωμένη στο σημείο εκείνο στο οποίο βρίσκονται τα περισσότερα GCP's αλλά η παραμόρφωση είναι πολύ μεγαλύτερη στα άκρα της εικόνας. Εκτός, από την οπτική διαφορά μεταξύ των εικόνων υπάρχει και διαφοροποίηση στα στατιστικά στοιχεία τους (Πίνακας 5.10). Είναι προφανές ότι στη περίπτωση αυτή η χρησιμοποίηση πρωτοβάθμιου πολωνύμου αποτελεί τη βέλτιστη λύση.

Πίνακας 5.10. Η διαφορά στα στατιστικά στοιχεία της εικόνας Spot της δυτικής Κρήτης ανάλογα με το βαθμό του πολωνύμου.

Διόρθωση με πολωνύμο	1^ο βαθμού	2^ο βαθμού	3^ο βαθμού
Μή μηδενικά εικονοστοιχεία	285168	268640	151184
Επιφάνεια σε εκτάρια	2847.344	2682.315	1509.541
Μέση τιμή φωτεινότητας	176.093	174.418	174.283
Τυπική απόκλιση	69.068	71.004	73.565
Ιδιοτιμή του πίνακα συμμεταβλητότητας	4770.338	5041.603	5411.800

(α)

(β)

(γ)

Εικόνα 5.8. Η εικόνα Spot της δυτικής Κρήτης διορθωμένη με πολυώνυμο πρώτου (α), δευτέρου (β) και τρίτου (γ) βαθμού.

Στη περίπτωση των εικόνων της ανατολικής Κρήτης, η επιλογή μεταξύ του βέλτιστου βαθμού πολυωνύμου είναι πιο δύσκολη, καθώς δεν φαίνεται να υπάρχει παραμόρφωση των εικόνων με αύξηση του βαθμού του πολυωνύμου. Σε σύγκριση με την περίπτωση των εικόνων της δυτικής Κρήτης, φαίνεται η σημασία της θέσης των GCP's στην εικόνα. Στην περιοχή της ανατολικής Κρήτης η διασπορά των GCP's στην εικόνα παρουσιάζει μεγαλύτερη ομοιομορφία και έτσι δεν υπάρχουν οι σημαντικές παραμορφώσεις που υπάρχουν στην εικόνα της δυτικής Κρήτης. Επίσης, δεν εμφανίζεται ιδιαίτερη μεταβολή στα στατιστικά στοιχεία των εικόνων (Πίνακας 5.11).

Πίνακας 5.11. Η διαφορά στα στατιστικά στοιχεία της εικόνας Spot της ανατολικής Κρήτης ανάλογα με το βαθμό του πολυωνύμου.

Διόρθωση με πολυώνυμο	1 ^ο βαθμού	2 ^ο βαθμού	3 ^ο βαθμού
Μή μηδενικά εικονοστοιχεία	4306904	4306928	4314176
Επιφάνεια σε εκτάρια	43069.04	43069.28	43141.76
Μέση τιμή φωτεινότητας	133.444	133.535	133.606
Τυπική απόκλιση	70.450	70.454	70.459
Ιδιοτιμή του πίνακα συμμεταβλητότητας	4963.204	4963.833	4964.516

Στην περίπτωση αυτή θα επιλεγθεί η διόρθωση με πολυώνυμο δευτέρου βαθμού γιατί αφενός μεν είναι πιο ακριβές από το πολυώνυμο πρώτου βαθμού και αφετέρου δημιουργεί λιγότερα σφάλματα στις εκτός GCP's περιοχές από ότι το πολυώνυμο τρίτου βαθμού. Για την επιβεβαίωση των συμπερασμάτων αυτών ελέγχθηκε η ακρίβεια του μετασχηματισμού ανάλογα με τον βαθμό του πολυωνύμου εξαιρώντας από την γεωμετρική διόρθωση ορισμένα απομακρυσμένα GCP's. Η ακρίβεια προσδιορισμού των συγκεκριμένων GCP's στην περίπτωση του πολυωνύμου πρώτου βαθμού είναι της τάξης των 3 εικονοστοιχείων (στην εικόνα Spot, 30m) , του δευτέρου βαθμού της τάξης του 1 εικονοστοιχείου ενώ στην περίπτωση πολυωνύμου τρίτου βαθμού της τάξης των 5 εικονοστοιχείων. Επίσης, το πολυώνυμο δευτέρου βαθμού δημιουργεί μια πιο ομαλή εικόνα (Εικόνα 5.9β) από ότι το πολυώνυμο πρώτου βαθμού (Εικόνα 5.9α).

(α)

(β)

(γ)

Εικόνα 5.9. Η εικόνα Spot της ανατολικής Κρήτης διορθωμένη με πολυώνυμο πρώτου (α0, δευτέρου (β) και τρίτου (γ) βαθμού.

Τα συμπεράσματα που έχουν αναφερθεί μέχρι τώρα για τις δύο περιοχές μελέτης, στην περίπτωση των εικόνων Spot, ισχύουν και στις εικόνες Landsat. Δεν κρίθηκε σκόπιμη η αναλυτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων της εφαρμογής διαφορετικού βαθμού πολυωνύμου και για τις εικόνες Landsat κάθε περιοχής μελέτης.

5.6. Επιλογή της μεθόδου επαναδειγματοληψίας

Αφού έχει επιλεγεί και ο βαθμός του πολυωνύμου που πρέπει να χρησιμοποιηθεί, πρέπει να καθοριστεί η μέθοδος επαναδειγματοληψίας. Πρόκειται για απόφαση που εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το σκοπό για τον οποίο γίνεται η ανάλυση και η γεωμετρική διόρθωση της δορυφορικής εικόνας.

Στην Εικόνα 5.10 παρουσιάζεται η εικόνα του διαύλου TM7 του δορυφόρου Landsat, της δυτικής Κρήτης διορθωμένη με τη μέθοδο του πλησιέστερου σημείου, τη διγραμμική μέθοδο καθώς και τη κυβική μέθοδο.

Στη περίπτωση αυτή δεν παρατηρείται διαφορά στην οπτική εμφάνιση των εικόνων. Στον Πίνακα 5.12 παρουσιάζονται τα στατιστικά στοιχεία της εικόνας του διαύλου TM7 ανάλογα με τη μέθοδο επαναδειγματοληψίας που ακολουθήθηκε.

Πίνακας 5.12. Η επίδραση της μεθόδου επαναδειγματοληψίας στα στατιστικά στοιχεία της εικόνας Landsat TM7 της δυτικής Κρήτης.

Διόρθωση με επαναδειγματοληψία	Πλησιέστερου σημείου	Διγραμμική	Κυβική
Μικρότερη τιμή φωτεινότητας	3.000	3.000	1.000

Μεγαλύτερη τιμή φωτεινότητας	99.000	97.000	110.000
Μέση τιμή φωτεινότητας	35.741	35.388	35.401
Τυπική απόκλιση	16.444	16.012	16.543
Ιδιοτιμή του πίνακα συμμεταβλητότητας	270.401	256.394	273.682

Οι διαφορές μεταξύ των μεθόδων επαναδειγματοληψίας σχετίζονται με τις τιμές φωτεινότητας των εικονοστοιχείων. Έτσι, ενώ η μέθοδος του πλησιέστερου σημείου διατηρεί τις αρχικές τιμές φωτεινότητας των εικονοστοιχείων οι άλλες μέθοδοι τις μεταβάλλουν. Χαρακτηριστική είναι η διαφορά μεταξύ της μεθόδου του πλησιέστερου σημείου και της κυβικής σχετικά με τη μέγιστη και την ελάχιστη τιμή φωτεινότητας (Πίνακας 5.12). Στη περίπτωση αυτή επιλέγεται η μέθοδος του πλησιέστερου σημείου ως η καλύτερη γιατί διατηρούνται οι αρχικές τιμές φωτεινότητας των εικονοστοιχείων.

Στην Εικόνα 5.11 παρουσιάζεται η επίδραση των διάφορων μεθόδων επαναδειγματοληψίας στην εικόνα του διαύλου TM7 του δορυφόρου Landsat για την περιοχή της ανατολικής Κρήτης. Όπως και στην περίπτωση της δυτικής Κρήτης δεν υπάρχει διαφοροποίηση στη μορφή της εικόνας ανάλογα με τη μέθοδο επαναδειγματοληψίας που χρησιμοποιείται. Στον Πίνακα 5.13 παρουσιάζονται τα στατιστικά στοιχεία των εικόνων που δημιουργούνται.

Πίνακας 5.13. Η επίδραση της μεθόδου επαναδειγματοληψίας στα στατιστικά στοιχεία της εικόνας Landsat TM7 της ανατολικής Κρήτης.

Διόρθωση με επαναδειγματοληψία	Πλησιέστερου σημείου	Διγραμμική	Κυβική
Μικρότερη τιμή φωτεινότητας	29.000	42.000	37.000
Μεγαλύτερη τιμή φωτεινότητας	253.000	253.000	255.000
Μέση τιμή φωτεινότητας	134.612	134.107	134.093
Τυπική απόκλιση	75.672	75.319	75.608
Ιδιοτιμή του πίνακα συμμεταβλητότητας	5726.272	5672.909	5716.622

Από τον Πίνακα 5.13 γίνεται αντιληπτό ότι υπάρχει αξιόλογη μεταβολή στις τιμές φωτεινότητας των εικονοστοιχείων με διαφοροποίηση της μεθόδου επαναδειγματοληψίας. Όπως έχει ήδη αναφερθεί η επιλογή της μεθόδου επαναδειγματοληψίας εξαρτάται από το σκοπό της μελέτης. Εάν, η εικόνα πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για ταξινόμηση των περιοχών που απεικονίζει, τότε συνηθίζεται να

χρησιμοποιείται η επαναδειγματοληψία του πλησιέστερου σημείου έτσι ώστε να διατηρούνται οι αρχικές τιμές φωτεινότητας των εικονοστοιχείων.

Η εφαρμογή διαφορετικών μεθόδων επαναδειγματοληψίας έγινε σε όλους τους διαύλους TM των εικόνων Landsat των περιοχών μελέτης αλλά και στις εικόνες Spot της δυτικής και ανατολικής Κρήτης. Επιλέχθηκε η παρουσίαση μόνο του διαύλου TM7 καθώς τα συμπεράσματα που προκύπτουν και από τις υπόλοιπες επεξεργασίες ταυτίζονται.

(α)

(β)

(γ)

Εικόνα 5.10. Η εικόνα Landsat TM7 της δυτικής Κρήτης διορθωμένη με μέθοδο επαναδειγματοληψίας (α) του πλησιέστερου σημείου, (β) τη διγραμμική και (γ) τη κυβική.

(α)

(β)

(γ)

Εικόνα 5.11. Η εικόνα Landsat TM7 της ανατολικής Κρήτης διορθωμένη με μέθοδο επαναδειγματοληψίας (α) του πλησιέστερου σημείου, (β) τη διγραμμική και (γ) τη κυβική.

Κεφάλαιο 6

Υπέρθεση δορυφορικών εικόνων

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τεχνικές υπέρθεσης δορυφορικών εικόνων. Με τον όρο υπέρθεση εννοείται ο συνδυασμός δορυφορικών εικόνων που προέρχονται από διαφορετικού είδους δέκτες. Με τον τρόπο αυτό λαμβάνονται, ταυτόχρονα, πληροφορίες για μια περιοχή που είναι δύσκολο να ληφθούν από τα δεδομένα ενός μόνο δέκτη.

6.1. Εισαγωγή

Οι δέκτες που χρησιμοποιούνται για την καταγραφή δορυφορικών εικόνων χαρακτηρίζονται από τη χωρική, ραδιομετρική και φασματική ανάλυσή τους. Υπάρχουν δέκτες που παρουσιάζουν υψηλή χωρική (π.χ. HVR των δορυφόρων Spot) και άλλοι υψηλή φασματική (π.χ. ο θεματικός χαρτογράφος των δορυφόρων Landsat) ανάλυση.

Η δυνατότητα δημιουργίας μιας εικόνας στην οποία συνδυάζονται τα χωρικά χαρακτηριστικά των εικόνων Spot και τα φασματικά χαρακτηριστικά των εικόνων Landsat είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για αρκετές εφαρμογές Τηλεπισκόπησης.

Υπάρχουν διάφορες τεχνικές με τις οποίες επιτυγχάνεται η υπέρθεση των δορυφορικών εικόνων. Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται δύο τεχνικές συνδυασμού δεδομένων που προέρχονται από τους δορυφόρους Spot και Landsat. Επειδή και οι δύο τεχνικές στηρίζονται στη μετατροπή του συστήματος αντίληψης των χρωμάτων κρίθηκε αναγκαίο, πριν την παρουσίαση των αποτελεσμάτων της υπέρθεσης, να γίνει σύντομη αναφορά στα συστήματα αντίληψης των χρωμάτων.

6.2. Συστήματα αντίληψης των χρωμάτων

Η αίσθηση του χρώματος στον ανθρώπινο εγκέφαλο σχετίζεται με την αντίληψη των τριών κυρίαρχων χρωμάτων του φωτός (ερυθρό, πράσινο και ιώδες). Η άποψη ότι, τα υπόλοιπα χρώματα δημιουργούνται από τους διάφορους συνδυασμούς των τριών κύριων χρωμάτων είναι αυτή που τείνει να επικρατήσει σήμερα. Στο Σχήμα 6.1 παρουσιάζεται η γραφική αναπαράσταση της προσέγγισης αυτής. Το σύστημα αρχίζει από την ακμή "μαύρο" και οι άξονές του είναι μαύρο-ερυθρό, μαύρο-πράσινο και μαύρο-ιώδες. Κάθε χρώμα ορίζεται από τις συντεταγμένες του στους άξονες αυτούς. Το σύστημα αυτό ονομάζεται RGB (Red-Green-Blue) και είναι το σύστημα που χρησιμοποιείται, εκτός των άλλων και στις οθόνες των τηλεοράσεων (Mather, 1987).

Σχήμα 6.1. Το κυβικό σύστημα απεικόνισης των χρωμάτων RGB

Ένα άλλο μοντέλο αντίληψης των χρωμάτων είναι αυτό της έντασης - απόχρωσης - κορεσμού (Intensity-Hue-Saturation, IHS). Το πλεονέκτημα του μοντέλου αυτού είναι ότι η αναπαράσταση των χρωμάτων προσεγγίζει καλύτερα τη φυσική αντίληψη των χρωμάτων από τον άνθρωπο (Sabins, 1997).

Στις εφαρμογές Τηλεπισκόπησης η ένταση παριστάνει τη τιμή φωτεινότητας, η ευαισθησία της οποίας εξαρτάται από τη ραδιομετρική διαχωριστική ικανότητα του δέκτη. Η απόχρωση παριστάνει το κυρίαρχο μήκος κύματος του κάθε χρώματος ενώ ο κορεσμός αναφέρεται στην καθαρότητα, δηλαδή εάν έχει αναμίξεις άλλων χρωμάτων, του χρώματος.

Το μοντέλο IHS μπορεί να περιγραφεί γραφικά με ένα διπλό κώνο. (Σχήμα 6.2). Ο διπλός αυτός κώνος αποτελείται από κύκλους απόχρωσης για διαφορετικές τιμές έντασης. Σε όλους τους κύκλους, οι αποχρώσεις τοποθετούνται σε τέλεια φασματική ακολουθία με τις κύριες αποχρώσεις να βρίσκονται στην περιφέρεια του κύκλου. Κάθε απόχρωση ορίζεται από την γωνιακή της απόσταση, δεξιόστροφα από το ιώδες. Η κλίμακα των τόνων του γκρι βρίσκεται κατά μήκος του κάθετου άξονα με την ένταση (I) να κυμαίνεται από μηδέν (μαύρο) στο κάτω άκρο του διπλού κώνου έως λευκό στο πάνω μέρος του διπλού κώνου. Ενδιάμεσα κάθε κύκλου απόχρωσης ο κορεσμός (S) κυμαίνεται από μηδέν (0) στον κάθετο άξονα μέχρι μονάδα (1.0) στην περιφέρεια του κύκλου.

Σχήμα 6.2. Το σύστημα συντεταγμένων για το μετασχηματισμό IHS.

Η ανθρώπινη όραση είναι, γενικά, ευαίσθητη σε μικρές αλλαγές διάφορων κατασκευών (για παράδειγμα ένας δρόμος που υπάρχει σε μια εικόνα) και σε σχετικά μεγάλες μεταβολές των χρωμάτων. Αυτό σημαίνει πως λεπτομερείς πληροφορίες πρέπει να εμφανίζονται σαν ένταση ενώ λιγότερο ακριβείς πληροφορίες να αντιπροσωπεύονται με κάποιο χρώμα.

Στην ιδιότητα αυτή στηρίζεται και η υπέρθεση των δορυφορικών εικόνων που εξετάζεται στη συνέχεια. Οι τεχνικές υπέρθεσης που περιγράφονται στηρίζονται στο μετασχηματισμό των εικόνων από το σύστημα RGB στο IHS και επιστροφή στο RGB.

Στο Σχήμα 6.3 περιγράφεται η σχέση μεταξύ των δύο συστημάτων. Οι γωνίες του τριγώνου βρίσκονται στις αποχρώσεις ιώδες, πράσινο και ερυθρό. Οι μεταβολές στην απόχρωση (H) γίνονται δεξιόστροφα από το ερυθρό (0) στο πράσινο (1), μετά στο ιώδες (2) και τέλος πάλι στο ερυθρό (3). Ο κορεσμός λαμβάνει τη τιμή μηδέν στο κέντρο του τριγώνου και στις κορυφές του τριγώνου παίρνει τη μέγιστη τιμή ένα (1). Από τις τιμές RGB μπορούν να ληφθούν οι τιμές στο σύστημα HIS ως εξής (Mather, 1987):

```
intensity = max (r,g,b)
m = min (r,g,b)
range = intensity - m
if intensity  $\neq$  0 then saturation = range / intensity else saturation = 0
if s  $\neq$  0 then
  r1 = (intensity - r) / range
  g1 = (intensity - g) / range
  b1 = (intensity - b) / range
  if intensity = r then if m = g then hue = 5 +b1 else hue = 1 - g1
  if intensity = g then if m = b then hue = 1 +r1 else hue = 3 - b1
  if m = r then hue = 3 + g1 else hue = 5 - r1
  hue = hue * 60
else
  hue = undefined
endif s  $\neq$  0
end
```

Σχήμα 6.3. Η γραφική σχέση μεταξύ του συστημάτων αντίληψης των χρωμάτων RGB και IHS.

6.3. Τεχνικές υπέρθεσης δορυφορικών εικόνων

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται δύο από τις σημαντικότερες μεθόδους υπέρθεσης δορυφορικών εικόνων. Πρόκειται για τη μέθοδο RGBI (Red-Green-Blue-Intensity) και τον μετασχηματισμό Brovey.

Στην αρχή της εφαρμογής της μεθόδου RGBI, οι εικόνες Landsat βρίσκονται στο σύστημα RGB. Πρόκειται για τις εικόνες εκείνων των διαύλων που πρόκειται να υπερτεθούν μαζί με την εικόνα Spot. Η μέθοδος λειτουργεί ανεξάρτητα με τον αριθμό των εικόνων Landsat. Έτσι, μπορούν να υπάρχουν μέχρι και 7 εικόνες (αφού αυτός είναι ο αριθμός των διαύλων του θεματικού χαρτογράφου) αλλά κάθε φορά χρησιμοποιούνται 3 δίαυλοι. Στη συνέχεια, οι εικόνες Landsat μετατρέπονται στο σύστημα IHS. Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, κανένα χρώμα δεν αντιστοιχεί στην ένταση. Επομένως, με την αντικατάσταση της έντασης από τα δεδομένα της εικόνας Spot (προφανώς της παγχρωματικής) και επαναφορά των εικόνων στο σύστημα RGB δημιουργείται μια εικόνα στην οποία σε κάθε χρώμα αντιστοιχεί ένας δίαυλος του θεματικού χαρτογράφου. Η εικόνα αυτή εμφανίζει την χωρική διαχωριστική ικανότητα της παγχρωματικής εικόνας του Spot δηλαδή διαστάσεις εικονοστοιχείων 10m×10m. Σημαντικό πλεονέκτημα της μεθόδου RGBI είναι πως κατά την εφαρμογή της δεν είναι απαραίτητη η επαναδειγματοληψία των εικόνων Landsat ώστε τα εικονοστοιχεία τους να αποκτήσουν τις διαστάσεις των εικονοστοιχείων της εικόνας Spot.

Ο μετασχηματισμός Brovey είναι, ουσιαστικά, παραλλαγή της μεθόδου RGBI. Σε κάθε ένα από τα κύρια χρώματα αντιστοιχίζεται ένας διάυλος του θεματικού χαρτογράφου του δορυφόρου Landsat. Κατά την εφαρμογή της μεθόδου η τιμή φωτεινότητας κάθε εικονοστοιχείου ενός διαύλου διαιρείται με το άθροισμα των τιμών φωτεινότητας του ίδιου εικονοστοιχείου, σε όλους τους διαύλους. Το αποτέλεσμα που προκύπτει πολλαπλασιάζεται με τη τιμή φωτεινότητάς του στην εικόνα Spot.

Έτσι, στην περίπτωση που πρόκειται, για παράδειγμα, να συνδυαστούν οι εικόνες των διαύλων TM3, TM2 και TM1 με την εικόνα Spot μιας περιοχής, ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται κατά το μετασχηματισμό Brovey είναι:

$$\frac{\text{Δεδομένο 1}}{(\text{Δεδομένο 2} + \text{δεδομένο 3} + \text{δεδομένο 4})} (\text{Δεδομένο 5}) \quad (6.2)$$

όπου με τον όρο *δεδομένο* εννοείται η τιμή φωτεινότητας του εικονοστοιχείου. Τα *δεδομένα* 1 έως 4 αφορούν τους διαύλους του θεματικού χαρτογράφου. Δημιουργείται το ερώτημα πως είναι δυνατή η ύπαρξη τεσσάρων τιμών φωτεινότητας, ενός εικονοστοιχείου, για τρεις διαύλους. Προφανώς δεν είναι δυνατό να γίνει κάτι τέτοιο. Απλά με τον τρόπο αυτό, τον διπλό δηλαδή ορισμό της τιμής φωτεινότητας ενός διαύλου, επιτυγχάνεται αύξηση της ταχύτητας του μετασχηματισμού. Το *δεδομένο* 5 αναφέρεται στη τιμή φωτεινότητας του εικονοστοιχείου στην εικόνα Spot.

Για το παράδειγμα που προαναφέρθηκε, η σχέση (6.2) γίνεται:

Χρώμα	Σχέση	
Ερυθρό	$\frac{\text{TM3}}{(\text{TM3} + \text{TM2} + \text{TM1})} \cdot \text{Pan}$	(6.3)
Πράσινο	$\frac{\text{TM2}}{(\text{TM3} + \text{TM2} + \text{TM1})} \cdot \text{Pan}$	(6.4)
Ιώδες	$\frac{\text{TM1}}{(\text{TM3} + \text{TM2} + \text{TM1})} \cdot \text{Pan}$	(6.5)

Υπάρχουν 120 πιθανοί συνδυασμοί των διαύλων TM για την δημιουργία μιας ψευδοχρωματικής εικόνας στο σύστημα RGB. Στις επόμενες ενότητες δίνονται τα αποτελέσματα 2 τέτοιων συνδυασμών για τις περιοχές μελέτης στην ανατολική και τη δυτική Κρήτη.

6.4. Συνδυασμός των διαύλων TM1, TM2 και TM3

Οι εικόνες που παρουσιάζονται στην ενότητα αυτή καθώς και στην επόμενη αποτελούν τις γεωμετρικά διορθωμένες εικόνες κάθε περιοχής μελέτης. Από τις παραμέτρους που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο έχουν επιλεγεί οι καλύτερες για κάθε περίπτωση. Έτσι, τόσο οι εικόνες της δυτικής όσο και της ανατολικής Κρήτης έχουν διορθωθεί βάση των μετρήσεων με GPS, με τη μέθοδο του πολυωνύμου ενώ και στις δύο περιπτώσεις έχει επιλεγεί η μέθοδος επαναδειγματοληψίας του πλησιέστερου σημείου. Η διαφορά έγκειται στον βαθμό του πολυωνύμου που χρησιμοποιήθηκαν. Στην περίπτωση των εικόνων της δυτικής Κρήτης χρησιμοποιήθηκε πολυώνυμο πρώτου βαθμού ενώ οι εικόνες της ανατολικής Κρήτης διορθώθηκαν με πολυώνυμο δευτέρου βαθμού.

Στην Εικόνα 6.1 παρουσιάζεται το αποτέλεσμα του συνδυασμού των διαύλων TM1, TM2 και TM3 για την περιοχή της δυτικής Κρήτης. Ο δίαυλος TM1 αντιστοιχεί στο ιώδες ενώ οι δίαυλοι TM2 και TM3 στο πράσινο και το ερυθρό, αντίστοιχα. Με τον τρόπο αυτό αντιστοιχίζεται σε κάθε δίαυλο το φυσικό του χρώμα.

Εικόνα 6.1. Ο συνδυασμός των διαύλων TM1, TM2 και TM3 για την περιοχή της δυτικής Κρήτης.

Στην εικόνα αυτή έχει διατηρηθεί η χωρική διακριτική ικανότητα του θεματικού χαρτογράφου. Επομένως, κάθε εικονοστοιχείο έχει διαστάσεις 30m×30m.

Στην Εικόνα 6.2. παρουσιάζεται το αποτέλεσμα του συνδυασμού των τριών διαύλων (Εικόνα 6.1) με την εικόνα Spot της ίδιας περιοχής με τη μέθοδο RGBI. Η μέθοδος αυτή μετασχηματίζει μόνο τα μη μηδενικά εικονοστοιχεία. Σε αυτά για λόγους καλύτερης παρουσίασης έχει δοθεί το λευκό χρώμα. Η ιδιότητα αυτή της μεθόδου έχει ως αποτέλεσμα, καθώς οι εικόνες Landsat και Spot δεν ταυτίζονται πλήρως, στα σημεία όπου υπάρχουν τιμές φωτεινότητας μόνο από την εικόνα Spot αυτά να εμφανίζονται ασπρόμαυρα. Στα σημεία όπου υπάρχουν εικονοστοιχεία μόνο από τις εικόνες Landsat παρουσιάζεται μόνο η αρχική πληροφορία χωρίς να πραγματοποιείται ο μετασχηματισμός $RGB \rightarrow IHS \rightarrow RGB$.

Εικόνα 6.2. Η εφαρμογή της μεθόδου RGBI στην εικόνα (6.1) της δυτικής Κρήτης

Γενικά, φαίνεται το πλεονέκτημα της υπέρθεσης των δορυφορικών εικόνων καθώς γίνεται συνδυασμός των φασματικών πληροφοριών των εικόνων Landsat με την καλύτερη χωρική ανάλυση της παγχρωματικής εικόνας του δορυφόρου Spot.

Με τον τρόπο αυτό ο αναλυτής μπορεί να κάνει καλύτερη εκτίμηση των περιοχών που εμφανίζουν κάποια ιδιαίτερα φασματικά χαρακτηριστικά αφού είναι σε θέση να εκτιμήσει καλύτερα τη θέση αυτής της περιοχής. Έτσι, μπορεί για παράδειγμα στην Εικόνα 6.2 είναι δυνατός ο προσδιορισμός του Εθνικού Σταδίου στην πόλη των Χανίων κάτι που είναι αδύνατο στην Εικόνα 6.1.

Στην Εικόνα 6.3. παρουσιάζεται η υπέρθεση της ίδιας περιοχής με το μετασχηματισμό Brovey. Με τη μέθοδο αυτή εάν κάποιο εικονοστοιχείο δεν υπάρχει, είτε στις εικόνες Landsat είτε στην εικόνα Spot, μετατρέπεται σε εικονοστοιχείο με μηδενική τιμή φωτεινότητας, που πάλι για καλύτερη οπτική εμφάνιση στην παρούσα εργασία εμφανίζεται ως λευκό. Αυτό σημαίνει πως στην εικόνα εμφανίζονται μόνο τα κοινά, σε όλες τις εικόνες εικονοστοιχεία. Πάλι παρουσιάζεται η χρησιμότητα του συνδυασμού δεδομένων από διαφορετικούς δέκτες καθώς βελτιώνεται η δυνατότητα οπτικής παρατήρησης της περιοχής μελέτης.

Εικόνα 6.3. Ο συνδυασμός της εικόνας 6.1. με την εικόνα Spot της ίδιας περιοχής με τον μετασχηματισμό Brovey

Στην Εικόνα 6.4. παρουσιάζεται ο συνδυασμός των διαύλων TM1, TM2 και TM3 για την περιοχή της ανατολικής Κρήτης. Διατηρείται η ίδια σχέση μεταξύ χρωμάτων και διαύλων TM.

Εικόνα 6.4. Ο συνδυασμός των διαύλων TM1, TM2 και TM3 στην ανατολική Κρήτη.

Στην Εικόνα 6.5 παρουσιάζονται οι εικόνες που δημιουργούνται από την υπέρθεση της εικόνας 6.1. με την εικόνα Spot της ανατολικής Κρήτης με τις δύο τεχνικές υπέρθεσης. Ισχύουν, γενικά, οι ίδιες παρατηρήσεις όπως και στην περίπτωση της δυτικής Κρήτης. Στις εικόνες αυτές είναι εμφανής η διαφορά μεταξύ της μεθόδου RGBI και του μετασχηματισμού Brovey. Συγκεκριμένα ενώ στην εικόνα 6.5α. φαίνεται και το νησί στο βόρειο-δυτικό μέρος της εικόνας, αυτό δεν εμφανίζεται στην εικόνα 6.5β που χρησιμοποιεί τον μετασχηματισμό Brovey. Αυτό συμβαίνει γιατί όπως έχει αναφερθεί στην ενότητα 6.3. κατά το μετασχηματισμό Brovey τα εικονοστοιχεία που δεν υπάρχουν σε μία από τις δύο εικόνες (Spot ή Landsat) πέρνουν την τιμή μηδέν.

(α)

(β)

Εικόνα 6.5. Η υπέρθεση της εικόνας Spot της ανατολικής Κρήτης με τη μέθοδο RGBI (α) και τον μετασχηματισμό Brovey (β).

6.5. Συνδυασμός των διαύλων TM2, TM3 και TM4

Ο συνδυασμός αυτός δημιουργεί μια ψευδοχρωματική απεικόνιση. Η Εικόνα 6.6 αποτελεί την αρχική μορφή του συνδυασμού των συγκεκριμένων διαύλων για τις περιοχές μελέτης. Ο διάυλος TM2 αντιστοιχεί στο ιώδες ενώ οι δίαυλοι TM3 και TM4 στο πράσινο και το ερυθρό, αντίστοιχα.

(α)

(β)

Εικόνα 6.6. Ο συνδυασμός TM2, TM3 και TM4 στην δυτική (α) και την ανατολική (β) Κρήτη.

Στην Εικόνα 6.7α παρουσιάζεται η περιοχή της δυτικής Κρήτης όταν γίνει υπέρθεση της εικόνας Spot στο συγκεκριμένο συνδυασμό διαύλων με τη μέθοδο RGBI ενώ στην Εικόνα 6.7β. παρουσιάζεται η υπέρθεση της ίδιας περιοχής με τον μετασχηματισμό Brovey.

(α)

(β)

Εικόνα 6.7. Η εφαρμογή της μεθόδου RGBI (α) και του μετασχηματισμού Brovey (β) στην περίπτωση της δυτικής Κρήτης και για τον συνδυασμό TM2, TM3 και TM4.

Στην Εικόνα 6.8. παρουσιάζεται η υπέρθεση της εικόνας Spot στην εικόνα του συνδυασμού των διαύλων TM2, TM3 και TM4 για την περιοχή της ανατολικής Κρήτης.

(α)

(β)

Εικόνα 6.8. Η εφαρμογή της μεθόδου RGBI (α) και του μετασχηματισμού Brovey (β) στην περίπτωση της δυτικής Κρήτης και για τον συνδυασμό TM2, TM3 και TM4.

Από τις ενότητες 6.3 και 6.4 γίνεται αντιληπτή η χρησιμότητα της υπέρθεσης των δορυφορικών εικόνων. Με τον τρόπο αυτό συνδυάζονται οι πληροφορίες που προκύπτουν από δέκτες που καταγράφουν σε διάφορες περιοχές του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (όπως, για παράδειγμα, το θεματικό χαρτογράφο του δορυφόρου Landsat) με τα δεδομένα που προκύπτουν από δέκτες με υψηλή χωρική διακριτική ικανότητα (όπως, για παράδειγμα, τον δορυφόρο Spot).

Η εικόνα που δημιουργείται από την υπέρθεση εικόνων Landsat και Spot διαφέρει σημαντικά από αυτή που δημιουργείται από τον συνδυασμό μόνο εικόνων Landsat. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα ο αναλυτής των δορυφορικών εικόνων να μπορεί να εκτιμήσει καλύτερα περιοχές στην εικόνα που παρουσιάζουν ενδιαφέρον λόγω των φασματικών τους χαρακτηριστικών.

Η επιλογή των διαύλων TM που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν εξαρτάται από τον σκοπό της ανάλυσης. Δεν υπάρχει δηλαδή κάποιος "οδηγός" τον οποίο πρέπει να ακολουθεί πιστά ο αναλυτής. Συνηθίζεται, όμως, να χρησιμοποιείται περιορισμένος αριθμός συνδυασμών (από τους 120 δυνατούς συνδυασμούς) των διαύλων TM. Οι συνδυασμοί που περιγράφηκαν στο κεφάλαιο αυτό αποτελούν δύο από τους συνηθέστερα χρησιμοποιούμενους.

6.6. Υπέρθεση και γεωμετρικές διορθώσεις.

Μέχρι τώρα, στο κεφάλαιο αυτό, έχουν παρουσιαστεί εικόνες των περιοχών μελέτης που έχουν διορθωθεί γεωμετρικά. Τίθεται το ερώτημα τι γίνεται όταν χρησιμοποιηθούν οι αρχικές εικόνες για την υπέρθεσή τους.

Στην Εικόνα 6.9α. παρουσιάζεται ο συνδυασμός των διαύλων TM2, TM4 και TM7, στην περιοχή της ανατολικής Κρήτης πριν την γεωμετρική διόρθωση των εικόνων. Στον TM2 δόθηκε το ιώδες χρώμα ενώ στους διαύλους TM4 και TM7 το πράσινο και το ερυθρό, αντίστοιχα. Η Εικόνα 6.9β. είναι το αποτέλεσμα του ίδιου συνδυασμού με την διαφορά ότι οι εικόνες είναι γεωμετρικά διορθωμένες.

(α)

(β)

Εικόνα 6.9. Ο συνδυασμός των διαύλων TM2, TM4 και TM7 στην ανατολική Κρήτη στις αρχικές (α) και στις γεωμετρικά διορθωμένες (β) εικόνες.

Από την Εικόνα 6.9. είναι εμφανής η διαφορά ανάμεσα στον συνδυασμό που προκύπτει από τις αρχικές εικόνες και από αυτόν που δημιουργείται από τις γεωμετρικά διορθωμένες εικόνες. Η εικόνα που είναι γεωμετρικά διορθωμένη εμφανίζει πιο έντονα τα χαρακτηριστικά της περιοχής σε αντίθεση με τον συνδυασμό των αρχικών εικόνων όπου φαίνεται μια πιο ομαλή εικόνα.

Η διαφορά αυτή είναι περισσότερο εμφανής όταν γίνει η υπέρθεση των εικόνων αυτών με την εικόνα Spot της περιοχής. Στην Εικόνα 6.10 παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της υπέρθεσης με τη μέθοδο RGBI για τις δύο περιπτώσεις. Η Εικόνα 6.10β. που αποτελεί το αποτέλεσμα της υπέρθεσης στις γεωμετρικά διορθωμένες εικόνες εμφανίζει τα πλεονεκτήματα της υπέρθεσης τα οποία αναφέρθηκαν στις ενότητες 6.4 και 6.5. Αντίθετα, η Εικόνα 6.10α. που αποτελεί το αποτέλεσμα της υπέρθεσης στις αρχικές εικόνες διατηρεί την αρχική της μορφή με εξαίρεση ένα μικρό τμήμα της στα δυτικά, το οποίο έχει αλλοιωθεί ως προς την αρχική του μορφή.

Η αιτία της ανεπιτυχούς υπέρθεσης στην περίπτωση των αρχικών εικόνων είναι το σύστημα αναφοράς συντεταγμένων. Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 6.3 η μέθοδος RGBI αφού κάνει το μετασχηματισμό των εικόνων Landsat από το σύστημα RGB στο σύστημα IHS χρησιμοποιεί τα δεδομένα της εικόνας Spot για να αντικαταστήσει την ένταση (intensity) των εικόνων Landsat. Στην περίπτωση των αρχικών εικόνων επειδή οι εικόνες Landsat και Spot δεν έχουν κοινό σύστημα συντεταγμένων δεν υπάρχει ταύτιση μεταξύ των εικονοστοιχείων. Έτσι, η μέθοδος δεν κάνει κανένα μετασχηματισμό όπου υπάρχουν δεδομένα μόνο από την εικόνα Landsat και διατηρεί τις αρχικές τιμές φωτεινότητας.

Στην Εικόνα 6.11 παρουσιάζεται η υπέρθεση των αρχικών και των γεωμετρικά διορθωμένων εικόνων με τη μέθοδο Brovey.

(α)

(β)

Εικόνα 6.10. Η υπέρθεση με τη μέθοδο RGBI στις αρχικές (α) και στις γεωμετρικά διορθωμένες (β) εικόνες.

(α)

(β)

Εικόνα 6.11. Η υπέρθεση με το μετασχηματισμό στις αρχικές (α) και στις γεωμετρικά διορθωμένες (β) εικόνες.

Από την Εικόνα 6.11. παρατηρούμε ότι η υπέρθεση με τον μετασχηματισμό Brovey, στην περίπτωση των αρχικών εικόνων, δεν είναι δυνατόν να εφαρμοστεί. Αυτό γιατί

όπως φαίνεται από την Εικόνα 6.11α. και έχει αναφερθεί στην ενότητα 6.3 ο μετασχηματισμός Brovey σε εικονοστοιχεία που δεν είναι κοινά και στις δύο εικόνες δίνει μηδενικές τιμές φωτεινότητας. Στην Εικόνα 6.11α. έχει γίνει μετασχηματισμός των μηδενικών τιμών φωτεινότητας σε τιμή φωτεινότητας 255, για την επίτευξη καλύτερου οπτικού αποτελέσματος.

Τελικά, από τις Εικόνες 6.10 και 6.11 μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα πως η υπέρθεση των δορυφορικών εικόνων πρέπει να γίνεται μετά τη γεωμετρική τους διόρθωση έτσι ώστε να υπάρχει κοινό σύστημα συντεταγμένων για τις εικόνες που προέρχονται από διαφορετικούς δέκτες Τηλεπισκόπησης.

Κεφάλαιο 7

Συμπεράσματα και προτάσεις

Η διπλωματική αυτή εργασία είχε ως αντικείμενο την παρουσίαση, μελέτη και αξιολόγηση των τεχνικών γεωμετρικής διόρθωσης καθώς και μεθόδων υπέρθεσης των δορυφορικών εικόνων. Για την επίτευξη των παραπάνω χρησιμοποιήθηκαν εικόνες από τους δορυφόρους Spot και Landsat. Οι περιοχές μελέτης βρίσκονται στην δυτική Κρήτη στην περιοχή της πόλης των Χανίων αλλά και στην ανατολική Κρήτη στην περιοχή που ορίζεται από τη Σητεία, την Ίτανο και το Παλαίκαστρο. Τα συμπεράσματα για τα αποτελέσματα της εφαρμογής κάθε τεχνικής γεωμετρικής διόρθωσης παρουσιάζονται αμέσως μετά την εφαρμογή της, στην αντίστοιχη ενότητα. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια σύντομη παρουσίαση των πιο σημαντικών συμπερασμάτων καθώς και προτάσεις για επέκταση της εργασίας αυτής.

7.1. Συμπεράσματα

Από την παραπάνω μελέτη, τα σημαντικότερα από τα συμπεράσματα που προκύπτουν, είναι τα ακόλουθα:

1. Η αναγκαιότητα των γεωμετρικών διορθώσεων των δορυφορικών εικόνων είναι εμφανής από την μεταβολή που αυτές έχουν όταν διορθωθούν. Η μεταβολή αυτή στις εικόνες Spot δυτικής Κρήτης και Landsat ανατολικής Κρήτης είναι σημαντικά μεγαλύτερη από ότι στις εικόνες Landsat δυτικής Κρήτης και Spot ανατολικής Κρήτης. Οι τελευταίες είχαν διορθωθεί γεωμετρικά από τις εταιρίες προμήθειάς τους. Παρόλα αυτά έγινε αντιληπτό πως ο αναλυτής είναι προτιμότερο να ελέγχει ο ίδιος την ποιότητα της γεωμετρικής διόρθωσης.
2. Όταν γίνεται διόρθωση με βάση επίγεια σημεία ελέγχου πρέπει να δίνονται όσο το δυνατό πιο ακριβείς συντεταγμένες. Έτσι, στην περίπτωση που δεν είναι διαθέσιμοι χάρτες υψηλής ακρίβειας επιβάλλεται η χρήση του δορυφορικού συστήματος εντοπισμού GPS.
3. Η επιλογή των GCP's πρέπει να γίνει με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι ομοιόμορφα κατανεμημένα στην εικόνα. Σε αντίθετη περίπτωση, δημιουργούνται σημαντικές παραμορφώσεις στην εικόνα. Το συμπέρασμα αυτό προκύπτει αν και τα GCP's δεν ήταν τέλεια διασκορπισμένα σε καμία περίπτωση αλλά στην περίπτωση της εικόνας της βόρειο-δυτικής Κρήτης όπου τα GCP's ήταν συγκεντρωμένα σε μια μικρή περιοχή της εικόνας η παραμόρφωση ήταν πολύ μεγάλη.
4. Δεν στάθηκε δυνατή η εξαγωγή συμπερασμάτων αναφορικά με τη βέλτιστη μέθοδο επαναδειγματοληψίας. Αυτό ήταν αναμενόμενο γιατί δεν καθώς δεν υπάρχει οπτική διαφορά στην εικόνα ανάλογα με την εφαρμοζόμενη μέθοδο επαναδειγματοληψίας η επιλογή της εξαρτάται από το σκοπό της μελέτης.
5. Ο συνδυασμός των δεδομένων που περιέχονται σε εικόνες Spot και εικόνες Landsat έχει ως αποτέλεσμα τη δυνατότητα ταυτόχρονης μελέτης, αξιολόγησης και ερμηνείας πολλών, διαφορετικού είδους, πληροφοριών.

6. Εάν πρόκειται να γίνει υπέρθεση δορυφορικών εικόνων είτε με την μέθοδο RGBI είτε με τον μετασχηματισμό Brovey πρέπει απαραίτητως, αυτές να έχουν διορθωθεί γεωμετρικά.
7. Από τις δύο τεχνικές υπέρθεσης που χρησιμοποιήθηκαν τα καλύτερα αποτελέσματα σχετικά με την οπτική εμφάνιση των εικόνων τα έδωσε ο μετασχηματισμός Brovey. Βέβαια το συμπέρασμα αυτό είναι υποκειμενικό και μπορεί να αμφισβητηθεί. Από άποψης υπολογιστικού χρόνου οι δύο τεχνικές είναι εξίσου γρήγορες.

7.2. Προτάσεις

Η παρούσα εργασία θα μπορούσε να επεκταθεί με τους ακόλουθους τρόπους:

1. Η σύγκριση μεταξύ χαρτών και GPS για την εύρεση συντεταγμένων έγινε με χάρτες κλίμακας 1:50000. Θα μπορούσε να ελεγχθεί το αποτέλεσμα που θα επέφερε η χρησιμοποίηση χαρτών μεγαλύτερης κλίμακας στην ακρίβεια της γεωμετρικής διόρθωσης.
2. Δορυφορικές εικόνες που πρόκειται να μελετηθούν για κάποιο συγκεκριμένο σκοπό, θα μπορούσαν να διορθωθούν γεωμετρικά με την εφαρμογή όλων των μεθόδων επαναδειγματοληψίας. Με τον τρόπο αυτό θα μπορούσε να γίνει σύγκριση μεταξύ των μεθόδων επαναδειγματοληψίας και του σκοπού για τον οποίον πραγματοποιείται η μελέτη.
3. Στην παρούσα εργασία δεν έχει γίνει στατιστική συσχέτιση της κατανομής των GCP's και το αποτέλεσμα που αυτή επιφέρει στη γεωμετρική διόρθωση. Αυτό μπορεί να γίνει σε μελλοντική εργασία.
4. Για την υπέρθεση των δορυφορικών εικόνων θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν περισσότεροι συνδυασμοί των διαύλων του θεματικού χαρτογράφου. Επίσης, θα μπορούσε να ελεγχθεί για κάποιες συγκεκριμένες μελέτες ποιος συνδυασμός δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα.
5. Στην εργασία αυτή έγινε συνδυασμός των δεδομένων Spot και Landsat. Είναι δυνατή η μελέτη άλλων συνδυασμών δορυφορικών δεδομένων όπως για παράδειγμα εικόνων Radar με εικόνες Spot.

6. Η εργασία αυτή ασχολήθηκε με δύο μεθόδους υπέρθεσης των δορυφορικών. Υπάρχουν τεχνικές που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν και τα αποτελέσματά τους να συγκριθούν με αυτά των μεθόδων RGBI και του μετασχηματισμού Brovey.
7. Στην συγκεκριμένη μελέτη αποδείχθηκε αδύνατη η υπέρθεση των δορυφορικών εικόνων εάν αυτές δεν έχουν διορθωθεί γεωμετρικά. Θα μπορούσε να ελεγχθεί εάν αυτό είναι συμπέρασμα που ισχύει μόνο για τις μεθόδους υπέρθεσης που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την εργασία.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Berger Z., (1994), "Satellite Hydrocarbon Exploration: Interpretation and Integration Techniques", Springer - Verlag, Berlin.

Blicq R.S., (1987), "Technically Write", Prentice - Hall, New Jersey.

Campell J.B., (1987), "Introduction to Remote Sensing", The Guilford Press, New York.

Chellappa R., (1993), "Digital Image Processing", IEEE Computer Society Press, California.

Drury S.A., (1993), "Image Interpretation in Geology", Chapman and Hall, London.

ERMapper, Applications, (1995). Version 5.0., Earth Resource Mapping, Ltd.

ERMapper, Reference, (1995). Version 5.0., Earth Resource Mapping, Ltd.

Forster B.C., "Introduction to Remote Sensing", School of Geomatic Engineering, The University of New South Wales, Australia.

Gonzalez R.C., Woods R.E., (1993), "Digital Image Processing", Addison - Wesley, Massachusetts.

Hofmann - Wellenhof B., Lichtenegger H. and Collins J., (1993), "GPS Theory and Practice", Springer - Verlag, Wien.

Hui Li, Manjunath B.S., Mitra S.K., (1995), "A Contour Based Approach to Multisensor Image Registration", IEEE Transactions on Image Processing.

Mather, P. M., "Computer Processing of Remotely Sensed Images", John Wiley and Sons, Chichester.

Robinson H.A., Morrison L.J., Muehrcke C.P., Kimerling J.A., Guptill C.S, (1995), "Elements of Cartography", John Wiley and Sons, New York.

Sabins F.F., (1997), "Remote Sensing: Principles and Interpretation", W.H. Freeman and Company, New York.

"Applied Geodesy", (1987), Turner S. (editor), Springer - Verlag, Berlin.

IUGG/IAG, (1990), "Kinematic Systems in Geodesy, Surveying and Remote Sensing", International Association of Geodesy Symposia, Springer - Verlag, New-York.

"Manual of Photographic Interpretation", (1997), Philipson R.W., ed. in chief, ASPRS.

"Proceedings of the International workshop on global positioning systems in geosciences", (1992), Mertikas P.S. (editor), Technical University of Crete, Chania.

"Space Geodesy and Geodynamics", (1986), Anderson J.A. and Cazenave A. (editors), Academic Press, London.

Γιαβή Δ.Β., (1993), "Αξιολόγηση πετρελαιοκηλίδας με τη βοήθεια ψηφιακής επεξεργασίας εικόνων από δορυφόρους", Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.

Μπάρτζος Η.Δ., Φραντζής Ξ.Α., (1996), "Καθορισμός ρύπανσης στον κόλπο Χανίων και Σούδας με δορυφορικά στοιχεία", Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.

Μερτίκας Σ., (1995), "Σημειώσεις Γεωδαισίας", Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.

Μερτίκας Σ., (1998), "Τηλεπισκόπηση και Ψηφιακή Ανάλυση Εικόνας", (υπό έκδοση).

ΟΚΧΕ, (1995), " Πίνακες Συντελεστών Μετατροπής Συντεταγμένων Ελληνικού Χώρου", Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού.

