

Ν. Τζελέπης<sup>1</sup>, Β. Νάκος<sup>2</sup>

## Διερεύνηση Μεθόδων Αναπαράστασης της σκιάς του Αναγλύφου στους Χάρτες

### Περίληψη

Στην εργασία διατυπώνονται οι βασικές θεωρητικές αρχές του αναλυτικού προσδιορισμού της σκιάς του τοπογραφικού αναγλύφου με σκοπό την αναπαράστασή της σε ψηφιακούς χάρτες. Στη συνέχεια, εφαρμόζονται και συγκρίνονται αντιπροσωπευτικοί αλγόριθμοι αναλυτικού προσδιορισμού της σκιάς του αναγλύφου καθώς και αλγόριθμοι ολοκληρωμένων χαρτογραφικών πακέτων λογισμικού. Η απεικόνιση της σκιάς του αναγλύφου εξετάζεται σε συνδυασμό με τον υπόλοιπο συμβολισμό ενός ψηφιακού χάρτη. Τέλος, συνοψίζονται οι κυριότεροι παράμετροι (αλγόριθμος, κλίση και γωνία διεύθυνσης φωτεινής πηγής), ώστε η αναπαράσταση της σκιάς του αναγλύφου να είναι σε οπτική αρμονία με το σκοπό για τον οποίο γίνεται ο χάρτης.

### 1. Εισαγωγή

Η απεικόνιση του αναγλύφου μιας γεωγραφικής περιοχής είναι ένα βασικό πρόβλημα στη χαρτογραφική σχεδίαση. Τα κύρια χαρακτηριστικά του αναγλύφου, που είναι η τρισδιάστατη υπόστασή του και η συνέχεια, το κατατάσσουν θεωρητικά στην πιο δύσκολη κατηγορία χαρτογραφικών στοιχείων. Πρακτικά στην αναπαράστασή του, διαπιστώνεται και η ιδιομορφία του ως υπόβαθρο ενός χάρτη: απαιτούνται ποικίλες αλληλεπιδράσεις με τους συμβολισμούς των υπολοίπων πληροφοριών του χάρτη ώστε να παραχθεί τελικά μία ποιοτική και εύληπτη γραφική σύνθεση.

Οι δύο συνθετικές μέθοδοι αναπαράστασης του αναγλύφου είναι οι *ισοϋμείς καμπύλες* και η *χρωματική απόδοση διακριτών υψομετρικών ζωνών*. Με την πρώτη αποδίδεται με ακρίβεια η μορφολογία του αναγλύφου και ο συνεχής χαρακτήρας του. Ενώ με τη δεύτερη επιδιώκεται μία πιο φιλική προσέγγιση στο χρήστη του χάρτη, αφού στη χρωματική κλίμακα χρησιμοποιούνται αποχρώσεις του εδάφους ή του πυθμένα της θάλασσας ανάλογα με το υψόμετρο ή το βάθος αντίστοιχα (Νάκος και Τζελέπης, 1994). Βέβαια, η χρήση και καθιέρωση και των δύο αυτών μεθόδων έγινε δυνατή με τη βελτίωση των τεχνικών αποτύπωσης του χώρου και των δυνατοτήτων των μέσων απόδοσης.

Η *σκίαση του αναγλύφου (hill shading)* είναι μια πολύ παλιότερη μέθοδος που στην πρωταρχική της μορφή εφαρμόστηκε μέσω της γραφικής τεχνικής της γραμμοσκίασης. Βασίζεται στην προσπάθεια προσομοίωσης του φυσικού οπτικού αποτελέσματος της επίδρασης του φωτισμού στην επιφάνεια του αναγλύφου της απεικονιζόμενης περιοχής (Imhof, 1982). Με τη χρήση της μεθόδου αυτής επιδιώκεται η άμεση και εύληπτη αντίληψη των μορφολογικών σχηματισμών του αναγλύφου, ακόμα και σε μη ειδικευμένους με το αντικείμενο χρήστες χαρτών. Είναι ιδιαίτερα πλεονεκτική και αποτελεσματική όταν απαιτείται μία γρήγορη και εποπτική κατανόηση της τοπογραφίας της περιοχής ενώ έχει μεγαλύτερες δυνατότητες στην παράλληλη απεικόνιση με άλλες πληροφορίες, ακόμα και σε θεματικούς χάρτες καθολικής κάλυψης της περιοχής με επιφανειακούς συμβολισμούς. Ένας λόγος που φέρνει τη μέθοδο αυτή ξανά στο προσκήνιο είναι οι ευκολίες στη χαρτογραφική σχεδίαση και παραγωγή που παρέχουν οι νέες ψηφιακές τεχνολογίες, με κυριότερη τόν αντικειμενικό αναλυτικό υπολογισμό μίας εικόνας σκίασης του αναγλύφου μίας περιοχής.

Στην εργασία αυτή περιγράφονται αρχικά οι θεωρητικές αρχές της σκίασης, ξεκινώντας από τις σχέσεις της τρισδιάστατης γεωμετρίας και της οπτικής που περιγράφουν το πραγματικό, φυσικό φαινόμενο και οι απαραίτητες απλουστεύσεις για την αναπαράστασή της σε ψηφιακούς χάρτες. Μερικοί από τους αντιπροσωπευτικότερους αλγόριθμους αναλυτικού προσδιορισμού της σκιάς του αναγλύφου καθώς και αλγόριθμοι ολοκληρωμένων χαρτογραφικών πακέτων λογισμικού, εφαρμόζονται σε μία ενδεικτική περιοχή μελέτης και παρατίθενται μαζί με τις σχετικές παρατηρήσεις. Η απεικόνιση της σκιάς του αναγλύφου εξετάζεται επίσης σε συνδυασμό με άλλες πληροφορίες που απαιτούν συμβολισμούς διαφόρων τύπων και κατηγοριών σε μία σειρά ευρέως χρησιμοποιούμενων χαρτοσυνθέσεων. Εξετάζονται τέλος οι γενικότεροι (κλίση και γωνία διεύθυνσης φωτεινής πηγής) και ειδικότεροι παράμετροι των αλγόριθμων και η επίδρασή τους στο αποτέλεσμα της εικόνας σκίασης, και προκύπτουν τα αντίστοιχα συμπεράσματα για την αναπαράσταση της σκιάς του αναγλύφου ανάλογα με το σκοπό για τον οποίο γίνεται ο χάρτης.

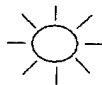
### 2. Βασικές αρχές απόδοσης της σκιάς του αναγλύφου

Οι σκίες που σχηματίζονται επάνω στην επιφάνεια του ανάγλυφου μίας περιοχής είναι τονικές παραλλαγές που οφείλονται στην επίδραση του φωτός (σχήμα 1). Το φως αντανακλάται επάνω στην επιφάνεια κατά ένα ποσοστό που ποικίλει, από μηδενική αντανάκλαση ως 100% (καθολική), ανάλογα με τη

1. Υποψήφιος Διδάκτορας ΕΜΠ

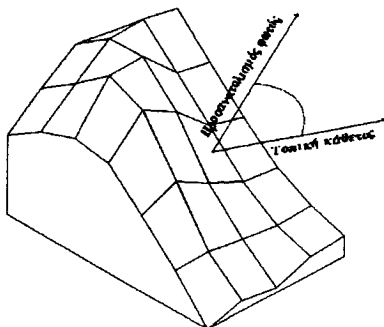
2. Λέκτορας ΕΜΠ

με τη γεωμετρική σχέση του προσανατολισμού της επιφάνειας και του προσανατολισμού του φωτός, αλλά και του μοντέλου φωτισμού που έχει υιοθετηθεί. Το τελικό καταγραφόμενο ποσοστό φωτεινότητας περιγράφεται από το μέγεθος της *φαινόμενης λαμπρότητας ή ανακλαστικότητα*  $R$  (Horn, 1982).



Πιο αναλυτικά λοιπόν, οι βασικές παράμετροι που καθορίζουν τη συμπεριφορά ενός αλγορίθμου-μοντέλου σκίασης είναι οι παρακάτω:

- Ο τοπικός προσανατολισμός της επιφάνειας.
- Ο προσανατολισμός της φωτεινής πηγής.
- Το μοντέλο φωτισμού.



Σχήμα 1. Αρχή δημιουργίας των σκιών λόγω αναγλύφου.

Ο τοπικός προσανατολισμός υλοποιείται με το διάνυσμα της τοπικής καθέτου και μπορεί να εκφραστεί με δύο τρόπους (Snyder, 1980). Με τον πρώτο τρόπο εκφράζεται μέσω των μερικών κλίσεων της επιφάνειας:  $p$  κατά το άξονα  $X$  με φορά από δύση προς ανατολή και:  $q$  κατά τον άξονα  $Y$  με φορά από νότο προς βορρά (σχήμα 2α). Με το δεύτερο τρόπο ο τοπικός προσανατολισμός εκφράζεται μέσω των γωνιών του διανύσματος προσανατολισμού της καθέτου, που είναι η γωνία αζιμουθίου:  $\varphi$  με αφετηρία το θετικό άξονα  $X$  και αριστερόστροφη φορά, και τη ζενίθια γωνία:  $\theta$  (σχήμα 2β). Είναι επίσης εύκολο να βρεθούν οι τιμές των μεγεθών του ενός ζεύγους από τις τιμές του άλλου. Στην τυποποίηση προτιμάται πάντως η χρήση των μερικών κλίσεων για διευκόλυνση των υπολογισμών (αποφεύγονται οι τριγωνομετρικοί αριθμοί).

Ο προσανατολισμός της φωτεινής πηγής εκφράζεται μέσω ενός αντίστοιχου ζεύγους τιμών και με έναν από τους δύο τρόπους προσανατολισμού που προσαναφέρθηκαν ( $\rho, \rho_0$  ή  $\varphi_0, \theta_0$ ).

Με τη διαφορά ότι εδώ πρόκειται για το διάνυσμα θέσης της φωτεινής πηγής μέσω του οποίου υλοποιείται ο προσανατολισμός της δέσμης των φωτεινών ακτινών (Horn, 1982).

Το μοντέλο φωτισμού είναι ένα σύνολο φυσικών ιδιοτήτων που αναφέρονται στο ίδιο το φως και στις φωτιζόμενες επιφάνειες, αλλά και οπτικών φαινομένων που μεσολαβούν μεταξύ της αρχικά εκπεμπόμενης και της τελικά καταγραφόμενης ποσότητας φωτός (Τζελέπης, 1994). Σε κάθε αλγόριθμο-μέθοδο σκίασης η υλοποίηση των παραπάνω παραγόντων γίνεται με τη βοήθεια αναλυτικών σχέσεων, οι οποίες παρέχουν τη δυνατότητα απλοποίησης του φυσικού προβλήματος.

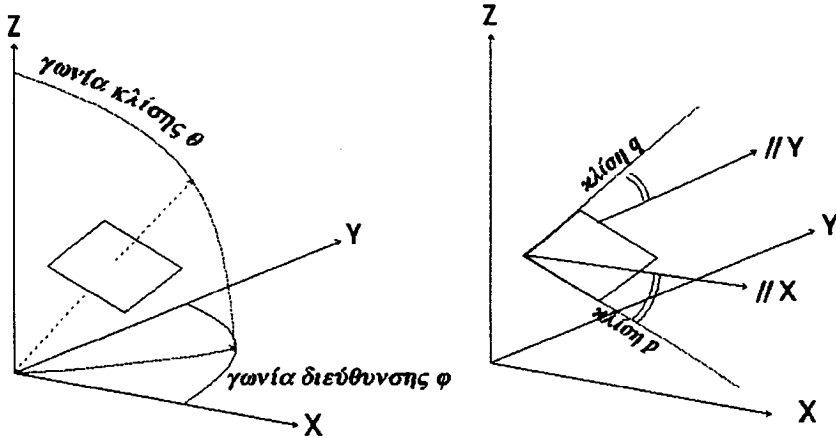
Από την πραγματική εικόνα σκίασης της επιφάνειας του αναγλύφου μιάς γεωγραφικής περιοχής μέχρι τη χαρτογραφική αναπαράστασή της, μεσολαβούν διάφορες απλουστευτικές συμβάσεις. Μια πρώτη βασική τέτοια σύμβαση αφορά τη φυσική γεωμετρία της σκίασης του αναγλύφου. Η πρακτικά άπειρη απόσταση στην οποία βρίσκεται η φωτεινή πηγή (ο ήλιος), επιτρέπει την παραδοχή ενός σταθερού προσανατολισμού για τις φωτεινές ακτίνες, ή αλλιώς μιά σταθερή γωνία πρόσπτωσης επάνω στην επιφάνεια του αναγλύφου. Γιά πρακτικούς όμως λόγους ερμηνείας της τελικής, τεχνητά παραγόμενης, εικόνας αγνοείται και ένα κλασικό γνώρισμα του φαινομένου της φυσικής σκίασης: οι σκιές-είδωλα που ρίχνουν μεγαλύτερα υψώματα της χαρτογραφούμενης περιοχής προς τις χαμηλότερες περιοχές που δεν έχουν ορατότητα προς το φως. Η μορφολογία του αναγλύφου στις περιοχές αυτές δεν θα απεικονιζόταν και η πληροφορία θα ήταν ελλιπής. Σκοπός άλλωστε στη χαρτογραφική αναπαράσταση του τοπογραφικού αναγλύφου δεν είναι η ακριβής προσομοίωση της εικόνας του αλλά η μεταδοτικότερη απόδοσή και κατανόησή του.

Η διαδικασία παραγωγής της εικόνας σκίασης μιάς περιοχής στα πλαίσια ενός σύγχρονου ψηφιακού περιβάλλοντος σχεδίασης, εστιάζεται σε δύο βασικά πράγματα: σε ένα διαθέσιμο υψομετρικό υπόβαθρο και σε ένα εργαλείο αναλυτικού υπολογισμού των τιμών των τόνων σκίασης. Ο πιο βολικός και συνθηθέστερος τρόπος οργάνωσης του υψομετρικού υποβάθρου είναι η δημιουργία διδιάστατου καννάβου που καλύπτει την περιοχή και που στις κορυφές του καταγράφεται η τιμή του υψομέτρου (Ψηφιακό Μοντέλο Υψομέτρων-ΨΜΥ). Ο υπολογισμός των τόνων σκίασης βασίζεται στην εφαρμογή ενός αλγορίθμου-μοντέλου σκίασης (καθορισμός φωτεινής πηγής, μοντέλο φωτισμού) και στο ζεύγος τιμών τοπικού προσανατολισμού ( $p, q$  ή  $\varphi, \theta$ ), που προκύπτει για κάθε σημείο του υψομετρικού καννάβου από τη συσχέτισή του με άλλα γειτονικά. Ο αντίστοιχος πίνακας τιμών σκίασης, δηλαδή ποσοστών ανακλαστικότητας του φωτός, συνήθως αποθηκεύεται σε κάποιο συμβατό τύπο αρχείου ψηφιακής εικόνας κλίμακας τόνων του γκρι (π.χ. TIFF 256 τόνων).

### 3. Αλγόριθμοι αναλυτικού προσδιορισμού της σκιάς του αναγλύφου

Οι διάφοροι αλγόριθμοι-μοντέλα σκίασης του αναγλύφου βασίζονται κυρίως σε θεωρητικές αρχές της οπτικής, οι οποίες περιγράφονται με τη βοήθεια σχέσεων τρισδιάστατης γεωμετρίας. Οι αρχικές εκφράσεις εμπλουτίζονται σταδιακά με πρόσθετες θεωρήσεις που οδηγούν σε νέες παραλλαγές με περισσότερες από τις δύο βασικές παραμέτρους (γωνίες προσανατολισμού). Ακόμα υπάρχουν εμπει-

ρικές, πρακτικές σχεδιαστικές τεχνικές, που γίνεται προσπάθεια να εκφραστούν με τη μορφή μοντέλου αξιοποιώντας αναλυτικές σχέσεις. Η έρευνα πάντως γενικά όσον αφορά τον αναλυτικό προσδιορισμό της σκίασης μιάς επιφάνειας παρουσίασε μιά εξαιρετικά μεγάλη πρόοδο στα πλαίσια του αντικειμένου των γραφικών σε περιβάλλον Η/Υ (Foley et al., 1992). Στη συνέχεια, παρουσιάζονται συνοπτικά τα βασικότερα χαρακτηριστικά των αλγορίθμων-μεθόδων που μελετήθηκαν.



Σχήμα 2. Τρόποι προσδιορισμού τοπικού προσανατολισμού μίας επιφάνειας.

### 3.1 Ιδανική αντανάκλαση-τμηματικά γραμμική προσέγγιση Peucker.

Οι περισσότεροι προτεινόμενοι αλγόριθμοι σκίασης του αναγλύφου για χαρτογραφικούς σκοπούς, υιοθετούν ένα μοντέλο φωτισμού που ανταποκρίνεται σε ιδεατές, ιδανικές επιφάνειες με ιδιότητες που έχουν ως αποτέλεσμα την τέλεια διάχυση του φωτός. Αυτό σημαίνει ότι οι θεωρούμενες επιφάνειες αντανακλούν όλο το φως που δέχονται και δείχνουν επομένως το ίδιο λαμπερές από όλες τις πιθανές διευθύνσεις παρατήρησης (σχήμα 3α). Η ποσότητα φωτός που συλλέγεται από ένα στοιχειώδες τμήμα της επιφάνειας εξαρτάται από την κλίση του σε σχέση με την προσπίπτουσα φωτεινή δέσμη. Συγκεκριμένα το ποσοστό του εμβαδού του στοιχείου που φαίνεται από τη φωτεινή πηγή -και άρα δέχεται και αντανακλά το φως- μειώνεται και σύμφωνα με την προοπτική γεωμετρία ισούται με το γινόμενο του πραγματικού εμβαδού με το συνημίτονο της προσπίπτουσας γωνίας  $i$ :

$$R = \cos i = \frac{1 + p_0 p + q_0 q}{\sqrt{1 + p^2 + q^2} \sqrt{1 + p_0^2 + q_0^2}}$$

Η γωνία αυτή ορίζεται επάνω στο στοιχειώδες τμήμα της επιφάνειας μεταξύ του διανύσματος της τοπικής καθέτου και του διανύσματος προσανατολισμού των φωτεινών ακτινών και το μέγεθος της ανακλαστικότητας είναι ανάλογο του συνημιτόνου της. Μιά τμηματικά γραμμική προσέγγιση της αρχικής σχέσης με δεδομένη την τοποθέτηση της φωτεινής πηγής στην καθιερωμένη βορειοδυτική διεύθυνση είναι η ακόλουθη (Horn, 1982):

$$R = 0.4285(p - q) - 0.0844|p + q| + 0.6599.$$

### 3.2 Ιδανική αντανάκλαση - προσαρμογή της θέσης της φωτεινής πηγής του Brassel.

Με τον αλγόριθμο αυτό επιχειρείται να δοθούν λύσεις στα προβλήματα που μπορεί να εμφανιστούν στην απόδοση της σκίασης με βάση την εξάρτηση της υπολογιζόμενης ανακλαστικότητας μόνο από τη γωνία πρόσπτωσης του φωτός (σχήμα 3β). Για παράδειγμα, είναι δυνατό να απεικονίζονται με τον ίδιο τόνο (ίδια προσπίπτουσα γωνία) ομαλές και απότομες περιοχές ή οι αντίθετες πλευρές σε μισγάγγειες και κορυφογραμμές που ο προσανατολισμός τους είναι παράλληλος με τη διεύθυνση των φωτεινών ακτινών (Brassel, 1973). Η αντίληψη τότε αυτών των διαφορετικών στην πραγματικότητα αλλά ίδιων στην απόδοση μορφολογικών σχηματισμών είναι αδύνατη. Μεθοδεύονται λοιπόν διορθώσεις, τόσο στην διεύθυνση όσο και στην κλίση της φωτεινής δέσμης. Η έκταση των προσθετικών αυτών διορθώσεων ( $\delta\theta$ ,  $\delta\phi$ ) καθορίζεται από τους συντελεστές:  $\alpha$  και  $\beta$ , αντίστοιχα για τις γωνίες προσανατολισμού:  $\theta$  και  $\phi$ :

$$\delta\theta = \alpha(\theta - \theta_0) \quad \text{και} \quad \delta\phi = \arcsin[(\beta/2)\sin 2(\phi - \phi_0)].$$

Τα διορθωμένα στοιχεία προσανατολισμού τελικά εφαρμόζονται στη αρχική, γενική σχέση της ιδανικής αντανάκλασης.

### 3.3 Μαθηματικό μοντέλο σκίασης.

Το μαθηματικό μοντέλο δεν βασίζεται σε συγκεκριμένο είδος φωτισμού αλλά με κριτήριο το τελικό αποτέλεσμα χρησιμοποιεί ένα λογικό συνδυασμό παραμέτρων για τον υπολογισμό της ανακλαστικότητας (Horn, 1982):

$$R = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{s' + \alpha}{\beta} \right),$$

όπου:  $s'$  είναι η κλίση της επιφάνειας επάνω στη διεύθυνση των φωτεινών ακτινών,  $\alpha$  και  $\beta$  παράμετροι που εκφράζουν αντίστοιχα το γκρίζο τόνο για τις οριζόντιες περιοχές και το ρυθμό μεταβολής των τόνων ως προς την κλίση (σχήμα 3γ).

### 3.4 Κατοπτρική αντανάκλαση - σχέσεις Bui-Tuong, Blinn.

Μία μεγάλη σειρά μοντέλων κατοπτρικής αντανάκλασης εφαρμόζεται σε ρεαλιστικές αποδόσεις και σε εφαρμογές σχεδίασης γραφικών εικόνων σε περιβάλλον H/Y. Η μέθοδος βασίζεται σε ένα υποθετικό-ιδανικό οπτικό φαινόμενο, όπου οι φωτεινές ακτίνες ανακλώνται στη φωτιζόμενη επιφάνεια και αντικατοπτρίζονται επάνω στον παρατηρητή (σχήμα 3δ). Έτσι, η θέση παρατήρησης αποκτά ενεργό ρόλο. Οι σχετικοί αλγόριθμοι πάντως αφήνουν περιθώρια επιλογής στο χρήστη για το ποσοστό συμμετοχής κατοπτρικής ( $\alpha$ ) ή ιδανικής αντανάκλασης ( $1-\alpha$ ) στο αποτέλεσμα (Horn, 1982):

$$R = [(1-\alpha) + \alpha P] \frac{\cos i}{\cos \frac{\theta_0}{2}},$$

όπου:  $P$  είναι η κατανομή λαμπρότητας της επιφάνειας εξαρτώμενη από την υψή της,  $i$  η γωνία πρόσπτωσης και  $\theta_0$  η γωνία κλίσης του φωτός.

### 3.5 Ανακλαστικότητα διαγράμμισης - μέθοδος κεκλιμένων καμπυλών Tanaka.

Μία επιφάνεια που καλύπτεται από παράλληλες διαδοχικές γραμμές πάχους:  $b$  και με ενδιάμεση απόσταση:  $w$ , έχει τιμή ανακλαστικότητας που εξαρτάται από τα μεγέθη αυτά καθώς και από τις αποχρώσεις των γραμμών και του μεταξύ τους χώρου στο χάρτη. Αν οι γραμμές είναι σχεδιασμένες με μαύρο χρώμα σε λευκό χαρτί, τότε η ανακλαστικότητα των γραμμών είναι μηδέν και του υπόλοιπου χώρου του χάρτη είναι 100 μονάδες. Η σχέση που προσδιορίζει την ανακλαστικότητα κάθε στοιχειώδους επιφάνειας του χάρτη είναι (Tanaka, 1930):

$$R = r_w - \frac{b}{w+b} (r_w - r_b),$$

όπου  $r_b$  η ανακλαστικότητα των γραμμών και  $r_w$  η ανακλαστικότητα του υπόλοιπου χώρου του χάρτη. Η αρχή αυτή εφαρμόζεται στην περίπτωση της κάλυψης της επιφάνειας του χάρτη από ισούψείς καμπύλες και έχει σαν αποτέλεσμα μία εικόνα σκίασης που δίνει ισοδύναμη τονική εντύπωση (σχήμα 3ε). Οι ισούψείς καμπύλες όμως είναι τομές οριζόντιων επιπέδων με την επιφάνεια του αναγλύφου και έτσι η πυκνότητα των γραμμών εξαρτάται μόνο από τη κλίση του εδάφους. Για να έχουμε μία διαβάθμιση ανακλαστικότητας που να εξαρτάται και από τη διεύθυνση της κλίσης του εδάφους, υποθέτουμε μία σειρά από διαδοχικές τομές της επιφάνειας με ισαπέχοντα κεκλιμένα επίπεδα, προσανατολισμένα κάθετα ως προς τις φωτεινές ακτίνες. Το μέγεθος της ισοδιάστασης  $d$ , το πάχος της γραμμής σχεδίασης της κομπύλης  $b$  και η κλίμακα του χάρτη  $k$  είναι μεταβλητά μεγέθη και καθορίζουν το τελικό αποτέλεσμα της ανακλαστικότητας κάθε στοιχειώδους επιφάνειας του ανάγλυφου (Tanaka, 1930):

$$R = r_w - \frac{b}{kd} (r_w - r_b) \sqrt{\frac{(p-p_0)^2 + (q-q_0)^2}{p_0^2 + q_0^2 + 1}}.$$

### 3.6 Μη ιδανική αντανάκλαση - μεταβαλλόμενη λαμπρότητα Wiechel.

Η συμπεριφορά μίας επιφάνειας στο φωτισμό με τα πρότυπα της ιδανικής αντανάκλασης είναι βέβαια εντελώς φανταστική. Στην πραγματικότητα η αντανάκλαση μεταβάλλεται και η επιφάνεια δεν φαίνεται το ίδιο λαμπερή από παντού (σχήμα 3στ). Πάνω σε αυτή τη λογική έχουν αναπτυχθεί διάφοροι αλγόριθμοι που εκτός της γωνίας πρόσπτωσης:  $i$  του φωτός έχουν αναμίξει και άλλες παραμέτρους. Η γωνία:  $e$  μεταξύ τοπικής καθέτου και διανύσματος θέσης του παρατηρητή είναι μία από αυτές (Horn, 1982). Βέβαια για χαρτογραφικούς λόγους η θέση του παρατηρητή οφείλει να είναι πάντα στο ναδίρ ώστε να έχουμε εποπτική, κατακόρυφη παρατήρηση του χάρτη, οπότε η γωνία αυτή ταυτίζεται τελικά με τη γωνία κλίσης της επιφάνειας:

$$R = \frac{\cos i \cos e}{\frac{1}{2}(1 + \cos e)}.$$

### 3.7 Μη ιδανική αντανάκλαση - αυτόματη σκίαση αναγλύφου του Marsik.

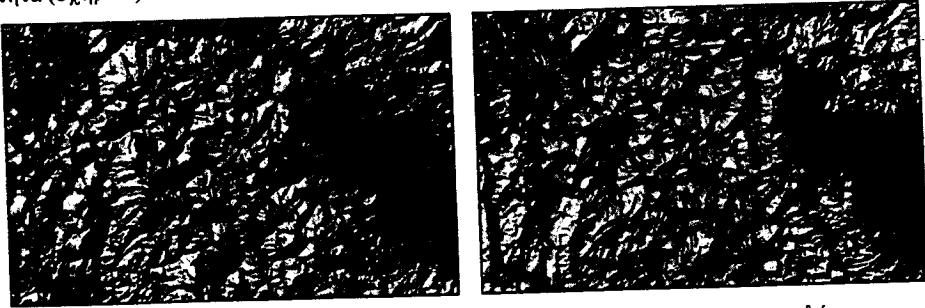
Άλλες προσεγγίσεις στη συμπεριφορά μιάς επιφάνειας που δεν αντανακλά ιδανικά το φως, μπορεί και να ξεφεύγουν εντελώς από τη βασική αυτή αρχή (της ιδανικής αντανάκλασης) και να στηριχθούν σε εντελώς διαφορετικές θεωρήσεις (σχήμα 3ζ). Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος αξιοποιεί τη σχέση ανακλαστικότητας και πυκνότητας εκτόπωσης, με την πυκνότητα να ισούται με το δεκαδικό λογάριθμο του αντιστρόφου της ανακλαστικότητας, και βασίζεται στον υπολογισμό της ανακλαστικότητας μέσω της κλίσης της επιφάνειας επάνω στη διεύθυνση φωτισμού (Horn, 1982):

$$R = 10^{\frac{\rho_0 \rho + q_0 q}{\sqrt{\rho_0^2 + q_0^2}}}$$

### 4. Διερεύνηση και σύγκριση αλγορίθμων

Η επίδραση του προσανατολισμού του υποθετικού φωτισμού και των άλλων ειδικότερων παραμέτρων που τυχόν διαθέτει κάθε μοντέλο-αλγόριθμος ποικίλουν ως προς το παραγόμενο τελικό αποτέλεσμα.

Η γωνία διεύθυνσης της υποθετικής φωτεινής δέσμης με την οποία αυτή προσπίπτει σε κάθε στοιχειώδη επιφάνεια του αναγλύφου επηρεάζει την ερμηνεία του από το χρήστη. Για παράδειγμα, ο τυπικός προσανατολισμός που χρησιμοποιείται σε χαρτογραφικές εφαρμογές έχει βορειο-δυτική κατεύθυνση. Με αυτόν τον προσανατολισμό ο χρήστης ερμηνεύει τις σκιές με τρόπο που οι κοιλότητες και οι κορυφογραμμές του αναγλύφου να αναγνωρίζονται σωστά. Αν αντιστρέψουμε τον προσανατολισμό του φωτισμού, δηλαδή γίνει νοτιο-ανατολικός, τότε η ερμηνεία αντιστρέφει την πραγματικότητα (σχήμα 4).



Σχήμα 4. Η επίδραση της μεταβολής του φωτισμού στην ερμηνεία του αναγλύφου.

Αποσκοπώντας στην ορθή ερμηνεία των μορφολογικών χαρακτηριστικών του αναγλύφου ο προσανατολισμός της υποθετικής φωτεινής δέσμης πρέπει να προσπίπτει από βόρειες έως δυτικές κατευθύνσεις. Εξετάζοντας την επίδραση που έχει ο προσανατολισμός της υποθετικής φωτεινής πηγής στο σχήμα 5, παρουσιάζονται οι σκιές του ίδιου αλγόριθμου με σχεδόν βόρειο (αριστερά), με βορειο-δυτικό (κέντρο) και σχεδόν δυτικό (δεξιά) προσανατολισμό.



Σχήμα 5. Η επίδραση της μεταβολής της διεύθυνσης φωτισμού.

Η σύγκριση των τριών αυτών εικόνων επιβεβαιώνει την εμπειρική διαπίστωση ότι ο άνθρωπος ερμηνεύει ορθότερα τους μορφολογικούς σχηματισμούς του αναγλύφου, όταν η σκιά δημιουργείται με βορειο-δυτικό φωτισμό (Imhof, 1982). Βέβαια, ο προσανατολισμός της υποθετικής φωτεινής πηγής πρέπει να ρυθμίζεται γύρω από βορειο-δυτική κατεύθυνση ανάλογα με τις ευρύτερες τάσεις που επικρατούν στις διευθύνσεις των ορεινών όγκων της χαρτογραφούμενης περιοχής.

Η κλίση της υποθετικής φωτεινής πηγής επηρεάζει το μέγεθος της σκιάς του αναγλύφου που σχηματίζεται επάνω στην επιφάνεια του χάρτη. Αυξάνοντας την κλίση μικραίνει το μέγεθος της παραγόμενης σκιάς. Στο σχήμα 6 παρουσιάζεται η επίδραση της κλίσης της υποθετικής φωτεινής πηγής στον ίδιο αλγόριθμο-μοντέλο για τρεις χαρακτηριστικές τιμές: 30°, 45° και 60° (αντίστοιχα: αριστερά, κέντρο και δεξιά). Παρατηρώντας τις τρεις εικόνες του σχήματος 6 επιβεβαιώνεται η μεταβολή της

έντασης της σκιάς του ανάγλυφου από σκούρες σε ανοικτές τιμές με άμεσο αποτέλεσμα να επηρεάζεται και η τονική εντύπωση της συνολικής εικόνας της σκιάς του αναγλύφου του χάρτη.



Σχήμα 6. Η επίδραση της κλίσης του φωτός.

Η τονική εντύπωση που δημιουργείται στο χρήστη του χάρτη ενέχει μία βασική αντινομία. Όσο πιο έντονη είναι η τονική εντύπωση που δημιουργείται με την παρουσίαση της σκιάς του αναγλύφου τόσο πιο σωστά και εύληπτα ο χρήστης ερμηνεύει τα μορφολογικά χαρακτηριστικά (για παράδειγμα, η σύγκριση των τριών εικόνων του σχήματος 6). Η έντονη όμως τονική διαβάθμιση γεμίζει το χώρο που καταλαμβάνει στο χάρτη με μεγάλη ποσότητα πληροφορίας, αυξάνει δηλαδή δραστικά την πυκνότητα πληροφορίας, με αποτέλεσμα να μην αφήνει περιθώρια για την εύληπτη απεικόνιση των υπόλοιπων πληροφοριών που πρέπει να απεικονίζει ο χάρτης.

Οι αλγόριθμοι που βασίζονται σε συνθήκες φωτισμού ιδανικής αντανάκλασης κατά κανόνα χρησιμοποιούνται στη χαρτογραφία και στα περισσότερα γνωστά πακέτα ψηφιακής χαρτογραφικής σχεδίασης (π.χ. Arc/Info, σχήμα 3η). Το αποτέλεσμα είναι ομοιόμορφο, συμπαγές και γενικά πολύ φιλικό στο χρήστη. Αντιπαράθετοτας αντίστοιχα παραδείγματα μοντέλων μη ιδανικής αντανάκλασης που είναι πιο κοντά στη φυσική πραγματικότητα, οι τόνοι γίνονται πιο σκληροί και η αντίθεση άσπρου-μαύρου μεγαλώνει. Με τα μοντέλα της κατοπτρικής αντανάκλασης είναι χαρακτηριστική η προσπάθεια εντυπωσιασμού του χρήστη, όπως άλλωστε συμβαίνει και στις ρεαλιστικές αναπαραστάσεις που αποδίδονται μέσω λογισμικών πακέτων γραφικών (computer graphics). Ιδιαίτερες χαρτογραφικές δυνατότητες όμως προσφέρουν οι ειδικότερες παράμετροι που υπάρχουν στα διάφορα μοντέλα. Όταν μάλιστα είναι πάνω από μία, τότε οι συνδυασμοί τους παρέχουν ευρύτερες συσχετίσεις και οι αλληλεπιδράσεις των αποτελεσμάτων είναι διαφορετικές, οπότε ο χαρτογράφος έχει μεγάλο περιθώριο να πειραματιστεί για να πετύχει την καλύτερη αναπαράσταση της σκίασης για την εφαρμογή του.

Στον πίνακα 1 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα χαρακτηριστικά των αλγορίθμων-μεθόδων που αναλύθηκαν σε σχέση με το μοντέλο, τις συνθήκες φωτισμού, τις παραμέτρους του φωτός και τις τυχόν ειδικές παραμέτρους που διαθέτει κάθε ένας από αυτούς.

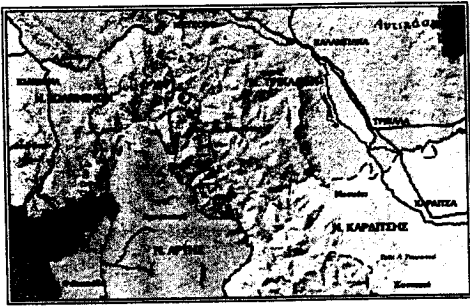
### 5. Η σκιά του ανάγλυφου σε χαρακτηριστικές χαρτογραφικές εφαρμογές

Για τη διερεύνηση εφαρμογών σκίασης σε κάποιες ενδεικτικές χαρτογραφικές εφαρμογές, χρησιμοποιήθηκε ένα ΨΜΥ, ανάλυσης 250μ. για μία περιοχή της νότιας Πίνδου. Η έκταση και η θέση της περιοχής επιλέχθηκε ώστε να προσφέρει πλούσιο ανάγλυφο και μορφολογικούς σχηματισμούς με ποικίλο προσανατολισμό.

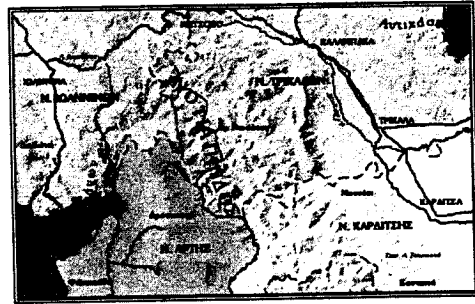
Ο χαρακτήρας των διαφόρων χαρτογραφικών εφαρμογών δεν καθορίζεται αποκλειστικά από το είδος των στοιχείων που απεικονίζονται αλλά και από τον τρόπο με τον οποίο απεικονίζονται, δηλαδή το συγκεκριμένο συμβολισμό που ακολουθείται (Νάκος και Φύλιππακοπούλου, 1993). Σημαντικό ρόλο παίζει το χρώμα τόσο ως προς την επιλογή όσο και ως προς τη λαμπρότητα του κάθε συμβόλου. Ο αλγόριθμος σκίασης του αναγλύφου που θα εφαρμοσθεί έρχεται σε αντιπαράθεση με τις παραπάνω συνιστώσες του χάρτη.

Τα υπόλοιπα απεικονιζόμενα στοιχεία του χάρτη (ονοματολογία, δίκτυα συγκοινωνιών, διοικητική διαίρεση, κλπ.) περιορίζουν την τονικότητα της εικόνας σκίασης. Μία πρώτη προσέγγιση γίνεται με την αύξηση της κλίσης της φωτεινής δέσμης με αποτέλεσμα και την αύξηση όλων των τόνων (σχήμα 7α). Πέρα από αυτό, μπορεί να γίνει η απεικόνιση μόνο των τόνων σκίασης των κλίσεων που δεν είναι ορατές από τη φωτεινή πηγή (σχήμα 7β). Σε έναν πολιτικό χάρτη για παράδειγμα, όπου εφαρμόζεται συνήθως ο επιφανειακός συμβολισμός της έκτασης των νομών με αρκετά απαλές αποχρώσεις, η παραπάνω απλούστευση τις αφήνει να φαίνονται ακόμη καλύτερα και καθαρότερα.

Σε ένα χάρτη με αποκλειστικό σκοπό την αναπαράσταση του αναγλύφου, η απεικόνισή του μπορεί να γίνει με προοδευτική συνεχή αλλαγή της απόχρωσης συναρτήσει του υψομέτρου και με ταυτόχρονη χρήση μιάς μεθόδου μη ιδανικής αντανάκλασης (σχήμα 8β). Η αντιπαράθεσή της με την υποθετική ιδανική αντανάκλαση στη σκιά του αναγλύφου (σχήμα 8α), κάνει άμεσα αντιληπτή τη διάθεση συμβιβασμού του χαρτογράφου, προκειμένου να πετύχει μια πιο συμβατή με το μέσο χρήστη απεικόνιση. Βέβαια, είναι εμφανής η πληρέστερη απεικόνιση των μορφολογικών σχηματισμών του αναγλύφου της πρώτης σε σχέση με τη δεύτερη μέθοδο.

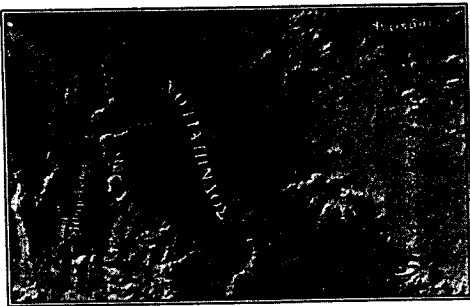


α. Σκίαση με ιδανική ανταν.-Arc/Info



β. Σκίαση με ιδαν. ανταν.-προς. φωτ. πηγής

Σχήμα 7. Εφαρμογή πολιτικού χάρτη



α. Σκίαση με ιδανική ανταν.-Arc/Info



β. Σκίαση με μη ιδαν. ανταν.-Wichel

Σχήμα 8. Εφαρμογή χάρτη αναγλύφου



α. Σκίαση με ιδανική ανταν.-Arc/Info



β. Σκίαση με καταπτηρική αντίσπαση

Σχήμα 9. Εφαρμογή χάρτη χρήσεων γης

Πίνακας 1. Συγκεντρωτική παρουσίαση χαρακτηριστικών αλγορίθμων σκίασης.

ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	ΜΟΝΤΕΛΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ	ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΦΩΤΙΣΜΟΥ	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΦΩΤΟΣ	ΕΙΔΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ
Τμηματικά γραμ. προσέγγιση Peucker	Θεωρία φωτισμού	Ιδανική αντανάκλαση	-	-
Προσαρμογή φωτεινής δέσμης Brassel	Θεωρία φωτισμού	Ιδανική αντανάκλαση	Διεύθυνση Κλίση	Συντελεστές προσαρμογών $\alpha, \beta$
Μαθηματικό μοντέλο σκίασης	Μαθηματική σχέση	-	Διεύθυνση	Τόνος οριζόντιας κλίσης $\alpha$ Ρυθμός αλλαγής τόνων-κλίσεων $\beta$
Σχέσεις Bui Tuong, Blinn	Θεωρία φωτισμού	Κατοπτρική αντανάκλαση	Διεύθυνση Κλίση	Κατανομή λαμπρότητας $P$ Συμπαγές φως $n$
Μέθοδος κεκλιμένων καμπυλών Tanaka	Ανακλαστικό-τητα διαγράμμισης	-	Διεύθυνση Κλίση	Πάχος γραμμής $b$ Κλίμακα $k$ Ισοδιάσταση $\delta$
Μεταβαλλόμενη λαμπρότητα Wiechel	Θεωρία φωτισμού	Μη ιδανική αντανάκλαση	Διεύθυνση Κλίση	-
Αυτόματη σκίαση αναγλύφου του Marsik	Θεωρία φωτισμού	Μη ιδανική αντανάκλαση	Διεύθυνση Κλίση	-

Σε ένα ιδιαίτερο χάρτη όπως αυτός της απεικόνισης των χρήσεων γης μιάς περιοχής, η πρώτη λύση είναι η αύξηση των τόνων με επέμβαση στη θέση της φωτεινής πηγής (σχήμα 9α). Επιπρόσθετα, η χρήση έντονων αποχρώσεων με μεγάλο κορεσμό δίνει το ερέθισμα για την εφαρμογή ενός αλγορίθμου κατοπτρικής αντανάκλασης. Το αποτέλεσμα αποδίδει τα έντονα χαρακτηριστικά της επιφάνειας του αναγλύφου (γυαλάδα) σε πλήρη οπτική αρμονία με τη χρωματική σύνθεση του χάρτη (σχήμα 9β).

## 6. Συμπεράσματα

Η αναπαράσταση του τοπογραφικού αναγλύφου με τη μέθοδο της σκίασης εμφανίζεται τα τελευταία χρόνια ξανά στη χαρτογραφική σχεδίαση, αφού έχουν ξεπεραστεί πιά τα προβλήματα της υποκειμενικότητας της απόδοσης και κυρίως της ευκολίας παραγωγής, με τη χρήση των ψηφιακών τεχνικών.

Κάτω από τις νέες αυτές συνθήκες, δίνεται στο χαρτογράφο η δυνατότητα να διερευνήσει σε βάθος τη μέθοδο της σκίασης εφαρμόζοντας διαφορετικά μοντέλα και συνθήκες φωτισμού. Οι ανάγκες της κάθε χαρτογραφικής εφαρμογής είναι βέβαια διαφορετικές και γι' αυτό το λόγο ο ένας και μοναδικός αλγόριθμος που τυχόν διατίθεται σε ένα χαρτογραφικό πακέτο, όσο καλός και αποδοτικός και αν είναι, είναι σίγουρα φτωχός σε σχέση με τις δυνατότητες που προσφέρει κάποιος άλλος καταλληλότερος για μιά συγκεκριμένη εφαρμογή. Οι νέες αυτές δυνατότητες αφορούν τόσο την οπτική αρμονία μεταξύ του επιφανειακού συμβολισμού της σκίασης με τους συμβολισμούς των υπολοίπων χαρτογραφικών στοιχείων, όσο και πιθανές εναλλακτικές λύσεις που θα βοηθήσουν στην απόδοση της συνολικής εικόνας του χάρτη, η οποία πρέπει να επιδιώκεται.

## 7. Ευχαριστίες

Ευχαριστούμε την εταιρεία Terra Ltd. για τη διάθεση του ΨΜΥ που χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση των εικόνων.

## Βιβλιογραφικές αναφορές

- Foley J. et al., 1992. "Illumination and shading", in Computer Graphics, Principles and Practice, Addison-Wesley, pp. 721-734.  
 Horn B.K.P., 1982. "Hill shading and the reflectance map", Geo-Processing Vol. 2, pp. 65-133.  
 Imhof E., 1982. "Cartographic Relief Presentation", ed. H.J. Steward, Walter de Gruyter, Berlin, pp. 113-126, 145-148, 159-212.  
 Νάκος Β., 1990. "Ψηφιακή απεικόνιση χαρτογραφικών δεδομένων βασισμένη στη θεωρία της κλασματικής γεωμετρίας", Διδακτορική διατριβή, Εργαστήριο Ανώτερης Γεωδαισίας Ε.Μ.Π., Αθήνα, σ. 1-8, 46-56, 85-111.



- Νάκος Β. και Τζελέπης Ν., 1994. "Η σκιά του αναγλύφου στους χάρτες", ΠΥΡΦΟΡΟΣ τευχ. 16, εκδ. Ε.Μ.Π., σ. 44-48.
- Νάκος Β. και Φιλιππακοπούλου Β., 1993. "Γενική Χαρτογραφία", Εργαστήριο Χαρτογραφίας Ε.Μ.Π., Αθήνα, σ. 16-50, 96-104, 159-179.
- Snyder M.W., 1980. "A comparison of four techniques for the calculation of slope and aspect from digital terrain matrices", M.Sc.Thesis, University of Illinois, pp. 1-56.
- Tanaka K., 1930. "The orthographical relief method of representing hill features on a topographical map", The Geographical Journal 79, pp. 232-233.
- Τζελέπης Νίκος, 1994. "Διερεύνηση μεθοδολογιών αναπαράστασης της σκίασης του τοπογραφικού αναγλύφου με ψηφιακές τεχνικές". Τμήμα Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών, Ε.Μ.Π., Διπλωματική εργασία, Αθήνα, σελ. 135.