

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Αριθμητικές πράξεις με εικόνες (Σημειακές πράξεις πολυάριθμων εικόνων)

Σε πολυφασματικές εικόνες και, γενικότερα, σε πολυεπίπεδες εικόνες, οι βασικές αριθμητικές πράξεις της πρόσθεσης, της αφαίρεσης, του πολλαπλασιασμού και της διαίρεσης αλλά και οι πιο περίπλοκες που περιλαμβάνουν χρήση λογαριθμικών, εκθετικών και τριγωνομετρικών πράξεων, μπορούν να εφαρμοστούν στις ΨΤ των εικονοστοιχείων των διαφορετικών φασματικών καναλιών και να συνθέσουν μια νέα εικόνα. Αυτού του είδους η επεξεργασία ονομάζεται αριθμητική πράξη με εικόνες. Οι αριθμητικές πράξεις με εικόνες εφαρμόζονται διαδοχικά στα εικονοστοιχεία μιας εικόνας δίχως να επηρεάζουν τα γειτονικά τους εικονοστοιχεία. Οι αριθμητικές πράξεις με εικόνες, επομένως, μπορούν να θεωρηθούν και σημειακές πράξεις πολυάριθμων εικόνων. Η συνάρτηση που τις εκφράζει είναι η εξής:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (3.1)$$

όπου n είναι ο αριθμός των φασματικών καναλιών ή των θεματικών επιπέδων μιας εικόνας.

Προφανώς, όλες οι εικόνες στις οποίες εφαρμόζονται αριθμητικές πράξεις θα πρέπει να έχουν γεωαναφερθεί μεταξύ τους.

Ως εισαγωγή στο ζήτημα των αριθμητικών πράξεων με εικόνες, ας ξεκινήσουμε από την τετράδα των βασικών αριθμητικών πράξεων, δηλαδή την πρόσθεση, την αφαίρεση, τον πολλαπλασιασμό και τη διαίρεση. Στις σημειακές πράξεις πολλαπλών εικόνων, ο τρόπος που γίνεται η αριθμητική επεξεργασία προσομοιάζει, πολλές φορές, στον τρόπο που γίνονται κάποιες πράξεις πινάκων, όπως η πρόσθεση και η αφαίρεση, αλλά μερικές φορές είναι εντελώς διαφορετικές και πολύ απλούστερες στον τρόπο εφαρμογής τους από τις αντίστοιχες πράξεις πινάκων, όπως ο πολλαπλασιασμός και η διαίρεση εικόνων. Καθώς οι αριθμητικές πράξεις επεξερ-

γασίας εικόνας είναι σχετικές με τη θέση, δηλαδή εφαρμόζονται μεμονωμένα σε κάθε εικονοστοιχείο, μπορούμε να τις συνοψίσουμε στην ακόλουθη περιγραφή. Έστω ότι θέτουμε ως X_i , $i = 1, 2, \dots, n$ όπου τόσο το i -οστό φασματικό κανάλι μιας πολυφασματικής εικόνας όσο και κάθε εικονοστοιχείο του i -οστού φασματικού καναλιού μιας φασματικής εικόνας X που αποτελείται από n φασματικές ζώνες ($X_i \in X$). Ακόμα, έστω ότι θέτουμε ως Y την προκύπτουσα εικόνα, όπως και ένα τυχαίο εικονοστοιχείο αυτής.

3.1 Πρόσθεση εικόνων

Η αριθμητική πράξη της πρόσθεσης έχει ως αποτέλεσμα το σταθμισμένο άθροισμα δύο ή περισσότερων εικόνων:

$$Y = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^n w_i X_i \quad (3.2)$$

όπου με w_i συμβολίζεται το βάρος της εικόνας X_i και με k συμβολίζεται ένας συντελεστής κλιμάκωσης. Εάν $w_i = 1$ για $i = 1, \dots, n$ και k ισούται με n , η Εξίσωση 3.2 υπολογίζει τον μέσο όρο του συνόλου των εικόνων.

Μια σημαντική εφαρμογή της πρόσθεσης εικόνων είναι η μείωση του θορύβου μιας εικόνας και η αύξηση της αναλογίας σήματος προς θόρυβο (Signal-to-noise ratio, SNR ratio). Ας υποθέσουμε ότι σε ένα φασματικό κανάλι μιας πολυφασματικής εικόνας με n αριθμό φασματικών καναλιών εντοπίζεται «μολυσμένη» μια σωρευτική πηγή θορύβου $N_i = (i = 1, 2, \dots, n)$. Τα εικονοστοιχεία των οποίων οι ΨΤ αποτελούν θόρυβο είναι απίθανο να εντοπιστούν στην ίδια θέση στα διαφορετικά φασματικά κανάλια της πολυφασματικής εικόνας. Συνεπώς, η τελική ΨΤ ενός εικονοστοιχείου, η οποία προσδιορίζεται ως θόρυβος στο φασματικό κανάλι i , θα είναι ο μέσος

όρος του αθροίσματος των ΨΤ του εικονοστοιχείου αυτού με όλες τις άλλες ΨΤ όλων των άλλων $n-1$ φασματικών καναλιών, τα οποία εντοπίζονται στην εικόνα αυτή. Αποτέλεσμα αυτού, ο θόρυβος των δεδομένων να αποκρύπτεται σε μεγάλο βαθμό. Είναι αποδεδειγμένο από τη θεωρία επεξεργασίας σήματος ότι για n αντίγραφα μιας εικόνας, το καθένα από τα οποία είναι «μολυσμένο» με τα ίδια επίπεδα θορύβου, η αναλογία σήματος προς θόρυβο αυτών των n αντιγράφων ισούται με το γινόμενο της τετραγωνικής ρίζας της τιμής του n με τα επίπεδα SNR του κάθε επιμέρους αντιγράφου:

$$SNR_y = \sqrt{n} \cdot SNR \quad (3.3)$$

Η Εξίσωση 3.3 υποδηλώνει ότι για n φασματικά κανάλια μιας πολυφασματικής εικόνας, το άθροισμα του συνόλου των n φασματικών καναλιών μπορεί να αυξήσει τον λόγο SNR περί της τιμής της τετραγωνικής ρίζας του n . Παραδείγματος χάριν, εάν υπολογίσουμε τον μέσο όρο των πρώτων τεσσάρων φασματικών καναλιών (1-4) μιας πολυφασματικής εικόνας του δορυφόρου Landsat TM, η τιμή του λόγου SNR θα είναι διπλάσια από αυτή (τετραγωνική ρίζα του $4=2$) που θα είχε το κάθε επιμέρους κανάλι.

Θα παρατηρήσετε και στα επόμενα κεφάλαια που αναφερόμαστε στα θέματα των RGB-HIS μετατροπών και της ανάλυσης των κύριων συνιστωσών ότι η συνιστώσα έντασης που υπολογίζεται από τη μετατροπή RGB-HIS είναι η εικόνα μέσου όρου των επιμέρους συνιστωσών των επιμέρους εικόνων κόκκινου, πράσινου και μπλε, και στις περισσότερες περιπτώσεις η πρώτη κύρια συνιστώσα είναι το σταθμισμένο σύνολο όλων των εικόνων που εμπλέκονται στην Ανάλυση Κύριων Συνιστωσών (ΑΚΣ).

3.2 Αφαίρεση (διαφορά) εικόνων

Η αριθμητική πράξη της αφαίρεσης μεταξύ εικόνων υπολογίζει τη διαφορά μεταξύ δύο εικόνων

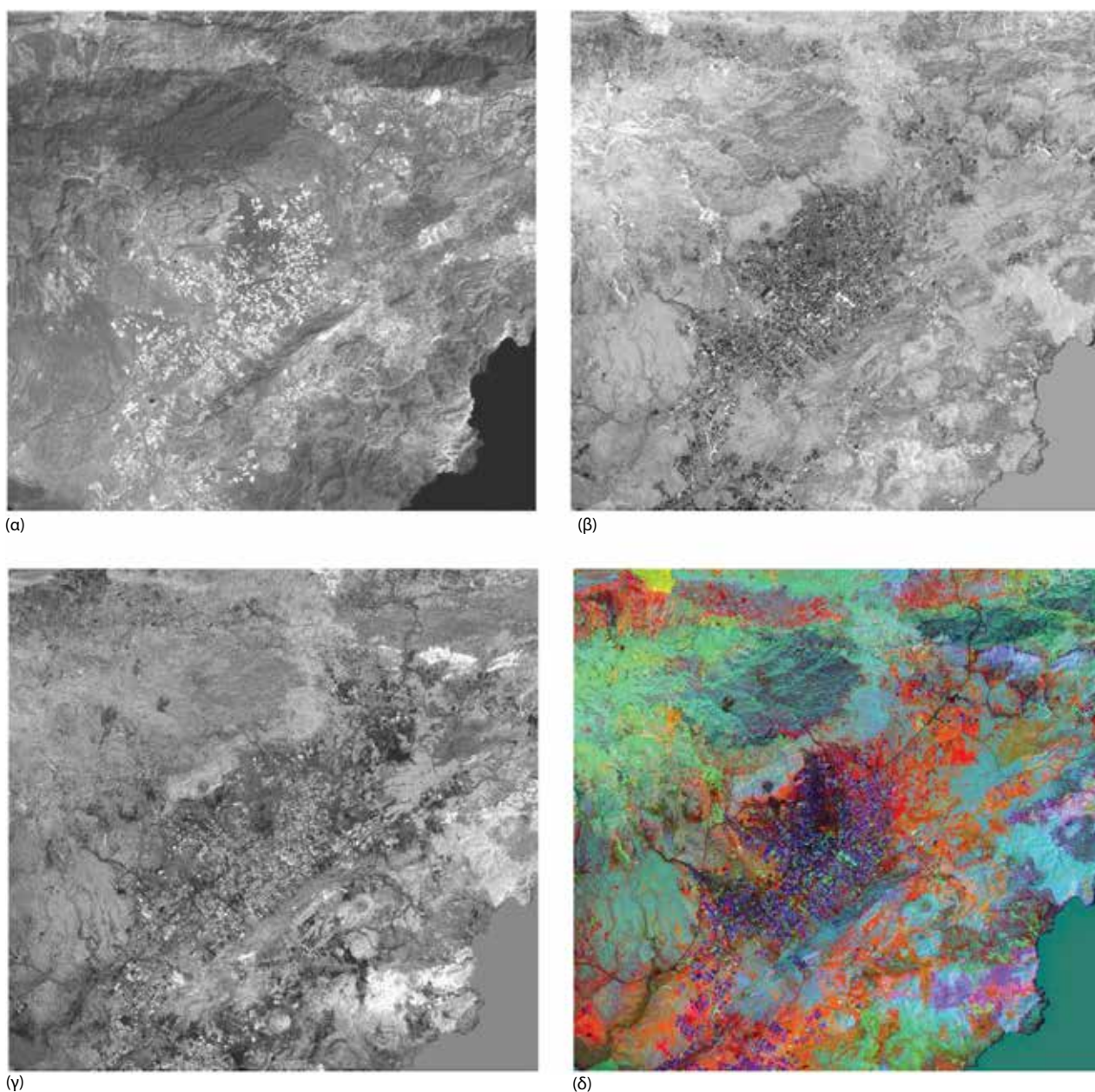
$$Y = \frac{1}{k} (w_i X_i - w_j X_j) \quad (3.4)$$

Τα σταθμισμένα βάρη w_i και w_j είναι μείζονος σημασίας καθώς διασφαλίζουν τη διεξαγωγή μιας ισορροπημένης διαφοράς. Εάν η φωτεινότητα των

εικονοστοιχείων της εικόνας X_i είναι σημαντικά υψηλότερη από αυτή των εικονοστοιχείων της εικόνας X_j , οι ΨΤ της εικόνας που θα προκύψουν από την εκτέλεση αυτής της πράξης θα είναι επηρεασμένες από τις ΨΤ της X_i , και ως αποτέλεσμα, η πραγματική διαφορά μεταξύ των δύο εικόνων δεν θα έχει αποτυπωθεί επαρκώς. Για την επίλυση αυτού του ζητήματος και προκειμένου το αποτέλεσμα της αφαίρεσης εικόνας να είναι αντιπροσωπευτικό, δύναται να εφαρμοστούν ως βήματα προ-επεξεργασίας, τεχνικές εξισορρόπησης της αντίθεσης του ιστογράμματος της κάθε εικόνας, αντιστοιχίζοντας το ιστόγραμμα της εικόνας X_i με αυτό της εικόνας X_j . Οποιαδήποτε μέθοδος και αν εφαρμοστεί, η διαφορά θα πρέπει πάντοτε να εφαρμοστεί με ίσα σταθμισμένα βάρη, δηλαδή θα πρέπει πάντοτε να ισχύει η σχέση $w_i = w_j = 1$.

Η αριθμητική πράξη της αφαίρεσης εικόνων αποτλεί μια από τις πιο απλές αλλά και ταυτόχρονα αποτελεσματικές τεχνικές για φασματική ενίσχυση. Επίσης, η αφαίρεση χρησιμοποιείται σε μελέτες ανίχνευσης αλλαγών και εξάλειψης της παραμόρφωσης φωτισμού φόντου. Παρόλα αυτά, η αλγεβρική πράξη της αφαίρεσης εικόνων, μειώνει την πληροφορία που εμπεριέχεται σε μια εικόνα και τον λόγο SNR. Αυτό συμβαίνει επειδή καθώς αφαιρεί τα κοινά σημεία μεταξύ εικόνων παράλληλα διατηρεί τον τυχαίο θόρυβο και στις δύο εικόνες.

Στην περίπτωση των πολυφασματικών εικόνων, η διαφορά μεταξύ φασματικών καναλιών χρησιμοποιείται ευρέως σε μελέτες που εξετάζουν χαρακτηριστικά της γεωλογίας, της βλάστησης και των καλύψεων/χρήσεων γης. Όπως απεικονίζεται και στο Σχήμα 3.1, η διαφορά μεταξύ του τρίτου και του πρώτου φασματικού καναλιού του δορυφόρου Landsat TM χρησιμοποιείται για να τονίσει την περιεκτικότητα της επιφάνειας του εδάφους σε οξείδια του σιδήρου, η διαφορά μεταξύ του τέταρτου και του τρίτου για να τονίσει χαρακτηριστικά της βλάστησης, ενώ η διαφορά μεταξύ του πέμπτου και του έβδομου φασματικού καναλιού χρησιμοποιείται με μεγάλη επιτυχία για τον εντοπισμό ένυδρων ορυκτών της αργίλου, όπως των ορυκτών που περιέχουν υδροξυλιόντα. (βλ. Πίνακα 25.1 του κεφαλαίου 25) για τα μήκη κύματος των φασματικών καναλιών του δορυφόρου Landsat TM). Αυτές οι τρεις εικόνες διαφοράς μπορούν να συνδυαστούν προκειμένου να σχηματίσουν μια ψευδοχρωματική σύνθεση, η οποία



Σχήμα 3.1 Το αποτέλεσμα της αφαίρεσης μεταξύ διαφορετικών φασματικών καναλιών μιας εικόνας του δορυφόρου Landsat TM: (α) η διαφορά των φασματικών καναλιών TM3-TM1 αναδεικνύει κόκκινα χαρακτηριστικά που συχνά συνδέονται με οξειδία του σιδήρου-, (β) η διαφορά των φασματικών καναλιών TM4-TM3 ανιχνεύει το χαρακτηριστικό red-edge της βλάστησης, (γ) η διαφορά των φασματικών καναλιών TM5-TM7 ενισχύει τα χαρακτηριστικά απορρόφησης αργίλου και των ένυδρων ορυκτών της στο SWIR και (δ) το χρωματικό σύνθετο της διαφοράς TM3-TM1 στο κόκκινο, της διαφοράς TM4-TM3 στο πράσινο και της διαφοράς TM5-TM7 στο μπλε

θα τονίζει τα οξειδία σιδήρου, τη βλάστηση και τα ορυκτά της αργίλου με κόκκινο, πράσινο και μπλε αντιστοίχως, καθώς και άλλα αντικείμενα του εδάφους σε διαφορετικούς χρωματικούς συνδυασμούς. Σε πολλές περιπτώσεις, η αφαίρεση έχει παρόμοια αποτελέσματα με την αριθμητική πράξη της διαίρεσης με τη διαφορά ότι η πράξη της αφαίρεσης είναι απλούστερη και ταχύτερη.

Η αλγεβρική πράξη αφαίρεσης εικόνας χρησιμοποιείται ακόμα στην ανάλυση εικόνων μικροσκοπίων για την αφαίρεση του θορύβου του φόντου. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η μεθοδολογία που ακολουθείται είναι η εξής: σε πρώτη φάση λαμβάνεται μια εικόνα από την επιφάνεια που πρόκειται να τοποθετηθεί το αντικείμενο-στόχος. Στη συνέχεια, γίνεται λήψη μιας δεύτερης εικόνας με το αντικείμενο-στό-

χο τοποθετημένο στην επιφάνεια του φόντου. Η αφαίρεση των δύο εικόνων έχει ως αποτέλεσμα την αφαίρεση του συστηματικού λάθους λόγω των συνθηκών φωτισμού και του θορύβου του φόντου.

3.3 Πολλαπλασιασμός εικόνων

Η εξίσωση της αριθμητική πράξη του πολλαπλασιασμού εικόνων περιγράφεται ως εξής:

$$Y = X_i \cdot X_j \quad (3.5)$$

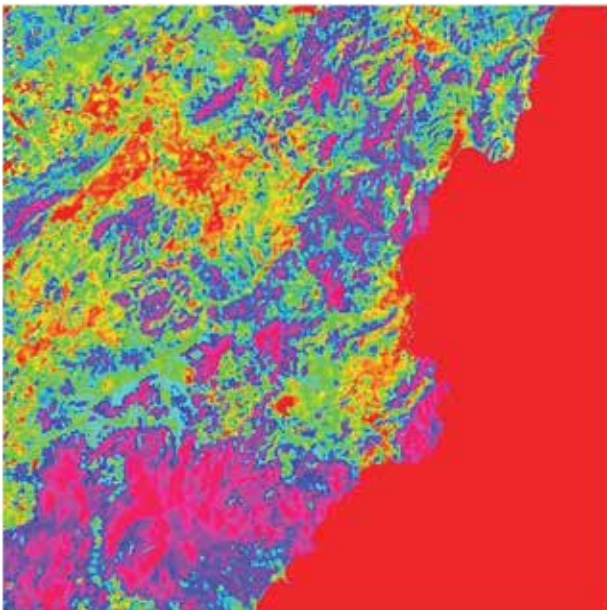
Η πράξη του πολλαπλασιασμού εικόνων εφαρμόζεται σταδιακά και μεμονωμένα σε καθένα από τα εικονοστοιχεία των εικόνων που πολλαπλασιάζονται. Ο τρόπος εφαρμογής της πράξης αυτής είναι ριζικά διαφορετικός από τον πολλαπλασιασμό πινάκων. Μια σημαντική λεπτομέρεια που αξίζει να σημειωθεί είναι ότι μια ψηφιακή εικόνα μπορεί να είναι μια διδιάστατη διάταξη, αλλά δεν είναι ένας πίνακας.

Το αποτέλεσμα του πολλαπλασιασμού εικόνων δημιουργεί συχνά μια εικόνα με εύρος ΨΤ μεγαλύτερο από του δυναμικού εύρους των συσκευών απεικόνισης. Επομένως, η προκύπτουσα εικόνα πρέπει να κλιμακωθεί πριν την απεικόνιση της στην

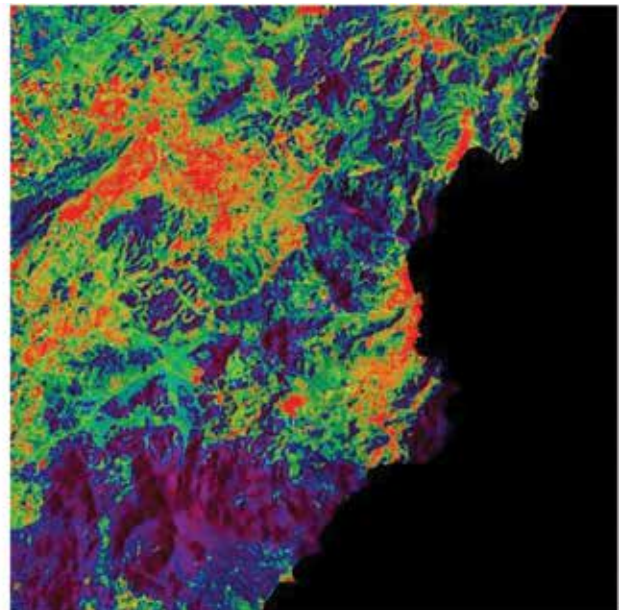
ψηφιακή οθόνη. Τα περισσότερα λογισμικά επεξεργασίας εικόνας μπορούν να απεικονίσουν οποιαδήποτε εικόνα με οποιοδήποτε εύρος ΨΤ μέσω της αυτοματοποιημένης κλιμάκωσης τους σε ένα εύρος τιμών απεικόνισης από 0 έως 255.

Μια εφαρμογή του πολλαπλασιασμού εικόνων είναι η δημιουργία μασκών περικοπής. Για παράδειγμα, έστω ότι συμβολίζουμε με X_i μια μάσκα περικοπής με ΨΤ 0 και 1. Έπειτα από τον πολλαπλασιασμό των δύο εικόνων, τα εικονοστοιχεία της εικόνας X_j που αντιστοιχούν στα εικονοστοιχεία της εικόνας X_i θα έχουν τιμή 0 ενώ όλα τα υπόλοιπα εικονοστοιχεία θα παραμείνουν στην αρχική τους κατάσταση. Αυτή η λειτουργία θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί αποτελεσματικότερα με τη χρήση λογικών συντελεστών. Για παράδειγμα, τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά μπορούν να προστεθούν σε μια έγχρωμη εικόνα ταξινόμησης χρησιμοποιώντας μια παγχρωματική εικόνα (ως συνιστώσα έντασης) για τη διαμόρφωση των τριών χρωματικών συνιστωσών (κόκκινο, πράσινο και μπλε) της εικόνας ταξινόμησης, όπως παρακάτω:

1. σύνθεση των επιμέρους κόκκινων, πράσινων και μπλε συνιστωσών της έγχρωμης εικόνας ταξινόμησης,



(α)



(β)

Σχήμα 3.2 Η εφαρμογή της πράξης του πολλαπλασιασμού για την τελική διαμόρφωση εικόνας: α) μια εικόνα ταξινόμησης με χρωματική κωδικοποίηση και β) η διαμορφωμένη κατά ένταση ταξινομημένη εικόνα

2. πολλαπλασιασμός των R, G, B συνιστωσών με την παγχρωματική εικόνα (I) και
3. δημιουργία της χρωματικής σύνθεσης χρησιμοποιώντας τα γινόμενα $R \times I$, $G \times I$, $B \times I$.

Η διαδικασία αυτή είναι αυτοματοποιημένη σε κάποια λογισμικά επεξεργασίας εικόνας διακοσμώντας τις έγχρωμες εικόνες ταξινόμησης βάση μιας συνιστώσας έντασης (Σχήμα 3.2).

3.4 Διαίρεση εικόνων (αναλογία εικόνων)

Η διαίρεση εικόνων είναι μια πολύ δημοφιλής τεχνική, γνωστή και ως λόγος εικόνων. Η συνάρτηση που εκφράζει αυτήν την αριθμητική πράξη είναι η εξής:

$$Y = \frac{X_i}{X_j} \quad (3.6)$$

Για να υλοποιηθεί η διαίρεση μεταξύ εικόνων θα πρέπει να ληφθούν κατάλληλα προστατευτικά μέτρα ώστε να μην συμπεριληφθούν στη διαίρεση εικονοστοιχεία με ΨΤ ίση με το μηδέν. Ένα συχνά χρησιμοποιούμενο τέχνασμα για την αποφυγή αυτού του προβλήματος, είναι η μετατροπή της ΨΤ εικονοστοιχείων από 0 σε 1 κάθε φορά που ένα εικονοστοιχείο με τέτοια ΨΤ γίνεται διαιρέτης. Μια πιο αποτελεσματική προσέγγιση επίλυσης αυτού του προβλήματος είναι η μετατόπιση του εύρους των τιμών του παρονομαστή προς τα πάνω, κατά 1 μονάδα. Για μια εικόνα 8 δυαδικών τιμών, δηλαδή για μια εικόνα με εύρος ΨΤ από 0 έως 255, η μετατόπιση αυτή αλλάζει το εύρος των ΨΤ της και το μετατρέπει σε ένα εύρος ΨΤ από 1 έως 256, το οποίο μόλις που υπερβαίνει το αντίστοιχο εύρος των εικόνων με 8 δυαδικές τιμές. Το ζήτημα αυτό αποτελούσε πρόβλημα σε λογισμικά επεξεργασίας εικόνας πριν το 1990 και, πλέον, στα σύγχρονα λογισμικά έχει επιλυθεί καθώς σε αυτά η επεξεργασία των εικόνων διεξάγεται με βάση τον τύπο δεδομένων κινητής υποδιαστολής διπλής ακρίβειας.

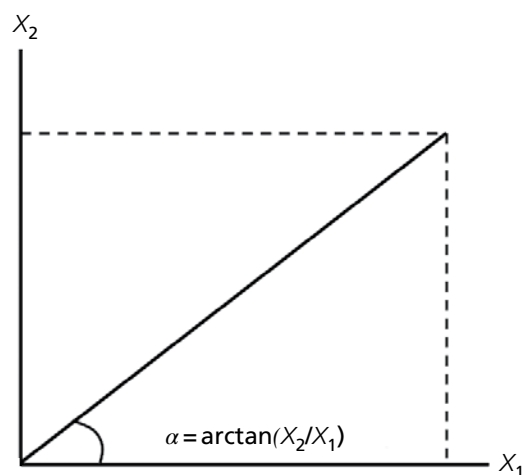
Μια εικόνα Y, η οποία είναι το αποτέλεσμα ενός λόγου μεταξύ δύο εικόνων, είναι μια εικόνα που συντίθεται από πραγματικούς αριθμούς αντί για ακέραιους αριθμούς. Έστω οι εικόνες X_1 και X_2 , δύο εικό-

νες 8 δυαδικών τιμών. Έπειτα από τη διαίρεσή τους, η προκύπτουσα εικόνα της διαίρεσής τους, Y, θα έχει τρία πιθανά εύρη ΨΤ: 0, $[1/255, 1]$, $(1, 255]$. Αντί να συμβολίσουμε το πιθανό διάστημα των ΨΤ της εικόνας Y με έναν απλό τρόπο, όπως λ.χ. $[0, 255]$, επιλέγουμε έναν πιο σύνθετο τρόπο $[1/255, 1]$. Αυτό γίνεται διότι επιθυμούμε να τονίσουμε ότι αυτό το διάστημα ΨΤ μπορεί να περιλαμβάνει τόση πληροφορία όση ένα πολύ ευρύτερο διάστημα τιμών, όπως αυτό του $(1, 255]$! Μια δημοφιλής προσέγγιση για την απεικόνιση του αποτελέσματος ενός λόγου δύο εικόνων σε ένα σύστημα απεικόνισης 8 δυαδικών τιμών ανά εικονοστοιχείο και ανά κανάλι, το οποίο εφαρμόζεται και σε πολλά λογισμικά επεξεργασίας εικόνας αυτόματα, είναι να προσαρμόζεται η εικόνα σε ένα εύρος ΨΤ από 0 έως 255. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την απώλεια μέχρι και του 50% της πληροφορίας που εμπεριέχεται σε μια εικόνα καθώς ο αριθμός των εικονοστοιχείων των οποίων οι ΨΤ ανήκουν στο διάστημα $[1/255, 1]$ μπορεί να είναι ελάχιστος.

Εάν παρουσιάσουμε τον λόγο δύο εικόνων ως έναν μετασχηματισμό από ένα καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων σε ένα πολικό σύστημα συντεταγμένων (Σχήμα 3.3) και όχι ως μια σημειακή πράξη διαίρεσης, τότε:

$$Y = \frac{X_i}{X_j} = \tan(\alpha) \quad (3.7)$$

$$\alpha = \arctan\left(\frac{X_i}{X_j}\right)$$



Σχήμα 3.3 Ο λόγος δύο εικόνων ως μετασχηματισμός συντεταγμένων από ένα σύστημα καρτεσιανών συντεταγμένων σε ένα πολικό

Η προκύπτουσα εικόνα Y είναι στην πραγματικότητα μια απεικόνιση της επαπτόμενης της γωνίας α . Η πληροφορία που εμπεριέχεται στην εικόνα Y παρουσιάζεται με ομοιόμορφο τρόπο χρησιμοποιώντας τη γωνία α στο εύρος τιμών $[0, \pi/2]$ αντίθετα με ό,τι γίνεται αν χρησιμοποιηθεί η επαπτομένη σε ένα εύρος τιμών $[0, 255]$. Επομένως, για να πραγματοποιηθεί με δίκαιο τρόπο η γραμμική επέκταση της εικόνας Y , είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί η Εξίσωση 3.7. Αφού συμβεί αυτό, μπορεί να εκτελεστεί η γραμμική επέκταση της εικόνας ως ακολούθως:

$$\beta = 255 \frac{\alpha - \text{Min}(\alpha)}{\text{Max}(\alpha) - \text{Min}(\alpha)} \quad (3.8)$$

Εξάλλου, ο παραπάνω μετασχηματισμός μπορεί να μην είναι πάντα απαραίτητος. Οι εικόνες-πηλικά είναι συνήθως σχεδιασμένες για να αναδεικνύουν χαρακτηριστικά-στόχους ως ΨΤ υψηλής αναλογίας. Σε αυτή την περίπτωση, η άμεση επέκταση της εικόνας Y μπορεί να ενισχύσει τα χαρακτηριστικά του στόχου σε καλό επίπεδο, αλλά εις βάρος της πληροφορίας που αναπαρίσταται από τις χαμηλές ΨΤ του λόγου. Σε αυτό το πλαίσιο και ως παράδειγμα, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι παρόλο που οι λόγοι $TM1/TM3$ και $TM3/TM1$ είναι μαθηματικά αντίστροφοι μεταξύ τους και επομένως περιέχουν την ίδια πληροφορία, είναι διαφορετικοί όσον αφορά την απεικόνιση της ψηφιακής εικόνας μετά τον γραμμικό τανυσμό τους! Να θυμάστε ότι όταν δημιουργείτε μια αναλογία, πρέπει να είστε σίγουροι ότι οι πληροφορίες που επιδιώκετε να τονίσετε αντιπροσωπεύονται από τις υψηλές τιμές στο πηλίκο διαίρεσης εικόνων.

Η αναλογία εικόνων είναι μια αποτελεσματική τεχνική για την επιλεκτική βελτίωση φασματικών χαρακτηριστικών. Οι εικόνες που προκύπτουν από τους διαφορετικούς συνδυασμούς διαίρεσης φασματικών καναλιών συχνά χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία έγχρωμων χρωματικών συνθέσεων. Για παράδειγμα, μια χρωματική σύνθεση των φασματικών καναλιών $TM5/TM7$, $TM4/TM3$ και $TM3/TM1$ σε ένα RGB σύστημα απεικόνισης θα τονίσει τα ορυκτά της αργίλου με μπλε αποχρώσεις, τη βλάστηση με πράσινες και τα οξείδια του σιδήρου του γυμνού εδάφους με αποχρώσεις του κόκκινου. Έχει ενδιαφέρον η σύγκριση των Σχημάτων 3.1 (δ) και

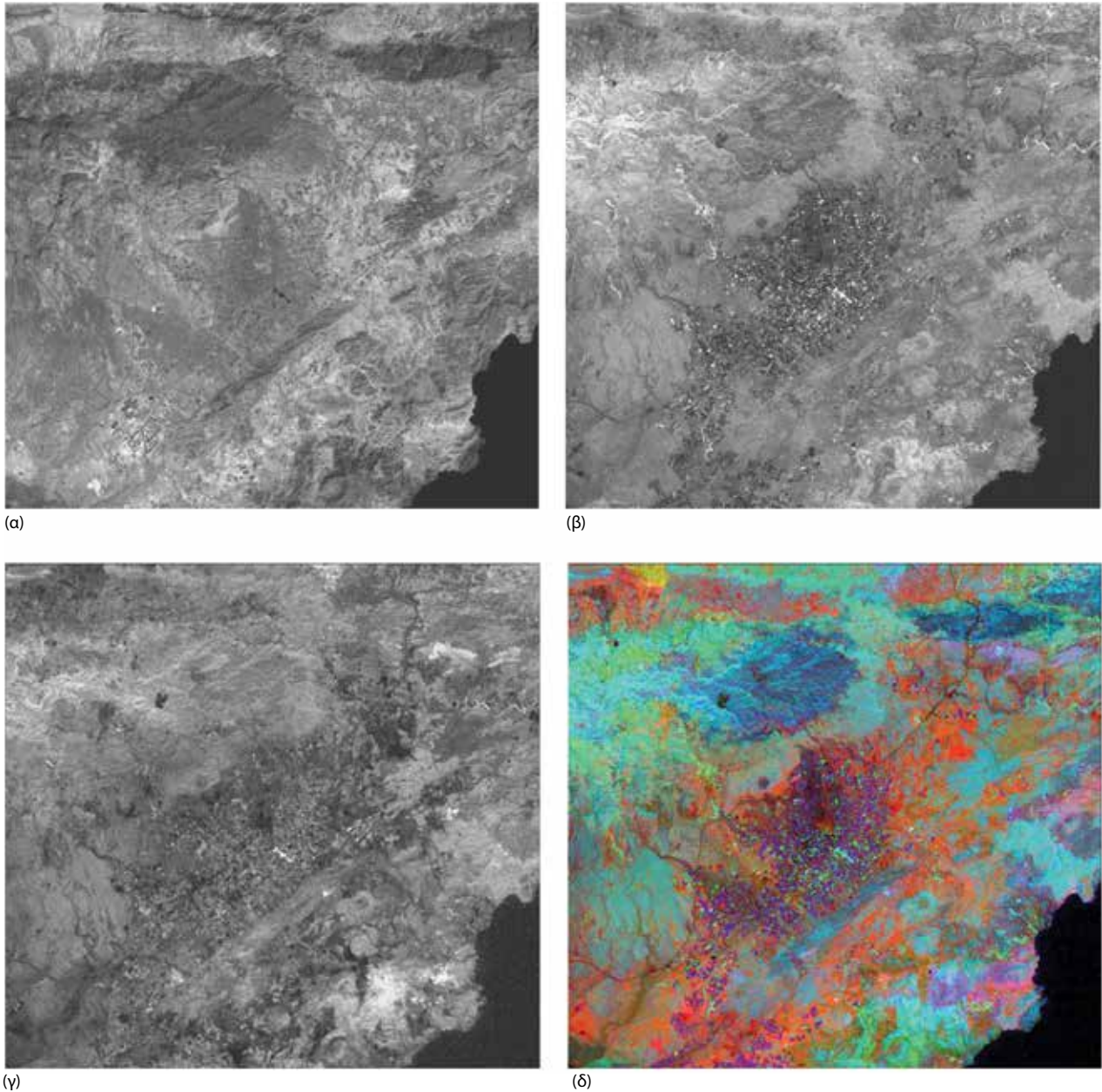
3.4 (δ), καθώς από τη σύγκριση τους παρατηρούμε την ομοιότητα μεταξύ των αριθμητικών πράξεων της αφαίρεσης και της διαίρεσης για εφαρμογές επιλεκτικής βελτίωσης φασματικών χαρακτηριστικών. Πολλοί ραδιομετρικοί δείκτες, όπως ο Κανονικοποιημένος Δείκτης Βλάστησης NDVI (Normalised Difference Vegetation Index), έχουν αναπτυχθεί βασισμένοι τόσο στην αριθμητική πράξη της αφαίρεσης όσο και σε αυτή της διαίρεσης.

Η διαίρεση εικόνων είναι μια αποτελεσματική τεχνική για τη μείωση της επίδρασης της σκίασης λόγω τοπογραφικού αναγλύφου. Η ακτινοβολία που δέχεται η επιφάνεια του εδάφους εξαρτάται από τη γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της επιφάνειας του εδάφους και της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Επομένως, ο φωτισμός της επιφάνειας του εδάφους κυμαίνεται αναλόγως τοπογραφικών χαρακτηριστικών, όπως αυτά της κλίσης και του αναγλύφου, τα οποία με τη σειρά τους σχετίζονται με την ύπαρξη σκίασης. Σε μια εικόνα τηλεπισκόπησης η φασματική πληροφορία που εμπεριέχεται αποκρύπτεται από τις έντονες μεταβολές της τοπογραφικής σκίασης μέσα σε αυτήν. Οι ΨΤ των διαφορετικών φασματικών καναλιών μιας πολυφασματικής εικόνας είναι ανάλογες της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στην επιφάνεια του εδάφους και της φασματικής της ανακλαστικότητας. Αν θέσουμε ως $DN(\lambda)$ την ΨΤ ενός εικονοστοιχείου που ανήκει σε ένα φασματικό κανάλι λ , τότε ισχύει η ακόλουθη εξίσωση:

$$DN(\lambda) = \rho(\lambda)E(\lambda) \quad (3.9)$$

όπου με $\rho(\lambda)$ και $E(\lambda)$ αντίστοιχα οι τιμές της φασματικής ανακλαστικότητας και οι τιμές της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας σε ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος λ που δέχεται η επιφάνεια του εδάφους στο αντίστοιχο εικονοστοιχείο.

Ας υποθέσουμε ένα εικονοστοιχείο που εκπροσωπεί μια επιφάνεια εδάφους και έχει άμεση επαφή με την ηλιακή ακτινοβολία. Όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 3.5, το εικονοστοιχείο αυτό δέχεται η φορές περισσότερη ηλιακή ακτινοβολία σε σχέση με άλλο εικονοστοιχείο που δεν έχει άμεση επαφή με τις ακτίνες του Ήλιου. Οι συναρτήσεις που χαρακτηρίζουν τις ΨΤ των δυο αυτών εικονοστοιχείων σε 2 φασματικά κανάλια I και j αντίστοιχα είναι οι εξής:



Σχήμα 3.4 Οι προκύπτουσες εικόνες της αναλογίας των ακόλουθων εικόνων: (α) των φασματικών καναλιών TM3 και TM1, (β) των φασματικών καναλιών TM4 και TM3, (γ) των φασματικών καναλιών TM5 και TM7 και (δ) η χρωματική σύνθεση με τις εικόνες των (γ), (β) και (α) να βρίσκονται αντίστοιχα στην κόκκινη, πράσινη και μπλε λυχνία κενού

Εικονοστοιχείο υπό σκίαση:

$$DN1(i) = \rho(i)E(i) \text{ and } DN1(j) = \rho(j)E(j)$$

Εικονοστοιχεία σε άμεση επαφή με την ηλιακή ακτινοβολία:

$$DN2(i) = n\rho(i)E(i) \text{ and } DN2(j) = n\rho(j)E(j)$$

$$R1_{i,j} = \frac{DN1(i)}{DN1(j)} = \frac{\rho(i)E(i)}{\rho(j)E(j)} \tag{3.10}$$

$$R2_{i,j} = \frac{DN2(i)}{DN2(j)} = \frac{n\rho(i)E(i)}{n\rho(j)E(j)} = \frac{\rho(i)E(i)}{\rho(j)E(j)}$$

Ο λόγος μεταξύ των δύο φασματικών καναλιών και για τα δύο εικονοστοιχεία δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

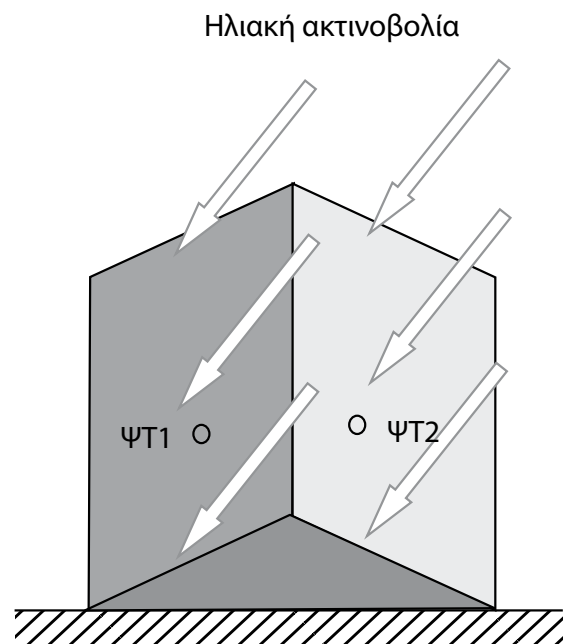
Και επομένως ισχύει η σχέση $R1_{i,j} = R2_{i,j}$

Η Εξίσωση 3.10 υποδηλώνει ότι οι φασματικές αναλογίες είναι ανεξάρτητοι της προκληθείσας από την σκίαση αναγλύφου, διακύμανσης της ηλιακής ακτινοβολίας και η τιμή τους εξαρτάται μόνο από τις τιμές της ανακλαστικότητας των εικονοστοιχείων της εικόνας. Οι λόγοι εικονοστοιχείων που αντιπροσωπεύουν αντικείμενα με την ίδια φασματική υπογραφή θα έχουν πάντα την ίδια τιμή, χωρίς να επηρεάζονται από τις συνθήκες φωτισμού ή την ύπαρξη σκιάς. Δυστυχώς όμως, οι πραγματικές συνθήκες είναι πολύ πιο περίπλοκες από αυτές που παρουσιάστηκαν παραπάνω και που αποτελούν ένα απλοποιημένο μοντέλο της πραγματικής κατάστασης, καθώς οι ατμοσφαιρικές συνθήκες που επικρατούν κατά τη διάρκεια λήψης μιας εικόνας συχνά προσθέτουν σημαντικά εμπόδια στα φασματικά κανάλια. Συνοψίζοντας, αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο η αναλογία εικόνων μπορεί να καταστείλει την επίδραση της σκίασης αναγλύφου. Σημειώνεται ότι αυτή η τεχνική μπορεί να μην είναι σε θέση να εξαλείψει εντελώς τις επιπτώσεις τους. Η καταστολή της επίδρασης της σκίασης ανάγλυφου οδηγεί σε απώλεια των χαρακτηριστικών της τοπογραφίας που συχνά αντιπροσωπεύει περισσότερο από το 90% της πληροφορίας μιας πολυφασματικής εικόνας αναλογίας και, επομένως, μειώνεται σημαντικά ο λόγος SNR.

3.5 Παραγωγή δεικτών και εποπτευόμενη ενίσχυση

Χρησιμοποιώντας τις βασικές αριθμητικές πράξεις και συναρτήσεις μπορούν να γίνουν άπειροι αριθμητικοί συνδυασμοί. Άπειροι συνδυασμοί αλγεβρικών πράξεων μπορεί να οδηγήσουν σε ατελείωτο και δυνητικά άκαρπο παιχνίδι. Μπορείτε να περάσετε μεγάλο χρονικό διάστημα παίζοντας με τους αριθμούς χωρίς να πετύχετε κάποιο ικανοποιητικό αποτέλεσμα. Αντίθετα, μάλιστα, μπορεί να πέσετε πάνω σε μια οπτικά εντυπωσιακή εικόνα χωρίς να είστε σε θέση να την εξηγήσετε ή να την ερμηνεύσετε. Για να δημιουργήσετε έναν ουσιαστικό αριθμητικό συνδυασμό, πρέπει να γνωρίζετε τις φασματικές ιδιότητες των αντικειμένων-στόχων. Οι τύποι θα πρέπει να συντίθενται με βάση τις φασματικές ή φυσικές αρχές των αντικειμένων-στόχων και να σχεδιάζονται για την ενίσχυση των συγκεκριμένων στόχων. Οι ουσιαστικοί αριθμητικοί τύποι αυτοί θα αναφέρονται στη συνέχεια ως ραδιομετρικοί δεί-

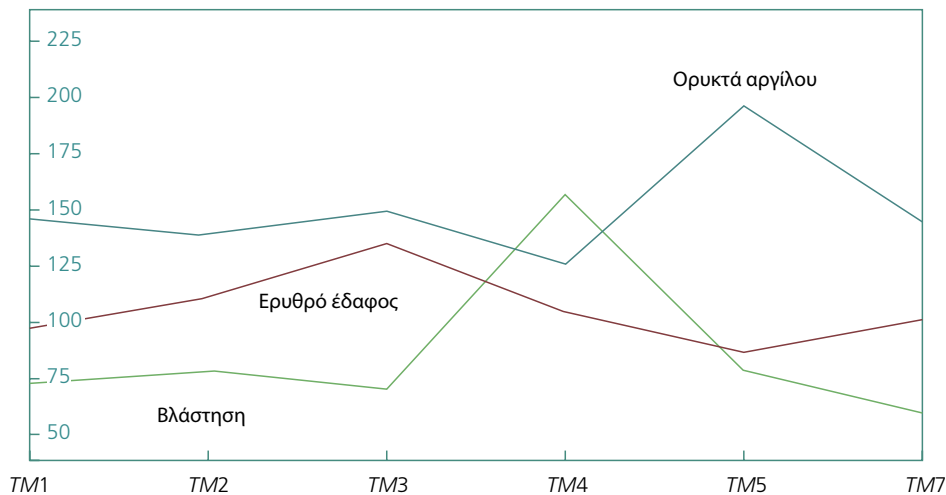
κτες, όπως ο δείκτης NDVI. Ένας δείκτης μπορεί να θεωρηθεί ως μια τεχνική εποπτευόμενη ενίσχυση χαρακτηριστικών. Εδώ παρουσιάζουμε εν συντομία έναν μερικά συχνά χρησιμοποιούμενα παραδείγματα δεικτών που βασίζονται σε δεδομένα εικόνας Landsat TM/ETM+. Μπορείτε να σχεδιάσετε και τους δικούς σας δείκτες για τα αντικείμενα-στόχους της επιλογής σας με απαραίτητη προϋπόθεση να γνωρίζεται τις φασματικές τους ιδιότητες. Στο ΙΙΙ μέρος του παρόντος βιβλίου, μπορείτε να βρείτε διάφορα παραδείγματα αυτού του είδους επιβλεπόμενης ενίσχυσης χαρακτηριστικών.



Σχήμα 3.5 Η αρχή της χρήσης του λόγου εικόνων αναλογίας στην καταστολή των επιπτώσεων της σκίασης

3.5.1 Ραδιομετρικοί δείκτες βλάστησης

Όπως παρατηρείται και στο Σχήμα 3.6, η υγιής βλάστηση παρουσιάζει την υψηλότερη τιμή της ανακλαστικότητας της στο εγγύς υπέρυθρο. Αντίθετα, η υψηλότερη τιμή της απορρόφησης εμφανίζεται στο κόκκινο. Εάν μπορούσαμε να δούμε με την όραση μας στο φάσμα του εγγύς υπέρυθρου, η βλάστηση θα εμφανιζόταν ως υπέρυθρη και όχι πράσινη. Αυτή η σημαντική διαφορά μεταξύ των φασματικών καναλιών του κόκκινου και του εγγύς υπέρυθρου είναι γνωστή ως *Red Edge*, η οποία είναι μια μοναδική φασματική ιδιότητα που καθιστά



Σχήμα 3.6 Απεικόνιση των φασματικών υπογραφών βλάστησης, ερυθρού εδάφους και ορυκτών της αργίλου

τη βλάστηση διαφορετική από όλα τα άλλα αντικείμενα. Προφανώς, αυτή η χαρακτηριστική-αναγνωριστική φασματική ιδιότητα της βλάστησης μπορεί να αξιοποιηθεί πολύ αποτελεσματικά αν συνδυαστεί με αριθμητικές πράξεις, όπως αυτές της αφαίρεσης και της διαίρεσης. Σχεδόν όλοι οι ραδιομετρικοί δείκτες έχουν σχεδιαστεί για να αναδεικνύουν τη χαρακτηριστική αυτή ιδιότητα του Red Edge με τον έναν ή τον άλλον τρόπο.

Ο πιο δημοφιλής δείκτης βλάστησης είναι ο δείκτης NDVI, του οποίου η εξίσωση είναι η εξής:

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (3.11)$$

Αυτός ο δείκτης είναι ουσιαστικά ο λόγος της διαφοράς μεταξύ των φασματικών καναλιών NIR και Red με το άθροισμα αυτών. Το άθροισμα των NIR και Red στον παρονομαστή είναι ένας παράγοντας κανονικοποίησης του NDVI σε ένα εύρος τιμών από -1 έως και 1.

Η εξίσωση του NDVI για εικόνες του δορυφόρου Landsat TM είναι η εξής:

$$Y = \frac{TM4 - TM3}{TM4 + TM3} \quad (3.12)$$

Η βλάστηση μπορεί να τονιστεί περαιτέρω χρησιμοποιώντας τον λόγο της Εξίσωσης 3.13:

$$Y = \frac{NIR - Min(NIR)}{Red - Min(Red) + 1} \quad (3.13)$$

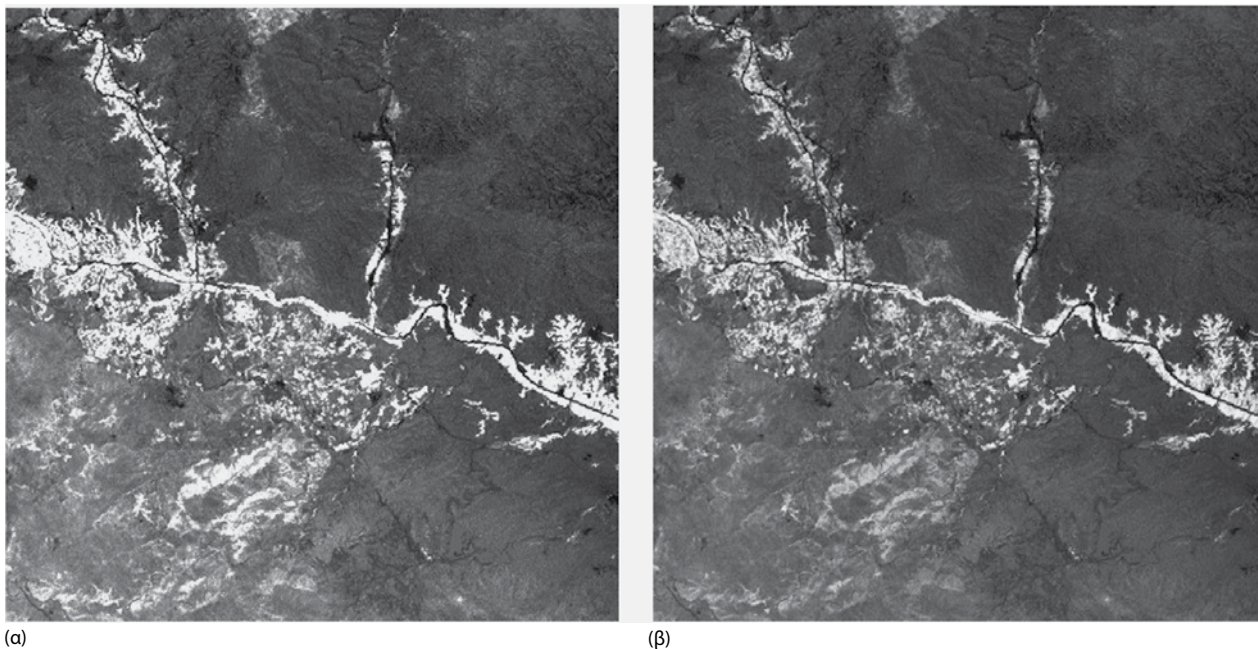
Ο παραπάνω λόγος για εικόνες του δορυφόρου Landsat TM ορίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$Y = \frac{TM4 - Min(TM4)}{TM3 - Min(TM3) + 1} \quad (3.14)$$

Η αφαίρεση της ελάχιστης τιμής του κόκκινου φασματικού καναλιού τόσο στον παρονομαστή όσο και στον αριθμητή έχει ως αποτέλεσμα την κατά προσέγγιση αφαίρεση του προστιθέμενου θορύβου από την ατμοσφαιρική σκέδαση (βλ. τα προτεινόμενα εγχειρίδια τηλεπισκόπησης), αλλά και τη μείωση της επίδρασης της τοπογραφίας. Η μονάδα προστίθεται στον παρονομαστή για να αποφευχθεί ο μηδενισμός του. Στο Σχήμα 3.7 παρουσιάζονται οι πιθανοί δείκτες βλάστησης από μια εικόνα του δορυφόρου Landsat TM.

3.5.2 Ραδιομετρικός δείκτης οξειδίων του σιδήρου

Τα οξείδια και υδροξείδια σιδήρου είναι από τα πιο συχνά εντοπιζόμενα ορυκτά στο φυσικό περιβάλλον. Εμφανίζονται κόκκινα ή ερυθροκαστανά στον γυμνό οφθαλμό, λόγω της υψηλής ανακλαστικότητας τους στη φασματική περιοχή του κόκκινου και της υψηλής απορρόφησης τους στην φασματική περιοχή του μπλε. Το χαρακτηριστικό κόκκινο χρώμα σε εδαφικές επιφάνειες συσχετίζεται στενά με την παρουσία σιδηρούχων μετάλλων. Μπορούμε να τονίσουμε περιοχές με υψηλή περιεκτικότητα σε



Σχήμα 3.7 Απεικόνιση (α) του δείκτη NDVI, ο οποίος έχει προκύψει από εικόνες του δορυφόρου LANDSAT TM και (β) του δείκτη βλάστησης που προέκυψε από την εφαρμογή διαίρεσης

οξειδία του σιδήρου χρησιμοποιώντας τον παρακάτω λόγο μεταξύ των φασματικών καναλιών του κόκκινου και του μπλε [Σχήμα 3.8(α)]:

$$Y = \frac{Red - Min(Red)}{Blue - Min(Blue) + 1} \quad (3.15)$$

Στην περίπτωση λήψεων του δορυφόρου Landsat TM η παραπάνω εξίσωση μετασχηματίζεται ως εξής:

$$Y = \frac{TM3 - Min(TM3)}{TM1 - Min(TM1) + 1} \quad (3.16)$$

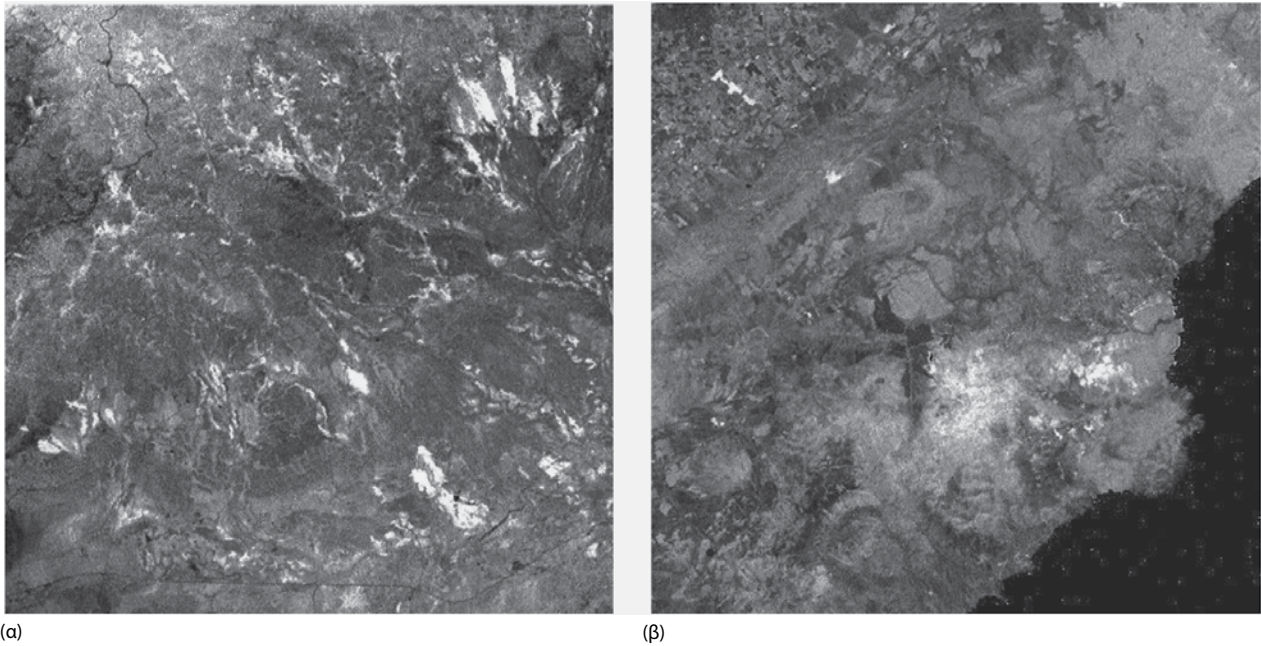
3.5.3 Ραδιομετρικός δείκτης (ένυδρων) ορυκτών της αργίλου από τον δορυφόρο Landsat TM

Τα ορυκτά της αργίλου είναι χαρακτηριστικοί υδροθερμικοί μεταμορφωσιγενείς σχηματισμοί πετρωμάτων και ο εντοπισμός μέσω της τηλεπισκόπησης είναι ως εκ τούτου πολύ χρήσιμος για μεταλλευτικές εφαρμογές. Οι χαρακτηριστικοί αυτοί γεωλογικοί σχηματισμοί διαφοροποιούνται από άλλα μεταμορφωσιγενή πετρώματα, καθώς έχουν ισχυρή απορρόφηση στη φασματική περιοχή, περίπου 2.2 μm του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, μια περιοχή που

αντιστοιχεί στη φασματική περιοχή που καταγράφει το 7ο φασματικό κανάλι του δορυφόρου Landsat TM. Αντίθετα, τα ορυκτά της αργίλου παρουσιάζουν ισχυρή ανακλαστικότητα στη φασματική περιοχή περίπου 1.65 μm του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, η οποία αντιστοιχεί στην φασματική περιοχή που καταγράφει το 5ο φασματικό κανάλι του δορυφόρου Landsat TM, όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 3.6. Επομένως, τα ορυκτά της αργίλου μπορούν γενικά να προσδιοριστούν μέσω του λόγου που παρουσιάζεται στην Εξίσωση 3.17 του 5ου και 7ου φασματικών καναλιών του δορυφόρου Landsat TM, τα οποία καταγράφουν περιοχές του φάσματος που ανήκουν στο τμήμα του μέσου υπέρυθρου [Σχήμα 3.8(β)].

$$Y = \frac{TM5 - Min(TM5)}{TM7 - Min(TM7) + 1} \quad (3.17)$$

Μέσω του υπολογισμού αυτού του δείκτη από δορυφορικές εικόνες των δορυφόρων TM, ETM+ και OLI μπορεί να επιτευχθεί ένας γενικός προσδιορισμός όλων ορυκτών της αργίλου. Από την άλλη, ο δορυφόρος ASTER διαθέτει 5 φασματικά κανάλια στο μέσο υπέρυθρο, γεγονός το οποίο επιτρέπει τον πιο λεπτομερή προσδιορισμό των ορυκτών της αργίλου. Μπορείτε και μόνοι σας να χρησιμοποιήσετε



Σχήμα 3.8 Απεικόνιση των ραδιομετρικών δεικτών των οξειδίων του σιδήρου και των (ένυδρων) ορυκτών της αργίλου του δορυφόρου Landsat TM

δεδομένα από τον δορυφόρο ASTER προκειμένου να σχηματίσετε ραδιομετρικούς δείκτες κατάλληλους να προσδιορίσετε τα ορυκτά της αργίλου.

3.6 Τυποποίηση και λογαριθμικά υπολειπόμενα

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα μιας συνδυαστικής αλγεβρικής πράξης είναι η *τυποποίηση*:

$$Y_i = \frac{X_i}{\frac{1}{k} \sum_{\lambda=1}^k X_{i\lambda}} \quad (3.18)$$

όπου με X_i συμβολίζεται το i -ιοστό φασματικό κανάλι μιας εικόνας, με Y_i το i -ιοστό τυποποιημένο φασματικό κανάλι και με k ο συνολικός αριθμός των φασματικών καναλιών.

Αυτή η πράξη μπορεί να περιορίσει την επίδραση των σκιών από το τοπογραφικό ανάγλυφο, διότι βασίζεται στην ίδια αρχή με αυτήν που αναλύεται στην ενότητα 3.4. Ο παρανομαστής του λόγου της Εξίσωσης 3.18 είναι ίσος με τον μέσο όρο όλων των επιμέρους φασματικών καναλιών μιας πολυφασματικής εικόνας. Το γεγονός αυτό επιτρέπει την τυποποίηση κάθε φασματικού καναλιού μιας εικόνας κρατώντας τον ίδιο διαιρέτη. Η τυποποίηση επιτρέπει τον

εμπλουτισμό της φασματικής διακύμανσης μεταξύ των διαφορετικών φασματικών καναλιών μιας εικόνας κρατώντας την ίδια τιμή στον παρανομαστή.

Εκτός από την Εξίσωση 3.18, η οποία είναι μια αριθμητική μέθοδος τυποποίησης βασισμένη στον μέσο όρο, υπάρχει και μια άλλη τεχνική τυποποίησης, η *τεχνική λογαριθμικών υπολειπόμενων* (Green & Craig, 1985), η οποία βασίζεται στην εύρεση του γεωμετρικού μέσου των αναλυόμενων δεδομένων και ο τύπος της δίνεται στην ακόλουθη εξίσωση:

$$\ln(R_{i\lambda}) = \ln(x_{i\lambda}) - \ln(x_i) - \ln(x_{\lambda}) + \ln(x_{..}) \quad (3.19)$$

όπου με $x_{i\lambda}$ συμβολίζεται η ψηφιακή τιμή του i -οστού εικονοστοιχείου σε ένα φασματικό κανάλι λ .

Εάν με

$$x_{i.} = \left(\prod_{\lambda=1}^k x_{i\lambda} \right)^{\frac{1}{k}}$$

συμβολίζουμε τον γεωμετρικό μέσο όρο του i -οστού εικονοστοιχείου για ένα σύνολο k φασματικών καναλιών,