

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΕΙΚΟΝΩΝ ΠΟΥ ΠΑΡΑΓΟΝΤΑΙ ΑΠΟ ΛΟΓΟΥΣ ΦΑΣΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΝΑΛΙΩΝ ΜΕ ΣΗΜΑΝΤΙΚΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ

Σκιάνης Γ.¹, Βαϊόπουλος Δ.¹, Νικολακόπουλος Κ.²

¹Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος, Εργαστήριο Τηλεανίχνευσης

²Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (IGME)

Περίληψη

Σε γεωλογικές και περιβαλλοντικές έρευνες, συχνά χρησιμοποιείται η τεχνολογία της τηλεανίχνευσης για την παραγωγή εικόνων που προκύπτουν από λόγους δυο διαφορετικών φασματικών ζωνών με ανακλαστικότητα x και y . Ο βαθμός στον οποίο συσχετίζονται μεταξύ τους οι τιμές x και y των εικόνων των δυο φασματικών ζωνών από την ίδια περιοχή, ο οποίος εκφράζεται ποσοτικά μέσω του γραμμικού συντελεστή συσχέτισης ρ , επηρεάζει την οπτική αντίληψη της παραγόμενης εικόνας του λόγου x/y . Φασματικές ζώνες μεγάλης θετικής συσχέτισης, αναμένεται να παράγουν εικόνες λόγου x/y με ιστογράμματα μικρού εύρους και μικρής τυπικής απόκλισης. Η μικρή τυπική απόκλιση εκφράζει εικόνα χαμηλής αντίθεσης φωτεινότητας, που δεν ευνοεί την ευκρινή αποτύπωση των διαφόρων στόχων ενδιαφέροντος.

Στην παρούσα εργασία μελετάται με ποσοτικούς όρους, και με τη βοήθεια δισδιάστατων κατανομών, η επιρροή του συντελεστή συσχέτισης ρ στην τυπική απόκλιση της εικόνας του λόγου φασματικών ζωνών. Από τη μελέτη της συμπεριφοράς της κατανομής που περιγράφει το λόγο x/y , συμπεραίνεται ότι αυξανόμενης της τιμής του ρ μειώνεται σημαντικά η τυπική απόκλιση της εικόνας, ιδίως αν το ρ υπερβαίνει το 0,5. Θεωρητικοί συλλογισμοί σε συνδυασμό με πειραματισμό με δορυφορική εικόνα, έδειξαν ότι όταν η τιμή του ρ είναι μεγάλη, είναι δυνατόν, αντί του λόγου x/y , να χρησιμοποιηθεί ο λόγος $(x/y)^2$, προκειμένου να παραχθεί εικόνα με μεγαλύτερη τυπική απόκλιση, επομένως και με καλύτερη αντίθεση φωτεινότητας. Τα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας μπορούν να αξιοποιηθούν σε φυσικογεωγραφικές, περιβαλλοντικές και μεταλλευτικές έρευνες, με τη συνδρομή της τηλεανίχνευσης.

A STUDY OF THE STATISTICAL BEHAVIOR OF DIGITAL IMAGES PRODUCED BY CONSIDERABLY CORRELATED BAND RATIOS

Skianis G.¹, Vaiopoulos D.¹, Nikolakopoulos K.²

¹University of Athens, Faculty of Geology and GeoEnvironment, Remote Sensing Laboratory

²Institute of Geological and Mineral Exploration (IGME)

Abstract

In geological and environmental research, remote sensing technology is often used to produce images of spectral band ratios x/y . The correlation between x and y values of the two spectral bands is expressed in quantitative terms by the linear correlation coefficient ρ and it influences the optical effect of the image of the ratio x/y . Spectral bands with a high positive correlation, are expected to produce x/y images with narrow histograms and low standard deviations. A low standard deviation expresses an image with a poor brightness contrast, which does not help the targets of interest to be expressed clearly.

In the present paper we study, using appropriate bivariate distributions, how the correlation coefficient influences, in quantitative terms, the standard deviation of the image

of the spectral bands ratio. The behavior of the distribution of the x/y values shows that as long as the value ρ increases, the standard deviation of the image decreases considerably, especially when ρ is more than 0.5. Theoretical considerations combined with experimentation on a satellite image, show that when ρ is high, it is possible to use the ratio $(x/y)^2$ instead of x/y , in order to produce an image with a larger standard deviation, which means a better brightness contrast. The conclusions of this paper may be useful in geographical, environmental and mineral research, when remote sensing data are available.

Λέξεις κλειδιά: γραμμικός συντελεστής συσχέτισης, λόγος φασματικών ζωνών, τυπική απόκλιση, γκαουσιανή κατανομή.

Key words: linear correlation coefficient, spectral bands ratio, standard deviation, Gaussian distribution.

1. Εισαγωγή

Από τα πρώτα βήματα της αξιοποίησης των πολυφασματικών εικόνων στις γεωεπιστήμες, είχε γίνει αντιληπτό ότι οι εικόνες που παράγονται από λόγους διαφορετικών ζωνών μπορούν να αξιοποιηθούν στη χαρτογράφηση της φυτοκάλυψης, για γεωλογικές και περιβαλλοντικές μελέτες. Οι Birth & McVey (1968) πρότειναν ένα ηλίκο τιμών ανακλαστικότητας στις ζώνες εγγύς υπέρυθρου και ερυθρού, που ορίζεται από τη σχέση:

$$u = \frac{x}{y} = \varphi(x, y) \quad (1)$$

x είναι η ανακλαστικότητα στο εγγύς υπέρυθρο και y είναι η ανακλαστικότητα στο ερυθρό. Η σχέση (1) μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δείκτης βλάστησης για τη χαρτογράφηση της φυτοκάλυψης μιας περιοχής έρευνας. Συχνότερα χρησιμοποιούνται άλλοι δείκτες βλάστησης, όπως ο NDVI (Rouse et. al. 1974), ο TVI (Deering et. al. 1975), ο SAVI (Huete 1988), TSAVI (Baret et. al. 1989), ο MSR (Chen 1996) και πολλοί άλλοι. Ωστόσο, οι αλγεβρικές εκφράσεις για τους παραπάνω δείκτες μπορούν να γραφούν ως συναρτήσεις του λόγου u που ορίζεται από τη σχέση (1), και αυτό προσδίδει ένα ιδιαίτερο ερευνητικό ενδιαφέρον όσον αφορά στη μελέτη της στατιστικής συμπεριφοράς των ψηφιακών εικόνων u .

Εξ άλλου, λόγοι φασματικών ζωνών με βάση τη σχέση (1) αξιοποιούνται και στη μεταλλευτική έρευνα, για αναγνώριση ζωνών υδροθερμικής εξαλλοίωσης (Davis & Berlin 1989, Knepper & Simpson 1992, Goossens & Kroonenberg 1994, White et. al. 1997). Σε αυτές τις περιπτώσεις, οι μεταβλητές x και y εκφράζουν τιμές ανακλαστικότητας σε διάφορες ζώνες του μέσου υπέρυθρου.

Για να αποτυπωθούν ευκρινώς οι στόχοι ενδιαφέροντος σε μια εικόνα λόγου φασματικών ζωνών, θα πρέπει η αντίθεση φωτεινότητας της εικόνας να είναι αρκετά έντονη, που σημαίνει ότι η τυπική απόκλιση του ιστογράμματος τιμών φωτεινότητας να είναι αρκετά υψηλή. Σε αυτό το σημείο όμως, μπορεί κανείς να εκτιμήσει διαισθητικά ότι αν υπάρχει μια σημαντική συσχέτιση μεταξύ των ζωνών x και y που ενδείκνυται για τη διεξαγόμενη γεωλογική ή περιβαλλοντική έρευνα, η τυπική απόκλιση μπορεί να είναι μικρή και η αντίθεση φωτεινότητας χαμηλή. Τίθενται επομένως τα παρακάτω ερωτήματα:

α) Πώς επηρεάζεται, με ποσοτικούς όρους, η τυπική απόκλιση σ της εικόνας φασματικού λόγου από το γραμμικό συντελεστή συσχέτισης ρ , με τον οποίο ποσοτικοποιείται η γραμμική συσχέτιση μεταξύ x και y ;

β) Πώς μπορεί να τροποποιηθεί η μαθηματική έκφραση για το λόγο φασματικών ζωνών ώστε οι παραγόμενες εικόνες να έχουν μια σχετικά υψηλή τυπική απόκλιση και μια καλή αντίθεση φωτεινότητας;

Αυτά τα δυο ερωτήματα είναι αντικείμενο της παρούσας εργασίας. Η διαπραγμάτευσή τους γίνεται με τη βοήθεια της θεωρίας κατανομών, τροποποιώντας μια μεθοδολογική προσέγγιση που αναπτύχθηκε πρόσφατα από τους συγγραφείς (Vaiopoulos et. al. 2004, Σκιάνης κ.α. 2004α, β). Καθώς διάφοροι δείκτες βλάστησης μπορούν να εκφραστούν ως συνάρτηση της σχέσης (1), τα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας ενδιαφέρουν ευρύτερα την περιβαλλοντική έρευνα για χαρτογράφηση φυτοκάλυψης, ακόμα και σε περιπτώσεις που δε χρησιμοποιείται ο απλός δείκτης βλάστησης της σχέσης (1). Ενδιαφέρουν επίσης και τη μεταλλευτική έρευνα, όταν επιχειρείται η χαρτογράφηση υδροθερμικών ζωνών εξαλλοίωσης, αξιοποιώντας πολυφασματικές εικόνες.

2. Η πιθανοθεωρητική προσέγγιση

Για την περιγραφή του ιστογράμματος των τιμών φωτεινότητας ψηφιακής εικόνας, μπορεί να αξιοποιηθεί η γκαουσιανή κατανομή (Gonzalez & Wintz 1987, Schowengerdt 1997). Με βάση αυτήν την προσέγγιση, το ιστόγραμμα της ζώνης x είναι δυνατό να περιγραφεί από την παρακάτω γκαουσιανή κατανομή $p_1(x)$:

$$p_1(x) = \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \cdot \exp \left[-\frac{(x - \mu_1)^2}{2\sigma_1^2} \right] \quad (2)$$

μ_1 και σ_1 είναι η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση της κατανομής, αντίστοιχα.

Για τη ζώνη y , η αντίστοιχη κατανομή $p_2(y)$ ορίζεται ως:

$$p_2(y) = \frac{1}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} \cdot \exp \left[-\frac{(y - \mu_2)^2}{2\sigma_2^2} \right] \quad (3)$$

μ_2 και σ_2 είναι η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση της κατανομής, αντίστοιχα.

Αν υπάρχει γραμμική συσχέτιση μεταξύ των τιμών ανακλαστικότητας x και y , με συντελεστή συσχέτισης ρ , η συνδυασμένη κατανομή $f(x, y)$ προσδιορίζεται από τη σχέση (Κάκουλλος 1972, Schowengerdt 1997):

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_1\sigma_2} \cdot \exp \left\{ -\frac{1}{2(1-\rho^2)} \left[\frac{(x-\mu_1)^2}{\sigma_1^2} - 2\rho \cdot \frac{(x-\mu_1)(y-\mu_2)}{\sigma_1\sigma_2} + \frac{(y-\mu_2)^2}{\sigma_2^2} \right] \right\} \quad (4)$$

Η κατανομή τιμών $g(u)$ του απλού λόγου φασματικών ζωνών που ορίζεται από τη σχέση (1), μπορεί να προσδιοριστεί με βάση τη σχέση (Vaiopoulos et.al. 2004):

$$g(u) = \int_0^1 |J| \cdot f(v, \varphi^{-1}[u, v]) dv \quad (5)$$

u είναι μια μεταβλητή εξ ορισμού ίση με x . φ^{-1} είναι η αντίστροφη συνάρτηση της φ που ορίζει τον απλό λόγο u . J είναι η ιακωβιανή των x και y ως προς u και v . Το διάστημα ολοκλήρωσης είναι το διάστημα τιμών της v (ουσιαστικά της x). Στη συγκεκριμένη περίπτωση όπου έχουμε τιμές ανακλαστικότητας, το διάστημα ολοκλήρωσης είναι το $[0, 1]$.

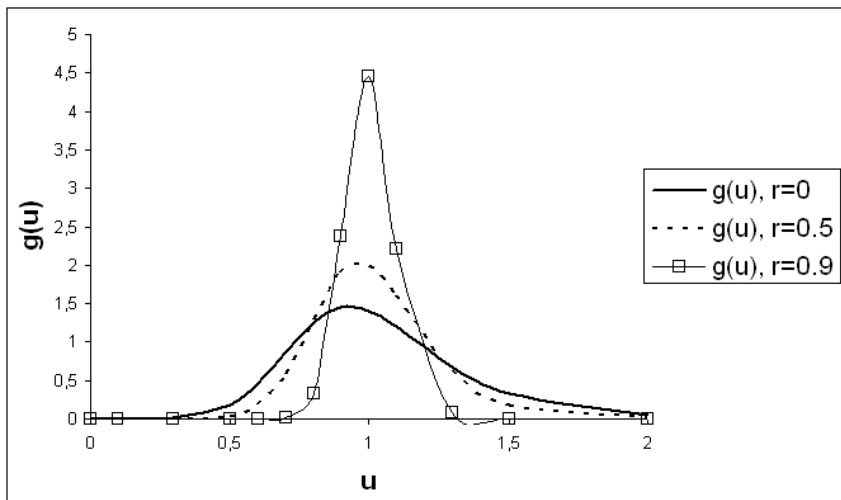
Από τις σχέσεις (1), (4) και (5) συνάγεται η παρακάτω έκφραση για την κατανομή $g(u)$:

$$g(u) = \frac{1}{2\pi\sigma_1\sigma_2\sqrt{1-\rho^2}} \int_0^1 \frac{x}{u^2} \cdot \exp \left\{ -\frac{1}{2(1-\rho^2)} \left[\frac{(x-\mu_1)^2}{\sigma_1^2} - 2\rho \cdot \frac{(x-\mu_1)(x/u-\mu_2)}{\sigma_1\sigma_2} + \frac{(x/u-\mu_2)^2}{\sigma_2^2} \right] \right\} dx \quad (6)$$

Η κατανομή $g_m(u_m)$ οποιασδήποτε ποσότητας u_m που είναι συνάρτηση του λόγου u (για παράδειγμα $u_m = \arctan(u)$), μπορεί να προσδιοριστεί από την $g(u)$ με βάση τη σχέση (Spiegel 1977):

$$g_m(u_m) = g[F^{-1}(u_m)] \cdot \left| \frac{du}{du_m} \right| \quad (7)$$

F^{-1} είναι η αντίστροφη συνάρτηση της F μέσω της οποίας ορίζεται το u_m από το u .



Σχήμα 1. Η κατανομή $g(u)$ για διάφορες τιμές του συντελεστή συσχέτισης ρ . $\mu_1 = \mu_2 = 0.5$, $\sigma_1 = \sigma_2 = 0.1$

Με βάση τη σχέση (6), είναι δυνατός ο υπολογισμός των τιμών της κατανομής g του λόγου u , για διάφορες τιμές του συντελεστή συσχέτισης ρ . Στο (σχ. 1) παρουσιάζεται η κατανομή $g(u)$ για διάφορες τιμές του ρ , θέτοντας μέση τιμή των x και y ίση με 0.5 και τυπική απόκλιση των x και y ίση με 0.1. Είναι φανερό ότι στο βαθμό που αυξάνεται το ρ , οι τιμές του u τείνουν να συγκεντρώνονται γύρω από μια επικρατούσα τιμή, με αποτέλεσμα να μειώνεται η διασπορά της κατανομής. Μείωση της διασποράς (επομένως και της τυπικής απόκλισης), σημαίνει περιορισμό της αντίθεσης φωτεινότητας της ψηφιακής εικόνας του λόγου u . Είναι λοιπόν σημαντικό να μελετηθεί, με ποσοτικούς όρους, η επίδραση του συντελεστή συσχέτισης στην τυπική απόκλιση της κατανομής των τιμών του λόγου φασματικών ζωνών.

Η τυπική απόκλιση σ του λόγου u ορίζεται από τη σχέση:

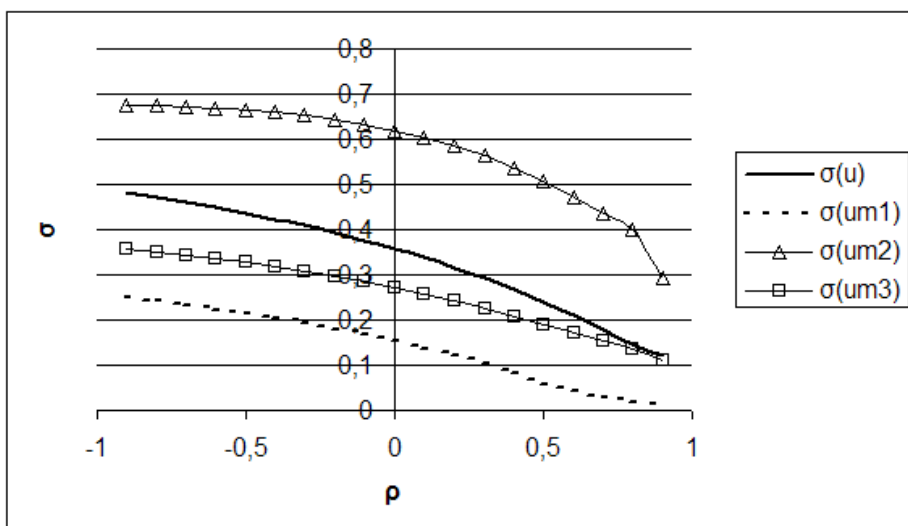
$$\sigma = \sqrt{\int_R (u - \mu)^2 g(u) du} \quad (8)$$

R είναι το διάστημα τιμών του u . μ είναι η μέση τιμή του u , που ορίζεται ως:

$$\mu = \int_R u \cdot g(u) du \quad (9)$$

3. Η μεταβολή της τυπικής απόκλισης και του συντελεστή μεταβλητότητας ως προς το γραμμικό συντελεστή συσχέτισης

Για τη μελέτη της μεταβολής της τυπικής απόκλισης ως προς το γραμμικό συντελεστή συσχέτισης ρ , υποθέσαμε ότι τα ιστογράμματα των καναλιών x και y ακολουθούν γκαουσιανή κατανομή με κοινή μέση τιμή $\mu_1 = \mu_2 = 0.5$ και κοινή τυπική απόκλιση $\sigma_1 = \sigma_2 = 0.1$. Προφανώς είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν γκαουσιανές κατανομές με άλλες τιμές στατιστικών παραμέτρων, όμως για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας αρκούμαστε σε αυτές τις τιμές. Με βάση τις σχέσεις (1), (6), (8) και (9) υπολογίσαμε την τυπική απόκλιση του απλού λόγου φασματικών ζωνών u για διάφορες τιμές του ρ . Στο (σχ. 2) εμφανίζεται η μεταβολή της τυπικής απόκλισης του u , $\sigma(u)$, ως προς ρ .



Σχήμα 2. Μεταβολή της τυπικής απόκλισης των ποσοτήτων u , u_{m1} , u_{m2} και u_{m3} ως προς ρ .

Παρατηρούμε ότι αυξανόμενου του συντελεστή γραμμικής συσχέτισης ρ , μειώνεται η τυπική απόκλιση του λόγου u . Αν η συσχέτιση είναι αρνητική, τότε η τυπική απόκλιση $\sigma(u)$ είναι μεγαλύτερη από αυτήν που αντιστοιχεί σε μηδενική συσχέτιση. Στο (σχ. 3) εμφανίζεται η μεταβολή της κανονικοποιημένης ως προς $\rho = 0$ τιμής $\sigma(u)$ ως προς ρ (λόγος $\sigma(\rho)/\sigma(\rho = 0) = \sigma(u)$, norm). Όταν το ρ δεν υπερβαίνει το 0.3, η τυπική απόκλιση δεν διαφέρει περισσότερο από το 20% της τιμής που αντιστοιχεί σε μηδενική συσχέτιση ($\rho = 0$). Για $\rho = 0.5$ η διαφορά είναι πάνω από 30% και αυξάνεται περισσότερο, στο βαθμό που αυξάνεται το ρ .

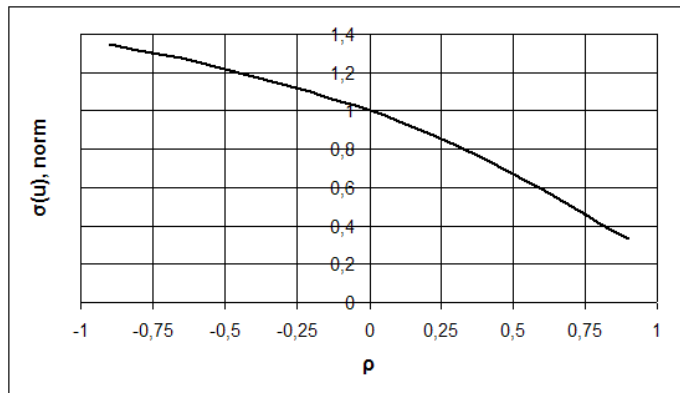
Συχνά, αντί για το λόγο u χρησιμοποιείται ο τροποποιημένος λόγος φασματικών ζωνών u_{m1} , που ορίζεται από τη σχέση (Faust 1989):

$$u_{m1} = \arctan\left(\frac{x}{y}\right) \quad (10)$$

Η τυπική απόκλιση του u_{m1} , $\sigma(u_{m1})$, ως προς ρ , μπορεί να υπολογιστεί λαμβάνοντας υπόψη ότι το u_{m1} είναι συνάρτηση του u και αξιοποιώντας τις σχέσεις (6), (7), (8), (9) και (10). Το $\sigma(u_{m1})$ έχει την ίδια συμπεριφορά με αυτήν του $\sigma(u)$, και μάλιστα οι τιμές $\sigma(u_{m1})$ είναι μικρότερες, όπως φαίνεται στο (σχ. 2). Ανακύπτει επομένως το ερώτημα του πώς μπορούν να οριστούν τροποποιημένοι λόγοι φασματικών ζωνών με μεγαλύτερες τυπικές αποκλίσεις, οι οποίες ευνοούν την παραγωγή ψηφιακών εικόνων με καλύτερη αντίθεση φωτεινότητας. Η απάντηση θα μπορούσε να είναι η ύψωση του λόγου x/y στο τετράγωνο, προκειμένου να διευρυνθεί το διάστημα τιμών που λαμβάνει ο δείκτης βλάστησης. Με αυτό το σκεπτικό προτείνουμε τους παρακάτω τροποποιημένους λόγους u_{m2} και u_{m3} :

$$u_{m2} = \left(\frac{x}{y}\right)^2 \quad (11)$$

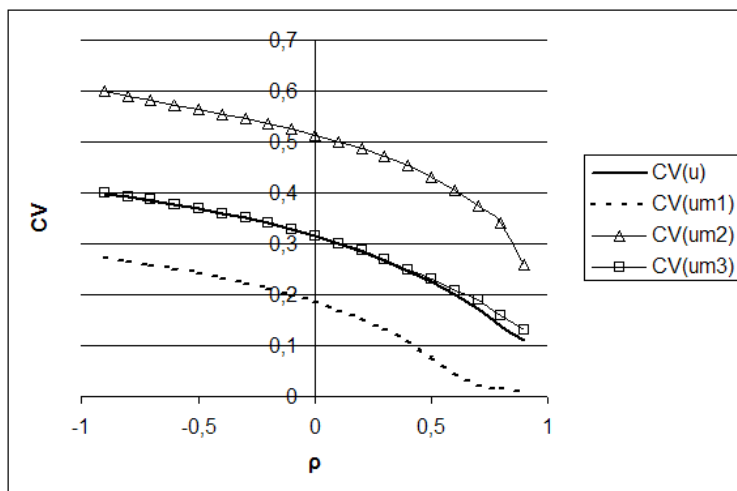
$$u_{m3} = \arctan\left[\left(\frac{x}{y}\right)^2\right] \quad (12)$$



Σχήμα 3. Μεταβολή της κανονικοποιημένης τυπικής απόκλισης $\sigma(u)$, norm ως προς ρ .

Η τυπική απόκλιση $\sigma(u_{m2})$ υπολογίζεται από τις σχέσεις (6), (7), (8), (9) και (11). Η τυπική απόκλιση $\sigma(u_{m3})$ υπολογίζεται από τις σχέσεις (6), (7), (8), (9) και (12). Όπως φαίνεται στο (σχ. 2), οι τυπικές αποκλίσεις των u_{m2} και u_{m3} είναι μεγαλύτερες από αυτές των u και u_{m1} αντίστοιχα, για κάθε ρ . Το ίδιο ισχύει και για το συντελεστή μεταβλητότητας CV (λόγος τυπικής απόκλισης σ προς μέση τιμή μ), όπως φαίνεται στο (σχ. 4).

Με βάση την πιθανοθεωρητική μελέτη της συμπεριφοράς του φασματικού λόγου u , προκύπτει ότι η γραμμική συσχέτιση μεταξύ των φασματικών ζωνών μπορεί να μειώσει σημαντικά την τυπική απόκλιση, άρα και την αντίθεση φωτεινότητας, της παραγόμενης ψηφιακής εικόνας. Οι ποσότητες u_{m2} και u_{m3} , στις οποίες υπεισέρχεται το τετράγωνο του u , έχουν μεγαλύτερη τυπική απόκλιση και συντελεστή μεταβλητότητας. Παρουσιάζει επομένως ενδιαφέρον η εφαρμογή αυτών των τροποποιημένων λόγων φασματικών ζωνών σε πραγματικά δεδομένα.

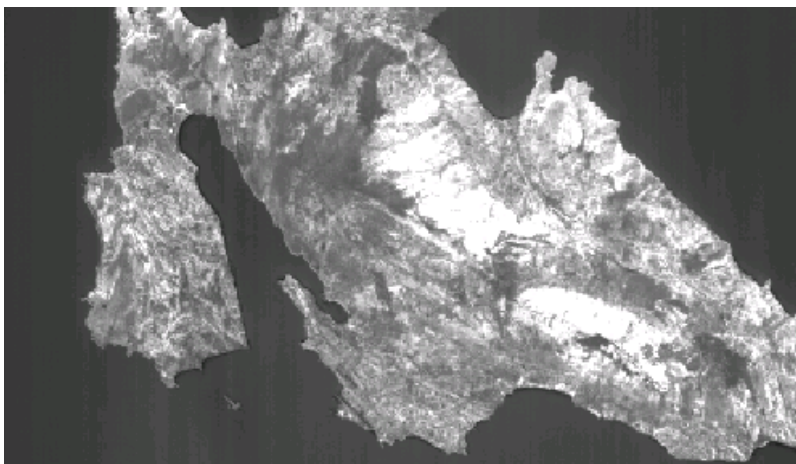


Σχήμα 4. Μεταβολή του συντελεστή μεταβλητότητας CV ως προς το συντελεστή συσχέτισης ρ .

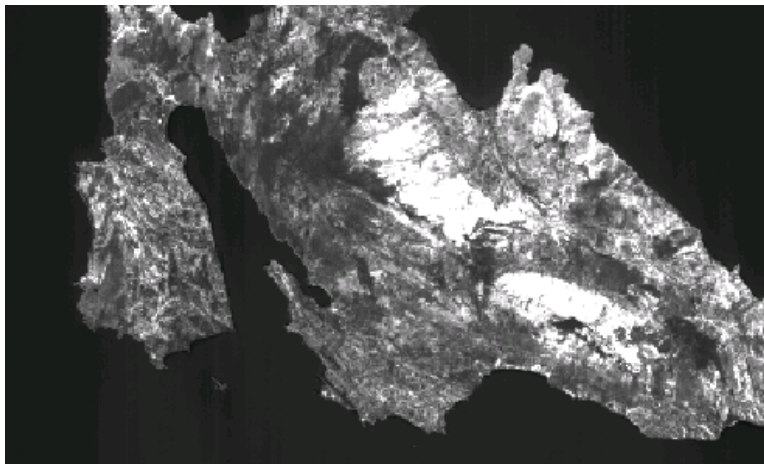
3. Εφαρμογή σε δορυφορική εικόνα

Οι λόγοι u , u_{m1} , u_{m2} και u_{m3} , εφαρμόστηκαν σε δορυφορική εικόνα ASTER από τη Νήσο Κεφαλληνιά. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή, οι ζώνες x και y που εμφανίζονται στις σχέσεις (1), (10), (11) και (12) είναι οι ζώνες του εγγύς υπέρυθρου και του ερυθρού, αντίστοιχα. Επομένως οι παραπάνω λόγοι είναι δείκτες βλάστησης. Ο συντελεστής συσχέτισης ρ των ζωνών εγγύς υπέρυθρου και ερυθρού, για το σύνολο της εικόνας, υπολογίστηκε με το εργαλείο CORRELATION του spatial modeler του λογισμικού ERDAS Imagine και βρέθηκε αρκετά υψηλός και ίσος με 0.89.

Στα (σχ. 5) και (σχ. 6) εμφανίζονται οι εικόνες του απλού λόγου u της σχέσης (1) και του τροποποιημένου λόγου u_{m2} , αντίστοιχα. Και στις δυο εικόνες έχει γίνει γραμμική έλκυση ιστογράμματος.



Σχήμα 5. Εικόνα απλού φασματικού λόγου u της Ν. Κεφαλληνιάς.



Σχήμα 6. Εικόνα τροποποιημένου φασματικού λόγου u_{m2} της Ν. Κεφαλληνιάς.

Μπορεί κανείς να δει ότι η εικόνα u_{m2} έχει εντονότερη αντίθεση φωτεινότητας από όσο η εικόνα του απλού φασματικού λόγου u . Από παρατηρήσεις στην οθόνη του υπολογιστή διαπιστώθηκε ότι οι διαφορές στο οπτικό αποτέλεσμα μεταξύ των εικόνων u_{m3} και u_{m1} είναι λιγότερο έντονες.

Υπολογίστηκαν οι θεωρητικά προβλεπόμενες τυπικές αποκλίσεις σ και συντελεστές μεταβλητότητας CV των λόγων u , u_{m1} , u_{m2} και u_{m3} , με βάση τις σχέσεις (1), (6), (7), (8), (9), (10), (11) και (12). Στη σχέση (6), ως τιμές μ_1 και μ_2 τέθηκαν οι μέσες τιμές των καναλιών εγγύς υπέρυθρου και ερυθρού της εικόνας ASTER, αντίστοιχα. Και ως τιμές σ_1 και σ_2 τέθηκαν οι τυπικές αποκλίσεις των καναλιών εγγύς υπέρυθρου και ερυθρού, της ίδιας εικόνας. Η τιμή του ρ είναι η υπολογισθείσα τιμή του συντελεστή συσχέτισης μεταξύ των δυο καναλιών.

Βρέθηκαν επίσης και τα στατιστικά μεγέθη των φασματικών λόγων u , u_{m1} , u_{m2} και u_{m3} της δορυφορικής εικόνας της Ν. Κεφαλληνιάς. Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται οι θεωρητικές εκτιμήσεις σε αντιπαραβολή με τις πραγματικές τιμές των στατιστικών μεγεθών των εικόνων των διαφόρων φασματικών λόγων.

Πίνακας 1. Θεωρητικές εκτιμήσεις και πραγματικές τιμές τυπικής απόκλισης και συντελεστή μεταβλητότητας των φασματικών λόγων u , u_{m1} , u_{m2} και u_{m3}

Φασματικός λόγος	Τυπική απόκλιση (σ)	Σχετική % απόκλιση σ	Συντελεστής μεταβλητότητας (CV)	Σχετική % απόκλιση CV
u (θεωρία)	0.400	18.2	0.386	12.2
u (εικόνα)	0.327		0.388	
u_{m1} (θεωρία)	0.185	25.4	0.248	25.3
u_{m1} (εικόνα)	0.138		0.185	
u_{m2} (θεωρία)	1.193	29.5	0.871	7.2
u_{m2} (εικόνα)	0.841		0.808	
u_{m3} (θεωρία)	0.294	13.9	0.413	13.0
u_{m3} (εικόνα)	0.253		0.359	

Οι επί τοις εκατό σχετικές αποκλίσεις μεταξύ των θεωρητικά προβλεπόμενων και των (πραγματικών) τιμών των στατιστικών μεγεθών της δορυφορικής εικόνας κυμαίνονται από 7% ως 30%. Ωστόσο, οι θεωρητικές εκτιμήσεις και τα πραγματικά δεδομένα συμφωνούν στο ότι ο τροποποιημένος λόγος φασματικών ζωνών u_{m2} (σχέση (11)) παράγει εικόνα με σημαντικά μεγαλύτερη τυπική απόκλιση και συντελεστή μεταβλητότητας από όσο ο απλός λόγος u (σχέση (1)). Το ίδιο ισχύει και για το λόγο u_{m3} (σχέση (12)) σε σύγκριση με το λόγο u_{m1} (σχέση (10)).

Το με πόση ευκρίνεια μπορεί να αποτυπωθεί ένας στόχος, εξαρτάται, σε σημαντικό βαθμό, από τη φασματική του συμπεριφορά στα κανάλια από τα οποία λαμβάνεται ο λόγος. Ωστόσο, τροποποιημένοι λόγοι φασματικών ζωνών ψωμένοι στο τετράγωνο παράγουν εικόνες με ευρύτερο ιστόγραμμα τιμών, που ευνοεί μεγαλύτερες διαφορές τονικότητας μεταξύ εικονοστοιχείων. Επομένως, στο βαθμό που υπάρχει σημαντική θετική συσχέτιση μεταξύ των φασματικών ζωνών x και y , η ύψωση του λόγου x/y στο τετράγωνο μπορεί να εξυπηρετήσει στην παραγωγή εικόνων με βελτιωμένη αντίθεση φωτεινότητας, ώστε να αποτυπώνονται ευκρινέστερα γεωλογικοί και εδαφολογικοί στόχοι ενδιαφέροντος, όπως ζώνες εξαλλοίωσης, καμένες περιοχές ή εδάφη με διαφοροποιημένη πυκνότητα φυτοκάλυψης.

4. Συμπεράσματα

Από την πιθανοθεωρητική μελέτη και τον πειραματισμό με τη δορυφορική εικόνα, προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα:

Η συσχέτιση μεταξύ των ζωνών x και y του φασματικού λόγου επηρεάζει το εύρος τιμών και την αντίθεση φωτεινότητας της παραγόμενης εικόνας. Μια σημαντική θετική συσχέτιση μειώνει την τυπική απόκλιση του ιστογράμματος, σε σχέση με αυτήν που προκύπτει από φασματικές ζώνες ασθενούς ή μηδενικής συσχέτισης. Απεναντίας, μια αρνητική συσχέτιση μεταξύ των x και y παράγει εικόνα φασματικού λόγου με μεγαλύτερη τυπική απόκλιση από αυτήν που αντιστοιχεί σε μη συσχετιζόμενες φασματικές ζώνες.

Ο τροποποιημένος λόγος φασματικών ζωνών της μορφής $(x/y)^2$, όπως ορίζεται στη σχέση (11) ή στη σχέση (12), παράγει εικόνες με μεγαλύτερη τυπική απόκλιση και συντελεστή μεταβλητότητας από όσο ο απλός φασματικός λόγος x/y . Επομένως, αυτός ο τροποποιημένος λόγος μπορεί να εξυπηρετήσει στην παραγωγή ψηφιακών εικόνων με βελτιωμένη αντίθεση φωτεινότητας.

Οι θεωρητικές προβλέψεις της πιθανοθεωρητικής προσέγγισης βρίσκονται, γενικά, σε συμφωνία με τα παρατηρησιακά δεδομένα της δορυφορικής εικόνας, παρά τις αναπόφευκτες αποκλίσεις, που οφείλονται στην παραδοχή ότι το ιστόγραμμα της εικόνας έχει γκαουσιανή συμπεριφορά. Κατά συνέπεια, η προτεινόμενη μεθοδολογία μπορεί να αξιοποιηθεί στη μελέτη της στατιστικής συμπεριφοράς διαφόρων δεικτών βλάστησης και λόγων φασματικών ζωνών, με σκοπό την αξιολόγηση και τροποποίηση αυτών.

Τα πορίσματα της παρούσας εργασίας μπορούν να βοηθήσουν στη γεωλογική και περιβαλλοντική έρευνα, για χαρτογράφηση πυκνότητας βλάστησης, ζωνών υδροθερμικής εξαλλοίωσης και λιθολογικών τύπων, αξιοποιώντας πολυφασματικές εικόνες, τις οποίες παρέχει η τεχνολογία της τηλεανίχνευσης.

Βιβλιογραφία

Baret, F., G. Guyot, , D. J Major, 1989: TSAVI: a vegetation index which minimizes soil brightness effects on LAI and APAR estimation. Proc. IGARSS'89 and 12th Canadian Symposium on Remote Sensing. Vancouver, Canada, 1355-1358

Birth, G. S. and G. McVey, 1968: Measuring the Color of Growing Turf with a Reflectance Spectrophotometer. Agronomy Journal 60, 640-643

Chen, J., 1996: Evaluation of vegetation indices and modified simple ratio for boreal

applications. Can. J. Remote Sens. 22, 229-242

Davis, P.A. and G.L. Berlin, 1989: Rock Discrimination in the Complex Geologic Environment of Jabal Salma, Saudi Arabia, using Landsat Thematic Mapper Data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 55, 1147-1160

Deering, D. W., J. W. Rouse, R. H. Haas, J. A. Schell, 1975: Measuring Forage Production of Grazing Units from Landsat MSS Data. 10th International Symposium on Remote Sensing of Environment 2, 1169-1178

Faust, N. L., 1989: Image Enhancement. In: Allen Kent and James G. Williams (editors), Encyclopedia of Computer Science and Technology, Vol. 20, Supplement 5. Marcel Dekker Inc.

Gonzalez, R. C. and P. Wintz, 1987: Digital Image Processing. Addison-Wesley Publishing Co.

Goossens, M.A. and S.B. Kroonenberg, 1994: Spectral Discrimination of Contact Metamorphic Zones and its Potential for Mineral Exploration, Province of Salamanca, Spain. Remote Sensing of Environment 47, 331-344

Huete, A. R., 1988: A soil-adjusted vegetation index (SAVI). Remote Sensing of Environment 25, 295-309

Knepper, D.H. and S.L. Simpson, 1992: Remote Sensing in Geology and Mineral Resources of the Altiplano and Cordillera Occidental, Bolivia. U.S. Geological Survey Bulletin 1975, 47-55

Rouse, J. W., R. H. Haas, J. A. Schell, D. W. Deering, 1973: Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. 3rd ERTS Symposium, Vol. 1, 48-62

Schowengerdt, R. A., 1997: Remote Sensing. Models and Methods for Image Processing. Academic Press, 522pp

Spiegel, M. R., 1977: **Πιθανότητες και Στατιστική. ΕΣΠΙ, Αθήνα, 384 σελ.**

Vaiopoulos, D., Skianis, G. Aim., and Nikolakopoulos, K., 2004. The contribution of probability theory in assessing the efficiency of two frequently used vegetation indices. International Journal of Remote Sensing 25(20), 4219-4236

White, K., J. Walden, N. Drake, F. Eckardt, J. Settle, 1997: Mapping the Iron Oxide Content of Dune Sands Namib Sea Namibia, using Landsat Thematic Mapper Data. Remote Sensing of Environment 62, 30-39

Κάκουλλος, Θ. Ν., 1972: Μαθήματα Θεωρίας Πιθανοτήτων. Αθήνα.

Σκιάνης, Γ. Αιμ., Βαϊόπουλος, Δ. και Νικολακόπουλος, Κ., 2004: Αξιολόγηση του Δείκτη βλάστησης TVI με τη συνδρομή της Θεωρίας Πιθανοτήτων. 10^ο Διεθνές Συνέδριο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας, Θεσσαλονίκη 15-17 Απριλίου 2004, Πρκ., 1338-1346.

Σκιάνης, Γ. Αιμ., Βαϊόπουλος, Δ., Νικολακόπουλος, Κ., 2004: Μελέτη της συμπεριφοράς του δείκτη βλάστησης SAVI με βάση τη θεωρία πιθανοτήτων. Πρκ. 7^{ου} Πανελληνίου Γεωγραφικού Συνεδρίου της Ελληνικής Γεωγραφικής Εταιρείας, Μυτιλήνη, Οκτώβριος 2004, τ. II, 291-298.