

# Ανασκόπηση σύγχρονων αναλυτικών τεχνικών βελτιστοποίησης της σκίασης του ανάγλυφου

Αλεξάνδρα Λέλλη, Νίκος Τζελέπης, Βύρωνας Νάκος

Σχολή Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

**Περίληψη:** Πολλοί σύγχρονοι χαρτογράφοι ασχολούνται με τη βελτιστοποίηση της αναλυτικής σκίασης του ανάγλυφου, προτείνοντας μεθόδους που έχουν ως σκοπό να ενισχύσουν την απόδοση της ποικιλομορφίας της τοπογραφικής λεπτομέρειας των γεωμορφολογικών σχηματισμών, αλλά και να ενδυναμώσουν την εικόνα της πληροφορίας που απεικονίζεται. Στο άρθρο, αναλύονται τέσσερις σύγχρονες τεχνικές ενίσχυσης της τυπικής φωτοσκίασης, και ακολουθεί η μεταξύ τους σύγκριση καθώς και αξιολόγηση των στοιχείων που βελτιώνουν την απεικόνιση του ανάγλυφου. Οι τέσσερις τεχνικές σκίασης βασίζονται στην απόδοση προσανατολισμένων τόνων, στην αναπαράσταση της καμπυλότητας του ανάγλυφου, στο συνδυασμό πολλαπλών κατευθύνσεων φωτισμού και στον υπολογισμό δεικτών ορατότητας της επιφάνειας του ανάγλυφου σε πολλαπλές κατευθύνσεις.

## 1. Εισαγωγή

Η απόδοση του τοπογραφικού ανάγλυφου είναι ένα ερευνητικό θέμα που απασχολεί τους χαρτογράφους εδώ και εκατοντάδες χρόνια. Η μέθοδος με την οποία επιτυγχάνεται η πιο εύληπτη, χαρτογραφικά, οπτικοποίηση της τρίτης διάστασης του χώρου στο δισδιάστατο χάρτη, είναι η σκίαση του ανάγλυφου και η βασική τεχνική υλοποίησής της είναι η φωτοσκίαση. Η φωτοσκίαση βασίζεται στην αναπαράσταση μιας ιδεατής φωτεινής ακτινοβολίας που αντανακλάται στην επιφάνεια της απεικονιζόμενης περιοχής, και εξαρτάται από τον προσανατολισμό της φωτεινής δέσμης και από τον τοπικό προσανατολισμό της επιφάνειας, καθώς και από το μοντέλο συμπεριφοράς του ιδεατού φωτισμού που υιοθετείται.

Η φωτοσκίαση χρησιμοποιείται για την απόδοση του τρισδιάστατου χώρου, σε πίνακες ζωγραφικής, αλλά και σε χάρτες σχεδιασμένους από καλλιτέχνες, ήδη από την εποχή της Αναγέννησης (Horn, 1982). Εντούτοις άργησε να αναπτυχθεί ως τεχνική, εξαιτίας της έλλειψης μέσων αποτύπωσης και μεθόδων απόδοσης των συνεχών, γκριζών τόνων. Για το λόγο αυτό, δημιουργήθηκε η ανάγκη για την εξεύρεση μιας μεθόδου με την οποία το οπτικό αποτέλεσμα του τόνου σκίασης θα αποδίδεται με δυαδικά δομικά στοιχεία (δηλαδή, στοιχεία με άσπρο και μαύρο τόνο), μέθοδος που ονομάζεται γραμμοσκίαση. Ο Lehmann (1799) εισήγαγε για πρώτη φορά τη γραμμοσκίαση με χρήση γραμμών κλίσης, δηλαδή, γραμμών που αναπτύσσονται στη διεύθυνση της μέγιστης κλίσης (*vertical hachures*), ενώ έχουν πάχος ανάλογο το μέτρο της κλίσης του ανάγλυφου. Σε περιορισμένο βαθμό χρη-

σιμοποιήθηκε και μία μέθοδος γραμμοσκίασης με οριζόντιες γραμμές (*horizontal hachures*) που αναπτύσσονται κατά τη διεύθυνση μηδενικής κλίσης (Imhof, 1982). Επόμενο βήμα με τη μέθοδο δυαδικής απόδοσης, είναι η απόδοση τόνων του γκρι, καθώς η γραμμοσκίαση δεν αποδίδει με αρκετή λεπτομέρεια την τοπογραφία μιας επιφάνειας. Η αξιοποίηση τεχνικών απόδοσης τόνων για τη σκίαση του ανάγλυφου έγινε δυνατή ύστερα από την εφεύρεση της οθόνης απόδοσης τόνων (halftone screen) από τον Frederic Von Egloffstein το 1865 και της οθόνης απόδοσης τόνων με διασταυρούμενες γραμμές (crossline screen) από τον William A Lego 1869 (Horn, 1982).

Η αναλυτική φωτοσκίαση, που αποτελεί υπολογιστική μέθοδο για την απεικόνιση της σκίασης του ανάγλυφου, εισήχθη από τον Yoeli (1967), ο οποίος εφάρμοσε ένα μοντέλο φωτισμού ιδανικής, διάχυτης αντανάκλασης. Αυτή αποτέλεσε και την κύρια τεχνική σκίασης ανάγλυφου που χρησιμοποιείται σήμερα, και είναι ενσωματωμένη στα διάφορα λογισμικά πακέτα, ενώ, κατά παράδοση η φωτεινή πηγή τοποθετείται βορειοδυτικά της επιφάνειας προς σκίαση. Οι χαρτογράφοι, προκειμένου να βελτιστοποιήσουν και να ενισχύσουν την απόδοση του ανάγλυφου και να τονίσουν λεπτομέρειες των σχηματισμών που δεν αποκαλύπτονται, τείνουν να χρησιμοποιούν περισσότερες από μία ιδεατές φωτεινές πηγές. Ο Mark (1992) εισήγαγε την ιδέα της σύνθεσης τεσσάρων εικόνων σκίασης, που παράγονται με φωτισμό από αντίστοιχες βασικές κατευθύνσεις: τη βόρεια, τη βορειοδυτική, τη νότια και τη νοτιοδυτική διεύθυνση. Η εικόνα που προκύπτει με τη μεθοδολογία αυτή, προσομοιώνει το αποτέλεσμα του πραγματικού, διάχυτου φωτισμού που ο ήλιος προσδίδει στο περιβάλλον, έτσι ώστε το ποσό της ακτινοβολίας που λαμβάνει κάθε σημείο του ανάγλυφου να εξαρτάται μόνο από τον προσανατολισμό της κλίσης του. Μία άλλη μέθοδος ενίσχυσης βασίζεται στην αξιοποίηση της γεωμετρικής πληροφορίας της επιφάνειας του ανάγλυφου, που μπορεί να προκύψει με αναλυτική επεξεργασία από ένα Ψηφιακό Μοντέλο Υψομέτρων (ΨΜΥ). Η παραγόμενη αυτή πληροφορία μπορεί να είναι η κλίση της τοπογραφικής επιφάνειας (πρώτη παράγωγος) ή η καμπυλότητά της (δεύτερη παράγωγος), που αποτελούν συνεχείς περιγραφές της.

Σκοπός της εργασίας είναι η παρουσίαση τεσσάρων σύγχρονων τεχνικών βελτιστοποίησης της σκίασης του ανάγλυφου, οι οποίες ενισχύουν το οπτικό αποτέλεσμα της τυπικής φωτοσκίασης, παράγοντας είτε αυτόνομες εικόνες σκίασης, είτε βελτιωμένες εικόνες αναπαράστασης λεπτομερειών που ενσωματώνονται στην τυπική φωτοσκίαση. Οι τεχνικές αυτές σχετίζονται με τη χρήση προσανατολισμένων μοτίβων για την απόδοση των τόνων σκίασης, την αναλυτική επεξεργασία της υψομετρικής πληροφορίας και τη χρήση περισσότερων της μίας, ιδεατών φωτεινών πηγών. Για την πλήρη κατανόησή τους γίνεται περιγραφή του θεωρητικού πλαισίου, ενώ ακολουθεί κριτική συζήτηση σε σχέση με τα αποτελέσματα και τους σκοπούς που αυτά εξυπηρετούν και, τέλος, ακολουθούν τα συμπεράσματα της εργασίας.

## 2. Θεωρητικό πλαίσιο

### 2.1. Τυπική σκίαση ανάγλυφου

Η φωτοσκίαση, ως μέθοδος απόδοσης του τρισδιάστατου ανάγλυφου της φυσικής γήινης επιφάνειας σε δυσδιάστατο μέσο απεικόνισης, εφαρμόστηκε σε ευρεία κλίμακα χάρη στην ανάπτυξη της τεχνολογίας, στον τομέα των εκτυπώσεων και της αναπαραγωγής, και στο σύνολο της χαρτογραφικής παραγωγής, αρχικά με αναλογικά και κατόπιν με ψηφιακά μέσα. Βασίζεται στην απεικόνιση της ποσότητας φωτεινής ακτινοβολίας που αντανακλά κάθε σημείο της επιφάνειας του ανάγλυφου και εξαρτάται από το συνημίτονο της προσπίπτουσας γωνίας,  $\theta$ , μεταξύ της κατεύθυνσης της φωτεινής δέσμης και της κατεύθυνσης της τοπικής καθέτου. Η φωτεινή δέσμη αποτελείται από παράλληλες ακτίνες που προσπίπτουν στην επιφάνεια με την ίδια κατεύθυνση, γι' αυτό η φωτεινή πηγή θεωρείται ότι βρίσκεται σε πολύ μακρινή, πρακτικά άπειρη απόσταση. Το μοντέλο φωτισμού αφορά σε συμπεριφορά ιδανικής, διάχυτης αντανάκλασης της ακτινοβολίας, δηλαδή, αντανάκλασης της ίδιας ποσότητας ακτινοβολίας προς όλες τις κατευθύνσεις. Στην (1) παρατίθεται η σχέση υπολογισμού της τιμής φωτεινότητας ή φαινόμενης λαμπρότητας, BV (brightness value):

$$BV = 255 \cos(\theta), \quad (1)$$

όπου γίνεται και προσαρμογή των τιμών στο εύρος 0-255, για την απόδοση του αποτελέσματος με μονοχρωματική εικόνα 256 γκριζών τόνων.

Αναλυτικότερα, η τιμή φωτεινότητας τοπικά εξαρτάται από την κατακόρυφη κλίση και από τον οριζόντιο προσανατολισμό της επιφάνειας σύμφωνα με την (2):

$$BV = 255 \cos(I) \sin(S) \cos(A-D) + \sin(I) \cos(S), \quad (2)$$

όπου I, η γωνία κλίσης της φωτεινής δέσμης, S, η γωνία οριζόντιου προσανατολισμού της φωτεινής δέσμης, A, η γωνία του τοπικού οριζόντιου προσανατολισμού της επιφάνειας και D, η γωνία της τοπικής κλίσης της επιφάνειας.

Μια συνήθης θέση της υποθετικής φωτεινής πηγής είναι προς τα βορειοδυτικά της σκιαζόμενης επιφάνειας, και με κλίση  $45^\circ$  πάνω από τον ορίζοντα, καθώς ο φωτισμός από αυτή την κατεύθυνση έχει αποδειχθεί ότι διευκολύνει την ορθή και εύληπτη αντίληψη των ποικίλων σχηματισμών του τοπογραφικού ανάγλυφου. Παρ' όλα αυτά, κατά την επιλογή της διεύθυνσης φωτισμού πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι κυρίαρχες διευθύνσεις των κορυφογραμμών και κοιλάδων, ώστε να τοποθετείται η φωτεινή πηγή έτσι που ο φωτισμός να τις τέμνει διαγώνια (Imhof, 1982). Πρέπει να αναφερθεί, ότι στο μοντέλο εσκεμμένα δεν ενσωματώνεται μηχανισμός για την προσομοίωση των φυσικών, συμπαγών σκιών που μπορεί να δημιουργούνται από γειτονικούς μορφολογικούς σχηματισμούς, καθώς αυτές αποκρύπτουν ολοκληρωτικά την πληροφορία του ανάγλυφου.

## 2.2. Σκίαση ανάγλυφου με απόδοση προσανατολισμένων τόνων

Η σκίαση του ανάγλυφου είναι γενικά μια μέθοδος οπτικοποίησης με χρήση τόνων του γκρι που μοιάζουν να είναι συνεχείς, όμως, η υλοποίησή τους στις συσκευές απεικόνισης των υπολογιστικών συστημάτων γίνεται με τη χρήση δυαδικών μοτίβων, δηλαδή, μοτίβων που αποτελούνται από άσπρα και μαύρα εικονοστοιχεία, διατεταγμένα είτε με κάποια σειρά, είτε τυχαία. Η διάταξη των δομικών εικονοστοιχείων των μοτίβων είναι πυκνή και έτσι είναι δύσκολο αυτά να διακριθούν, ενώ, η μεταβολή της αναλογίας μαύρου-άσπρου οδηγεί στην οπτική αντίληψη των διαφορετικών τόνων του γκρι. Η τεχνική αυτή -που αποτελεί απόδοση χωρικών διακυμάνσεων- καλείται ψηφιακή απόδοση τόνων (digital halftoning).

Το 2002, ο Kennelly πρότεινε μια τεχνική σκίασης ανάγλυφου με απόδοση προσανατολισμένων τόνων, σύμφωνα με την οποία οι τόνοι σκίασης υλοποιούνται με προσανατολισμένα δυαδικά μοτίβα, που η διάταξη των εικονοστοιχείων τους επιλέγεται με βάση την οριζόντια γωνία τοπικού προσανατολισμού της επιφάνειας του ανάγλυφου. Αναλυτικά, η τεχνική που προτείνει ο Kennelly (2002), περιλαμβάνει:

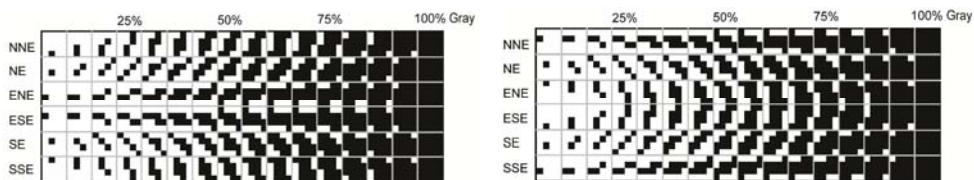
- την αναταξινόμηση των 256 τόνων σκίασης του γκρι σε 16 τάξεις ίσου εύρους, που αντιστοιχούν σε 16 τόνους του γκρι και που υλοποιούνται με 16 αντίστοιχα μοτίβα, διαφορετικά ως προς το πλήθος των μαύρων εικονοστοιχείων (1-16),
- την αναταξινόμηση του συνολικού εύρους των πιθανών οριζόντιων γωνιών προσανατολισμού,  $[0^\circ-359^\circ]$ , σε 12 τάξεις ίσου εύρους, και κατ' επέκταση σε 12 διαφορετικούς προσανατολισμούς της διάταξης των εικονοστοιχείων των μοτίβων, και
- τον τελικό προσανατολισμό των μοτίβων, είτε παράλληλα είτε κάθετα προς τη διεύθυνση του τοπικού προσανατολισμού του ανάγλυφου.

Από τις δύο προαναφερθείσες αναταξινομήσεις προκύπτουν 192 διαφορετικοί συνδυασμοί τόνων σκίασης και τοπικού προσανατολισμού, όπου ο κάθε ένας αναπαριστάται από ένα αρχείο δυαδικής εικόνας (bitmap), διαστάσεων  $4 \times 4$  pixels. Το πλήθος των μαύρων εικονοστοιχείων είναι ανάλογο του τόνου σκίασης, ενώ η διάταξη των εικονοστοιχείων εξαρτάται από τη διεύθυνση του προσανατολισμού. Οι προσανατολισμοί με διευθύνσεις ανατολικά-δυτικά και βόρεια-νότια δεν χρησιμοποιούνται, καθώς τα γραμμικά αυτά μοτίβα μπορούν να προκαλέσουν σύγχυση στην αντίληψη του αναγνώστη του χάρτη. Ακόμη, τα μοτίβα που αναπαριστούν αντίστροφους προσανατολισμούς, (π.χ. τα μοτίβα με διάταξη νοτιοανατολική και βορειοδυτική) απεικονίζονται πανομοιότυπα, με άμεση απόρροια την τελική αξιοποίηση 96 διαφορετικών δυαδικών εικόνων.

Από το ΨΜΥ της απεικονιζόμενης περιοχής, υπολογίζονται οι τόνοι σκίασης και οι κατευθύνσεις του προσανατολισμού, και στη συνέχεια κάθε σημείο του ΨΜΥ, αναλόγως με τις τιμές που το συνοδεύουν, αποδίδεται με την αντίστοιχη δυαδική εικόνα, η οποία προσανατολίζεται είτε παράλληλα, είτε κάθετα προς τον τοπικό

προσανατολισμό του ανάγλυφου. Επομένως, η τελική εικόνα σκίασης με προσανατολισμένους τόνους, δημιουργείται με την παράθεση των δυαδικών εικόνων που αντιστοιχούν στο σύνολο των σημείων του ΨΜΥ της επιφάνειας προς σκίαση, με το οπτικό αποτέλεσμα να προσδίδει υφή στην εικόνα σκίασης.

Στο Σχήμα 1, παρατίθενται οι δύο τρόποι υλοποίησης των 16 τόνων του γκρι με 6 διαφορετικά μοτίβα, με διάταξη προσανατολισμένη κατάλληλα ως προς τη διεύθυνση του προσανατολισμού. Συγκεκριμένα, στην αριστερή εικόνα του σχήματος η διάταξη των μοτίβων προσανατολίζεται παράλληλα με τη διεύθυνση του τοπικού προσανατολισμού και αυτό οδηγεί σε ένα οπτικό αποτέλεσμα παρόμοιο με αυτό της τεχνικής των κάθετων γραμμών κλίσης του Lehmann. Στη δεξιά εικόνα, η διάταξη των μοτίβων είναι προσανατολισμένη κάθετα ως προς τη διεύθυνση του τοπικού προσανατολισμού και το οπτικό αποτέλεσμα είναι παρόμοιας αίσθησης με αυτό της μεθόδου των οριζόντιων διαγραμμίσεων.



**Σχήμα 1.** Μοτίβα εικονοστοιχείων για απόδοση προσανατολισμένων τόνων με διάταξη παράλληλη και κάθετη ως προς τη διεύθυνση του προσανατολισμού (πηγή: Kennelly, 2002).

### 2.3. Ενίσχυση σκίασης με αναπαράσταση της καμπυλότητας του ανάγλυφου

Βασικά χαρακτηριστικά του τοπογραφικού ανάγλυφου, όπως η κλίση, ο προσανατολισμός και η καμπυλότητα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ποσοτικοποιηθεί το σχήμα και η δομή μιας τοπογραφικής επιφάνειας. Οι τιμές των μεγεθών αυτών σε ένα τυχαίο σημείο, προκύπτουν με την παραγωγή της συνάρτησης του υψομέτρου της επιφάνειας, όπως αυτή διαμορφώνεται με την προσαρμογή της στα υψομετρικά δεδομένα γύρω από το σημείο και εντός της περιοχής συγκεκριμένου «παραθύρου». Ο υπολογισμός των παραγώγων 1<sup>ης</sup> τάξης της συνάρτησης αφορά το μέγεθος της τοπικής μέγιστης κλίσης και τον προσανατολισμό της επιφάνειας του ανάγλυφου, και η χαρτογραφική αναπαράσταση των χαρακτηριστικών αυτών έχει αξιοποιηθεί για τη βελτίωση της σκίασής του, με την προσθήκη διακριτικών και ισχνών λεπτομερειών. Ο Kennelly (2008) πρότείνει μία τεχνική βελτιστοποίησης της σκίασης που βασίζεται στην αναπαράσταση των τιμών των παραγώγων 2<sup>ης</sup> τάξης της συνάρτησης της επιφάνειας και που αφορούν στην καμπυλότητα, με σκοπό τη λεπτομερή απόδοση των σχηματισμών του ανάγλυφου, αλλά έχοντας πάντα υπόψη και την αποτελεσματικότητα στην οπτική αντίληψή τους.

Η μελέτη της καμπυλότητας της επιφάνειας αφορά δύο βασικές, ορθογώνιες συνι-

στάσεις της, την κατακόρυφη (καμπυλότητα κατά τη διεύθυνση μέγιστης κλίσης) και την οριζοντιογραφική (καμπυλότητα κατά τη διεύθυνση μηδενικής κλίσης και κάθετα στη διεύθυνση μέγιστης κλίσης). Η οριζοντιογραφική καμπυλότητα υπολογίζεται κατά μήκος μιας ισοϋψούς καμπύλης και εκφράζει τη μεταβολή του προσανατολισμού της επιφάνειας, ενώ η κατακόρυφη καμπυλότητα υπολογίζεται κατά μήκος της μέγιστης κλίσης (υλοποιείται με την αντίστοιχη μισγάγγεια γραμμή) και εκφράζει τη μεταβολή στην κλίση. Με την αναπαράσταση της καμπυλότητας της επιφάνειας ενισχύεται η συνέχεια των σχημάτων των τοπογραφικών λεπτομερειών, ακόμη και στις πλευρές του ανάγλυφου που φωτίζονται έντονα. Συγκεκριμένα, με την οριζοντιογραφική καμπυλότητα ενισχύονται οι μισγάγγειες γραμμές, ανεξαρτήτως διεύθυνσης και ανεξάρτητα από τον αν είναι κοίλες-συγκλίνουσες ή κυρτές-αποκλίνουσες, ενώ με την κατακόρυφη καμπυλότητα τονίζονται οι, γεωλογικής προέλευσης, ανάγλυφες μορφές. Διευκρινίζεται ότι για την αναπαράσταση της καμπυλότητας χρησιμοποιείται μια κλίμακα γκριζών τόνων που αποκλίνει από μια κεντρική τιμή.

#### **2.4. Σκίαση με συνδυασμό διαφορετικών κατευθύνσεων φωτισμού**

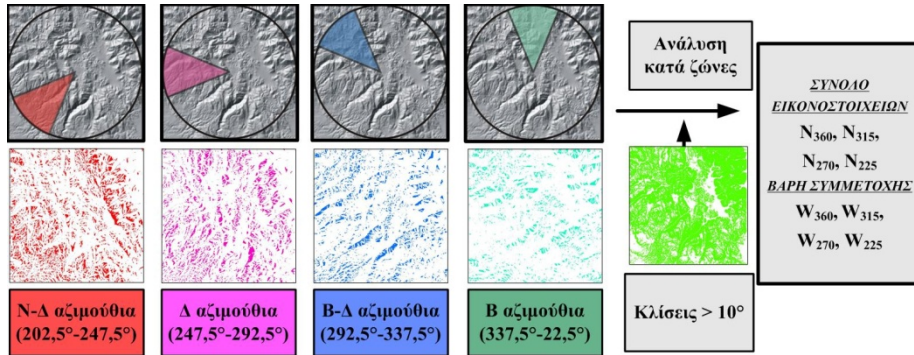
Λόγω της ποικιλομορφίας και της πολυπλοκότητας του τοπογραφικού ανάγλυφου, το αποτέλεσμα της σκίασής του από μία μόνο φωτεινή πηγή, δεν μπορεί να είναι αποτελεσματικό για το σύνολο των σχηματισμών της επιφάνειας που έχουν ποικίλες διευθύνσεις. Έτσι έχουν αναπτυχθεί αναλυτικές μέθοδοι που χρησιμοποιούν συνδυασμό πολλαπλών κατευθύνσεων φωτισμού, όπως η μέθοδος σταθμισμένου μέσου όρου των εικόνων σκίασης που παράγονται από βασικές κατευθύνσεις φωτισμού, που πρότεινε ο Mark (1992). Μια ανάλογη μέθοδος αναπτύχθηκε και από τους Loisios et al. (2007), με σκοπό να αντιμετωπίσει δύο σημαντικές αδυναμίες της τυπικής σκίασης:

- την ανεπαρκή αναπαράσταση του συνόλου των σχηματισμών του τοπογραφικού ανάγλυφου, εξαιτίας των πολλαπλών κυρίαρχων διευθύνσεων των ορεινών όγκων, και
- την εμφάνιση πολύ σκούρων τόνων που δυσκολεύουν την ανάδειξη μικρών μεταβολών στο ανάγλυφο ή και των τυχόν υπερτιθέμενων χαρτογραφικών συμβόλων.

Η μέθοδος υλοποιείται με μια διαδικασία τριών βημάτων. Κατά το πρώτο βήμα, υπολογίζεται μια αρχική εικόνα τυπικής φωτοσκίασης  $H_{initial}$  για την οποία επιλέγεται προσεκτικά η κατεύθυνση φωτισμού, είτε με επισκόπηση της επικρατούσας διεύθυνσης των μορφολογικών σχηματισμών του ανάγλυφου, είτε με στατιστική ανάλυση των προσανατολισμών που υπολογίζονται από το ΨΜΥ (οριζόντιες γωνίες και γωνίες κλίσης). Κατά το δεύτερο βήμα, υπολογίζονται τέσσερις εικόνες σκίασης με τέσσερις διαφορετικές, βασικές κατευθύνσεις φωτισμού: από τη βόρεια,  $H_{360}$ , από τη βορειοδυτική,  $H_{315}$ , από τη δυτική,  $H_{270}$ , και από τη νοτιοδυτική κατεύθυνση,  $H_{225}$ . Οι τέσσερις αυτές εικόνες συντίθενται σε μία εικόνα σκίασης

πολλαπλών κατευθύνσεων,  $H_{MD}$ , με εφαρμογή αντίστοιχων βαρών,  $W_{360}$ ,  $W_{315}$ ,  $W_{270}$ ,  $W_{225}$ , και με βάση την (3):

$$H_{MD} = W_{360}H_{360} + W_{315}H_{315} + W_{270}H_{270} + W_{225}H_{225} \quad (3)$$



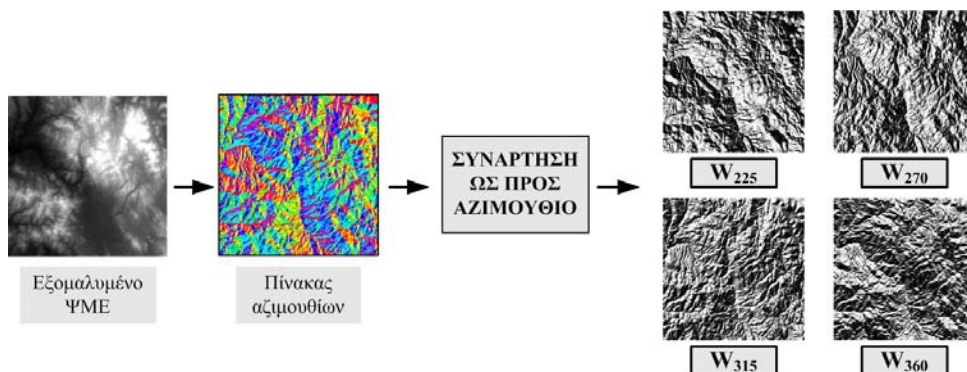
**Σχήμα 2.** Διαδικασία υπολογισμού καθολικών βαρών για τη σύνθεση τεσσάρων εικόνων σκίασης από βασικές κατευθύνσεις φωτισμού (πηγή: Τζελέπης κ.ά., 2008).

Η σύνθεση των εικόνων και ο υπολογισμός των βαρών μπορεί να γίνει με δύο τρόπους, ανάλογα με το επιδιωκόμενο επίπεδο λεπτομέρειας και ανάλυσης. Με τον πρώτο τρόπο υπολογίζεται ένα καθολικό, σταθερό βάρος για κάθε συνιστώσα εικόνα, το οποίο εξαρτάται από το ποσοστό της έκτασης των περιοχών που προσανατολίζονται κάθετα προς τη διεύθυνση φωτισμού της. Για την απαραίτητη ανάλυση των γωνιών προσανατολισμού, γίνεται η κατηγοριοποίησή τους σε αντιδιαμετρικές ομάδες εύρους  $45^\circ$ , με το καθολικό βάρος κάθε συνιστώσας εικόνας να προκύπτει ως το πηλίκο του πλήθους των σημείων του ΨΜΥ που οι προσανατολισμοί τους ικανοποιούν το παραπάνω κριτήριο, προς το σύνολο των σημείων του ΨΜΥ, ενώ παράλληλα εξαιρούνται τα σημεία του ΨΜΥ που αντιστοιχούν σε κλίσεις μικρότερες από ένα επιλεγμένο όριο (π.χ.  $10^\circ$ ) (Σχήμα 2). Με το δεύτερο τρόπο, η σύνθεση των τεσσάρων εικόνων βασικών κατευθύνσεων φωτισμού που παράγονται από την (1), εφαρμόζεται σε επίπεδο εικονοστοιχείου και υπολογίζονται τοπικά βάρη,  $w_{i=360,315,270,225}$ , ως συναρτήσεις της τοπικής γωνίας προσανατολισμού (aspect) του σχετικού σημείου του ΨΜΥ -χρησιμοποιώντας ένα επεξεργασμένο, εξομαλυσμένο ΨΜΥ (Σχήμα 3)- με βάση την (4):

$$w_i = [\cos(\text{aspect}-i)+1]/(2\Sigma w_i) \quad (4)$$

Βάσει της (4), για τα σημεία του ΨΜΥ που «βλέπουν» τη φωτεινή πηγή, τα αντίστοιχα εικονοστοιχεία σε κάθε συνιστώσα εικόνα σκίασης παίρνουν μεγαλύτερο βάρος κατά τη σύνθεσή τους για την παράγωγη της εικόνας της σκίασης με τις πολλαπλές κατευθύνσεις φωτισμού,  $H_{MD}$ .

Τέλος, με το τρίτο βήμα γίνεται πάλι σε επίπεδο εικονοστοιχείου, η συγχώνευση



**Σχήμα 3.** Διαδικασία υπολογισμού τοπικών βαρών για τη σύνθεση τεσσάρων εικόνων σκίασης από βασικές διευθύνσεις φωτισμού σε επίπεδο εικονοστοιχείου (πηγή: Τζελέπης κ.ά., 2008).

των δύο παραπάνω παραγόμενων εικόνων  $H_{initial}$  και  $H_{MD}$ , σε μια τελική, ενισχυμένη εικόνα σκίασης,  $H_{final}$ , σύμφωνα με την (5):

$$H_{final} = W_{in} H_{MD} + (1 - W_{in}) H_{initial}, \quad (5)$$

όπου  $W_{in} = \sin^2(i)$  και  $i$ , η τοπική γωνία πρόσπτωσης της φωτεινής ακτινοβολίας ως προς την τοπική κάθετο της επιφάνειας.

Σύμφωνα με την (5), όταν ο προσανατολισμός της επιφάνειας αποκλίνει από την κατεύθυνση φωτισμού της αρχικής φωτοσκίασης και η γωνία πρόσπτωσης τείνει στις  $90^\circ$ , οπότε ο τόνος της τυπικής φωτοσκίασης σκουραίνει, τότε το βάρος  $W_{in}$  τείνει στο 1 και η ενισχυμένη εικόνα σκίασης,  $H_{MD}$ , συνεισφέρει περισσότερο στην τελική εικόνα,  $H_{final}$ .

## 2.5. Ενίσχυση σκίασης ανάγλυφου με χρήση δεικτών ορατότητας σε πολλαπλές κατευθύνσεις

Η μέθοδος, αυτή, αναπτύχθηκε από τον Rodobnikar (2012), φιλοδοξώντας να πετύχει τρεις επιμέρους στόχους:

- την απεικόνιση των επίπεδων περιοχών με φωτεινότερους τόνους, σε σχέση με τις γειτονικές περιοχές,
- τον διακριτικό τονισμό των ορίων των ανάγλυφων μορφών, και
- την απόδοση του ανάγλυφου σε πολλαπλές κλίμακες ταυτόχρονα, με την οπτικοποίηση μορφολογικών χαρακτηριστικών από διαφορετικά επίπεδα λεπτομέρειας.

Πρόκειται για μια σύνθετη διαδικασία που χρησιμοποιεί μια σειρά παραμέτρων και εικόνων διαφορετικών οπτικών πανοραμάτων του ανάγλυφου της απεικονιζόμενης περιοχής, και με κατάλληλους συνδυασμούς τους παράγει εικόνες δεικτών



ορατότητας που προσομοιώνουν το οπτικό αποτέλεσμα της σκίασης. Αναλυτικά, η διαδικασία αποτελείται από τα παρακάτω πέντε βήματα:

- i) Υπολογισμός της μάσκας ορατότητας (visibility mask)  $VM_{\phi,\theta}$  της περιοχής για μια επιλεγμένη, σταθερή κατεύθυνση θέασης με γωνίες ύψους και προσανατολισμού,  $\theta$  και  $\phi$ , και εντός συγκεκριμένης ακτίνας,  $r$ . Πρακτικά, ελέγχεται η ορατότητα κάθε σημείου του ΨΜΥ υπό τη συγκεκριμένη κατεύθυνση, σε σχέση με το ανάγλυφο της περιοχής, εντός της επιλεγμένης ακτίνας  $r$ , και του αποδίδεται μια δυαδική τιμή, ανάλογα με το αν είναι ορατό (1) ή όχι (0). Υπολογίζονται δε χωριστές μάσκες ορατότητας για τη θέαση πάνω απ' τον ορίζοντα του σημείου, και για τη θέαση κάτω απ' τον ορίζοντα, υπό αρνητικής γωνίας ύψους,  $-\theta$ .
- ii) Επανάληψη του υπολογισμού της μάσκας ορατότητας για  $n$  πλήθος γωνιών προσανατολισμού με ισαποχή,  $\delta$  (δηλαδή:  $\phi = \{\delta, 2\delta, 3\delta, \dots, (n-1)\delta, 360-\delta\}$ ), αλλά και για άλλες επιλεγμένες γωνίες ύψους  $\theta$ , με αποτέλεσμα την παραγωγή πολυάριθμων μασκών ορατότητας  $VM_{\phi,\theta}$ .
- iii) Άθροιση όλων των μασκών ορατότητας,  $\Sigma_{\theta}(VM_{\phi})$ , ανά τις διάφορες επιλεγμένες γωνίες ύψους,  $\theta$ , έτσι ώστε να παραχθούν τα αρχεία:  $U_{\theta}$ , για τη θέαση από πάνω (upper view), όπου  $\theta > 0^{\circ}$ , και  $L_{\theta}$ , για τη θέαση από κάτω (lower view), όπου  $\theta < 0^{\circ}$ .
- iv) Υπολογισμός παράγωγων αρχείων συνδυασμών (ανά γωνία ύψους  $\theta$ ) που προσομοιώνουν την ψευδο-κλίση (quasi-slope):  $QS_{\theta} = U_{\theta} + L_{\theta}$ , και το σχετικό ή τοπικό ανάγλυφο (relative/local relief):  $RR_{\theta} = U_{\theta} - L_{\theta}$ .
- v) Σύνθεση των προηγούμενων υπολογισμένων αρχείων για τον υπολογισμό των εξής δεικτών ορατότητας πολλαπλών διευθύνσεων, MVI:  $MVI-U = \Sigma_{\theta}(U_{\theta})$ ,  $MVI-L = \Sigma_{\theta}(L_{\theta})$ ,  $MVI-QS = \Sigma_{\theta}(QS_{\theta})$ ,  $MVI-RR = \Sigma_{\theta}(RR_{\theta})$ , και MVI-x, ως αυθαίρετο συνδυασμό των  $U_{\theta}$  και  $L_{\theta}$  που αντιστοιχούν σε επιλεγμένες γωνίες ύψους,  $\theta$ .

Η επιλογή της τιμής της γωνίας ύψους  $\theta$ , διαμορφώνει το επίπεδο λεπτομέρειας της εικόνας σκίασης, καθώς επηρεάζει την ορατότητα των σημείων του ΨΜΥ, με αποτέλεσμα η μετέπειτα σύνθεση των αρχείων που αφορούν στους δείκτες ορατότητας, να παράγει εικόνες οπτικοποίησης του ανάγλυφου με λεπτομέρεια που ανταποκρίνεται σε πολλαπλές κλίμακες. Η ακτίνα ελέγχου για την ορατότητα,  $r$ , μπορεί να τείνει στο άπειρο κι έτσι η ορατότητα κάθε σημείου να ελέγχεται ως προς το σύνολο της περιοχής, με εμφανή την επιρροή των εξεχόντων μορφών του ανάγλυφου της. Οι παραπάνω προτεινόμενοι δείκτες ορατότητας, MVI, λόγω του ισοτροπικού τους χαρακτήρα δεν υπόκεινται στην επίδραση κάποιου συγκεκριμένου προσανατολισμού. Τέλος, ανάλογα με τη χαρτογραφική εφαρμογή, οι δείκτες αυτοί μπορούν να αποτελέσουν είτε μία συνολική και αυτοτελή οπτικοποίηση του ανάγλυφου, είτε να συνδυαστούν με μια μέθοδο φωτοσκίασης, με κατάλληλη βέβαια κανονικοποίηση των τιμών, προκειμένου να ενισχυθεί η λεπτομέρεια απεικόνισης των μορφολογικών σχηματισμών του ανάγλυφου.

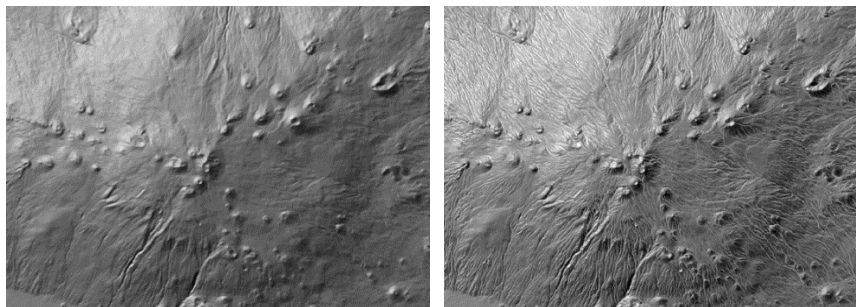
### 3. Συζήτηση

Οι τέσσερις μέθοδοι βελτιστοποίησης της σκίασης του ανάγλυφου που περιγράφονται, ενισχύουν την τυπική μέθοδο φωτοσκίασης με διάχυτη, ιδανική αντανάκλαση με πολλαπλούς τρόπους. Με τη μέθοδο απόδοσης προσανατολισμένων τόνων με χρήση μοτίβων μαύρων κουκκίδων σε άσπρο υπόβαθρο, γίνεται προσπάθεια να παραχθούν εικόνες παρόμοιες με μια γενικευμένη εικόνα τυπικής φωτοσκίασης - λόγω της χρήσης 16 τόνων του γκρι- (Σχήμα 4), όπου όμως ταυτόχρονα θα διακρίνεται και η πληροφορία του προσανατολισμού. Οδηγεί, όμως, σε διαφορεόμενα οπτικά αποτελέσματα, καθώς ανάλογα με την πυκνότητα των μαύρων εικονοστοιχείων διακρίνονται είτε τα μοτίβα, όπως σε περιοχές με μέτριους τόνους, είτε απλώς οι τόνοι του γκρι, όπως σε περιοχές ακραίων τόνων. Περιοχές με παρόμοιο προσανατολισμό που περιγράφονται με παρόμοια μοτίβα και που δεν ξεχωρίζουν οι αλλαγές τους -ενώ καταλαμβάνουν έτσι και μεγαλύτερη έκταση- αποδίδονται πιο αποτελεσματικά, ενώ, σε περιοχές με έντονες αλλαγές προσανατολισμού του ανάγλυφου, μπορεί να προκύψουν ακόμη και γραμμικά, οπτικά σφάλματα ασυνέχειας.

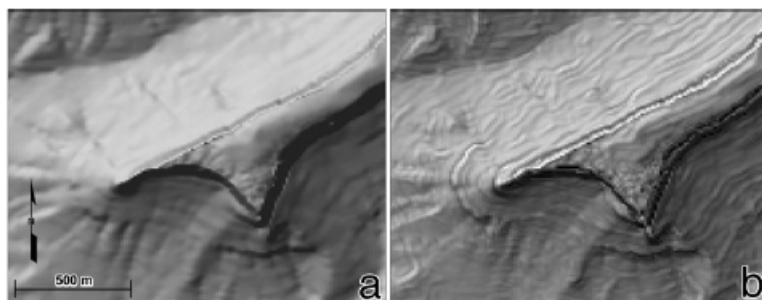


**Σχήμα 4.** Εικόνες σκίασης ανάγλυφου με απόδοση τόνων προσανατολισμένων παράλληλα και κάθετα ως προς την κατεύθυνση του τοπικού προσανατολισμού, και τυπική εικόνα φωτοσκίασης με ΒΔ φωτισμό και με χρήση 16 τόνων του γκρι (πηγή: Kennelly, 2002).

Στη μέθοδο ενίσχυσης με αναπαράσταση της καμπυλότητας, το αποτέλεσμα της οπτικοποίησης των τιμών της με κλίμακα τόνων του γκρι ομοιάζει με αυτό των φίλτρων ανίχνευσης ακμών κατά την ψηφιακή επεξεργασία εικόνας. Η αναπαράσταση της οριζοντιογραφικής καμπυλότητας, αναδεικνύει λεπτομέρειες με κυρτούς και κοίλους επιφανειακούς σχηματισμούς, αλλά και γραμμικούς ανεξαρτήτως διευθύνσεως, με την απόδοση του «σκελετού» της δομής του ανάγλυφου (Σχήμα 5). Με την αναπαράσταση της κατακόρυφης καμπυλότητας τονίζονται δομές διαφορετικού γεωλογικού χαρακτήρα, ακόμα και με μικρές αλλαγές στην κλίση (Σχήμα 6), επειδή δε, προσδίδονται τονικές διακυμάνσεις και στις μεταβολές κλίσης των ισοϋψών καμπυλών, η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στον έλεγχο της ποιότητας του ΨΜΥ.



**Σχήμα 5.** Εικόνα τυπικής φωτοσκίασης με ΒΔ φωτισμό και η ενίσχυσή της με αναπαράσταση της οριζοντιογραφικής καμπυλότητας (πηγή: Kennelly, 2008).

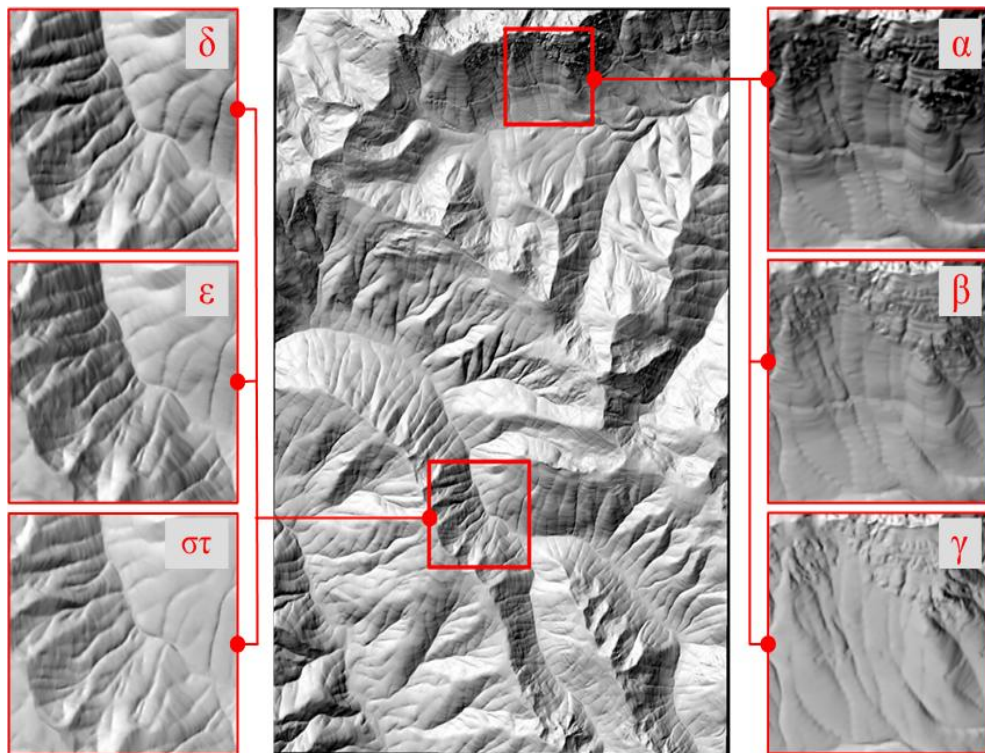


**Σχήμα 6.** Εικόνες ανάγλυφου με τυπική φωτοσκίαση με ΒΔ φωτισμό (a) και ενισχυμένης σκίασης με αναπαράσταση της κατακόρυφης καμπυλότητας (b) (πηγή: Kennelly, 2008).

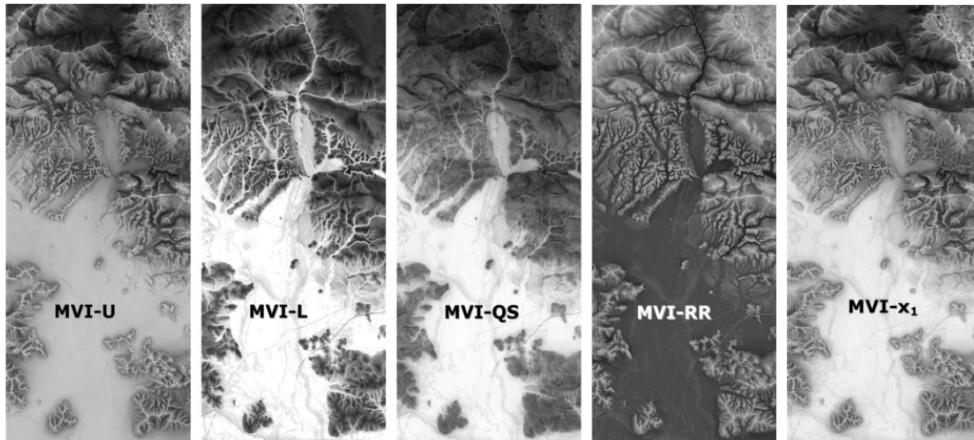
Η μέθοδος της σύνθεσης των εικόνων σκίασης από τέσσερις βασικές κατευθύνσεις φωτισμού, αναδεικνύει περισσότερους σχηματισμούς του ανάγλυφου και υλοποιείται μέσω αυτοματοποιημένης διαδικασίας που επιδιώκει το καλύτερο αποτέλεσμα για τη δεδομένη μορφολογία μιας τοπογραφικής επιφάνειας. Ανάλογα με τον τρόπο σύνθεσης και υπολογισμού των βαρών για τις συνιστώσες εικόνες, προκύπτουν ποιοτικώς διαφορετικά, οπτικά αποτελέσματα στη σύνθεσή τους, που μπορούν να εξυπηρετήσουν χαρτογραφικές εφαρμογές διαφορετικού σκοπού. Με τον υπολογισμό καθολικών βαρών προκύπτει μια γρήγορη και εποπτική εικόνα της μορφολογίας του ανάγλυφου, ενώ, με τον υπολογισμό τοπικών βαρών και τη σύνθεση σε επίπεδο εικονοστοιχείου, προκύπτει μια λεπτομερής και ευκρινής οπτικοποίησή του. Σημειώνεται πάντως ότι μερικές φορές η συνολική ενίσχυση του φωτισμού, επιφέρει αξιοσημείωτη μείωση της αντίθεσης στη τελική εικόνα (Σχήμα 7).

Η μέθοδος αναλυτικής σκίασης ανάγλυφου με χρήση δεικτών ορατότητας σε πολλαπλές διευθύνσεις, προσομοιώνει ως προς το οπτικό αποτέλεσμα την εφαρμογή μοντέλων που δίνουν μια «πλαστική» αίσθηση. Η μέθοδος αυτή, αξιοποιεί τη χρήση πολλαπλών κατευθύνσεων φωτισμού περιμετρικά της περιοχής του ΨΜΥ και υπό διαφορετικές γωνίες ύψους, όπου λαμβάνεται υπόψη ο παράγοντας της ορατό-

τητας του σημείου από τη φωτεινή πηγή σε σχέση με τους γειτονικούς μορφολογικούς σχηματισμούς εντός συγκεκριμένης ακτίνας ελέγχου. Καινοτομία της μεθόδου είναι η θεώρηση κατευθύνσεων με αρνητικές γωνίες ύψους (κάτω από τον ορίζοντα), με τις οποίες αποδίδεται αντίστροφα η μορφολογία του εδάφους και ενισχύονται τόσο οι κυρτοί, όσο και οι κοίλοι σχηματισμοί. Οι διαφορετικές τιμές της γωνίας ύψους των υπολογιζόμενων οπτικών πανοραμάτων, επηρεάζουν το επίπεδο της λεπτομέρειας που αποδίδεται στο ανάγλυφο. Συγκεκριμένα, μικρές γωνίες ύψους αναδεικνύουν μικρούς σχηματισμούς και λεπτομέρειες στις επίπεδες περιοχές, ενώ μεγαλύτερες γωνίες αναδεικνύουν περιοχές με πιο απότομες αλλαγές σε κλίση, δημιουργώντας μια οπτικοποίηση πολλαπλών κλιμάκων. Από τους υπολογιζόμενους δείκτες ορατότητας, η χρήση των δεικτών MVI-L και MVI-QS μπορεί να ενισχύσει με φωτεινότερους τόνους τις επίπεδες περιοχές και ο δείκτης MVI-RR ενισχύει με εκλεπτυσμένο τρόπο τις κορυφογραμμές και τις κοιλάδες του ανάγλυφου, ενώ ο παράγωγος δείκτης MVI-x μπορεί να χρησιμοποιηθεί ακόμη και ως αυτόνομη εικόνα σκίασης (Σχήμα 8).



**Σχήμα 7.** Εικόνα τυπικής φωτοσκίασης ανάγλυφου με ΒΔ φωτισμό (κέντρο) και μεγεθύνσεις λεπτομερειών (α,δ), με ενίσχυση πολλαπλού φωτισμού με καθολικά βάρη (β,ε) και με ενίσχυση από πολλαπλό φωτισμό με τοπικά βάρη (γ,στ) (πηγή: Τζελέπης κ.ά, 2008).



*Σχήμα 8. Εικόνες δεικτών ορατότητας πολλαπλών διευθύνσεων (πηγή: Podobnikar, 2012).*

#### **4. Συμπεράσματα**

Οι μέθοδοι που αναλύονται στην εργασία χρησιμοποιούνται για να βελτιστοποιηθεί η οπτικοποίηση του ανάγλυφου με την τυπική φωτοσκίαση, αυξάνοντας το επίπεδο της λεπτομέρειας στην απόδοσή του. Οι στόχοι που τίθενται σε κάθε μέθοδο ως προς το είδος των ενισχύσεων, συνδέονται με αδυναμίες της χρήσης μίας και μόνο, ιδεατής κατεύθυνσης φωτισμού.

Τα αποτελέσματα της αναπαράστασης της καμπυλότητας του ανάγλυφου και του υπολογισμού των δεικτών ορατότητας σε πολλαπλές κατευθύνσεις, είναι παρόμοια με αυτά των μεθόδων σκίασης με χρήση μοντέλου διάχυτου φωτισμού, όπου αναπαρίστανται λεπτομερώς και με ισοτροπικό χαρακτήρα όλοι οι γεωμορφολογικοί σχηματισμοί, ανεξαρτήτως προσανατολισμού και κυρτότητας. Η ενσωμάτωσή τους στην εικόνα της τυπικής φωτοσκίασης, που διαμορφώνεται βάσει της εξάρτησης της τιμής της φωτεινότητας από τον προσανατολισμό της επιφάνειας και αποτελεί μια ρεαλιστική, γνώριμη και οικεία απεικόνιση του ανάγλυφου για τον αναγνώστη του χάρτη, βελτιστοποιεί το οπτικό τους αποτέλεσμα.

Με την παραγωγή της σύνθετης εικόνας σκίασης από τέσσερις βασικές κατευθύνσεις φωτισμού, η υλοποίηση της οποίας βασίζεται σε ένα μίγμα φυσικής και αναλυτικής σκίασης με ανισοτροπική προσέγγιση ως προς τις διαφορετικές κατευθύνσεις φωτισμού, επιτυγχάνεται εξίσου ικανοποιητικά η ενίσχυση, ακόμα και μικρών, λεπτομερειών των σχηματισμών του ανάγλυφου. Μια πιο γενικευμένη, και μάλλον αναποτελεσματική οπτικοποίηση της μορφολογίας του ανάγλυφου προκύπτει με τη μέθοδο της απόδοσης προσανατολισμένων τόνων, καθώς η χρήση των αντίστοιχων μοτίβων υποβαθμίζει την απόδοση των λεπτομερειών των σχηματισμών και αυτό δυσχεραίνει την ερμηνεία και την αντίληψη του ανάγλυφου από τους αναγνώστες του χάρτη.

Οι σύγχρονες μέθοδοι αναλυτικής σκίασης του ανάγλυφου προσανατολίζονται στην ανάπτυξη τεχνικών που ενισχύουν τα αποτελέσματα των κλασικών μεθόδων σκίασης και προσδίδουν υψηλό επίπεδο λεπτομέρειας για το σύνολο των γεωμορφολογικών σχηματισμών. Βεβαίως κάτι τέτοιο θα πρέπει να γίνεται κατά τρόπο που να μη δημιουργείται οπτική σύγχυση, όταν υπερτεθούν στην εικόνα της σκίασης τα διάφορα χαρτογραφικά σύμβολα. Σημαντικό στοιχείο τέλος αποτελεί, η λογική της ανάπτυξης αυτοματοποιημένων μεθόδων που είτε παράγουν οπτικοποιήσεις ανεξαρτήτως της μορφολογίας του ανάγλυφου, είτε επιδέχονται παραμετροποίηση αναλόγως της χαρτογραφικής εφαρμογής και αναλόγως και των ιδιαιτεροτήτων της περιοχής.

## Βιβλιογραφία

- Horn, B. K. P., 1982. *Hill shading and the reflectance map*. Geo-Processing, 2: 65-144.
- Imhof, E., 1982. *Cartographic Relief Presentation* (H.J. Steward, H.J., editor). Walter de Gruyter, Berlin, 389 pp.
- Kennelly, P.J., 2002. *Hillshading with oriented halftones*. Cartographic Perspectives, 43: 25-42.
- Kennelly, P.J., 2008. *Terrain maps displaying hill-shading with curvature*. Geomorphology, 102: 567-577.
- Lehmann, J. G. (1799). *Description of a New Theory of Mountain Illustrations in Inclined Areas in Planimetric Maps or Situational Diagrams of Mountain Ranges*. (German, title transl.). Leipzig.
- Loisios, D., Tzelepis, N., and Nakos, B., 2007. *A methodology for creating analytical hill-shading by combining different lighting directions*. Proc. of 24<sup>th</sup> International Cartographic Conference, International Cartographic Association, Moscow.
- Mark, R., 1992. *Multidirectional, oblique-weighted, shaded-relief image of the Island of Hawaii*. U.S. Geological Survey.
- Peucker, T.K., Tichenor, M., and Rase, W.D., 1972. *The Automation of the Method of Inclined Contours* (German, title transl.). Kartographische Nachrichten, 22: 143-148.
- Podobnikar, T., 2012. *Multidirectional visibility index for analytical shading enhancement*. The Cartographic Journal, 49: 195-207.
- Yoeli, P., 1985. *Topographic relief depiction by hachures with computer and plotter*. Cartographic Journal, 22: 111-124.
- Yoeli, P., 1967. *The Mechanisation of Analytical Hill Shading*. Cartographic Journal, 4: 82-88.
- Τζελέπης, Ν., Λοΐσιος, Δ., και Νάκος, Β., 2008. *Μια μεθοδολογία για τη δημιουργία αναλυτικής σκίασης του ανάγλυφου με συνδυασμό διαφορετικών διευθύνσεων φωτισμού*. Πρακτ. 10<sup>ου</sup> Εθνικού Συνεδρίου Χαρτογραφίας, ΧΕΕΕ, Ιωάννινα, 539-49.