

ΑΠΟΚΛΙΣΕΙΣ ΜΕΤΑΞΥ ΜΕΘΟΔΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΩΝ ΚΛΙΣΕΩΝ ΚΑΙ Ο ΡΟΛΟΣ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΤΩΝ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΑΝΑΓΛΥΦΟΥ. ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ GIS

Φουμέλης Μ. και Βασιλάκης Εμμ.

Τομέας Δυναμικής Τεκτονικής Εφαρμοσμένης Γεωλογίας, Τμήμα Γεωλογίας, Πανεπιστήμιο Αθηνών, mfoutm@geol.uoa.gr, evasilak@geol.uoa.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία περιγράφονται και αναλύονται τρεις από τις βασικότερες και πιο συχνά χρησιμοποιούμενες μεθόδους εκτίμησης της κλίσης με ψηφιακό τρόπο, η μέθοδος 'd8' (Travis et al. 1975), η μέθοδος του Horn (1981) και εκείνη των Zevenbergen & Thorne (1987), παραλλαγές των οποίων έχουν αναφερθεί κατά καιρούς στη βιβλιογραφία. Ταυτόχρονα εξετάζεται η μέθοδος 'd-infinite' του Tarboton (1997), η οποία αποτελεί μία σύγχρονη προσέγγιση.

Προκειμένου να διερευνηθεί η χωρική κατανομή των αποκλίσεων μεταξύ των μεθόδων ακολούθησε στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων σε περιβάλλον GIS. Ποσοτικό μέτρο σύγκρισης αποτέλεσε ο δείκτης RMSEr (Root Mean Square Error) που εκφράζει το βαθμό διαφοροποίησης των μεθόδων καθώς και ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης r που αποδίδει με τη σειρά του το βαθμό αντιστοιχίας τους. Οι αποκλίσεις εντοπίστηκαν κυρίως σε περιοχές με έντονο ανάγλυφο, ενώ εντύπωση προκαλεί το γεγονός ότι κάθε μέθοδος υπερεκτιμά ή υποεκτιμά την κλίση σε καθορισμένα σημεία της μορφολογίας, π.χ. κατά μήκος των υδροκριτικών γραμμών, των ρεμάτων και γενικότερα κάθε είδους μορφολογικών ασυνεχειών.

Διερευνήθηκε επίσης η επίδραση της χωρικής ανάλυσης του DEM στις εκτιμώμενες τιμές κλίσης και κατά επέκταση των αποκλίσεων μεταξύ τους. Γενική υπήρξε η τάση υποεκτίμησης των κλίσεων με την ελάττωση της χωρικής ανάλυσης του χρησιμοποιούμενου DEM, ανεξαρτήτως της μεθόδου που χρησιμοποιείται, ενώ ταυτόχρονη υπήρξε η αύξηση των αποκλίσεων μεταξύ τους. Το παραπάνω γεγονός υπογραμμίζει την αναγκαιότητα επιλογής της κατάλληλης για κάθε εφαρμογή ανάλυσης.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Παρόλο που οι χάρτες κλίσεων αποτελούν σημαντικά προϊόντα των περισσότερων εφαρμογών που έχουν ως βάση τους ένα ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου (Digital Elevation Model – DEM), ιδιαίτερη βαρύτητα δίνεται συνήθως στη παραγωγή του προσομοιωμένου ανάγλυφου, υποτιμώντας το ρόλο της μεθόδου που ακολουθείται για την εκτίμηση της κλίσης. Ο όρος 'εκτίμηση' παραπέμπει στην αδυναμία υπολογισμού των πραγματικών κλίσεων σε περιοχές μεγάλης κλίμακας με τις συμβατικές μεθόδους συλλογής δεδομένων π.χ. σε υδρολογικές λεκάνες.

Το ενδιαφέρον για την ορθή εκτίμηση της κλίσης οφείλεται στο βασικό της ρόλο για το μετέπειτα υπολογισμό μιας σειράς παραμέτρων σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, όπως μορφοτεκτονικών (οριοθέτηση ρηξιγενών δομών, καθορισμός επιφανειών επιπέδωσης και κατά βάθος διάβρωσης), υδρολογικών (π.χ. προσομοίωση της επιφανειακής απορροής), περιβαλλοντικών (π.χ. μοντέλα εκτίμησης της διάβρωσης, αναγνώριση και διαχείριση επικινδυνότητας όπως κατολισθήσεις και πλημμύρες) καθώς και πιο σύνθετων, όπως η διόρθωση των ατμοσφαιρικών επιδράσεων και η τοπογραφική κανονικοποίηση των πολυφασματικών δορυφορικών εικόνων και η διερεύνηση της οικιστικής καταλληλότητας μιας περιοχής.

Η εφαρμογή των προαναφερθέντων μεθόδων έλαβε χώρα σε περιοχή της ΒΑ Πελοποννήσου, σε ένα σύνολο 11 υδρολογικών λεκανών διαφορετικής έκτασης, τάξης (Strahler, 1952) και βαθμού τραχύτητας αναγλύφου (Strahler, 1958), με σκοπό τη διερεύνηση τυχόν αποκλίσεων σε λεκάνες διαφορετικού σταδίου γεωμορφολογικής εξέλιξης.

2 ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ

Εξ ορισμού η τιμή της κλίσης σε οποιοδήποτε σημείο αποτελεί συνάρτηση της υψομετρικής του διαφοράς από κάποιο άλλο σημείο που βρίσκεται σε συγκεκριμένη απόσταση (βαθμίδα μεταβολής των υψομέτρων). Ουσιαστικά υπολογίζεται αρχικά τη βαθμίδα μεταβολής των υψομέτρων (σε m/m) και στη συνέχεια η τιμή της κλίσης (σε μοίρες) από το τόξο της εφαπτομένης.

Κάθε αλγόριθμος σαρώνει την υπό μελέτη περιοχή σταδιακά, υπολογίζοντας κάθε φορά το άνωσμα της κλίσης από τη μέγιστη ταπείνωση του αναγλύφου μεταξύ της κεντρικής ψηφίδας ενός παραθύρου 3x3 ψηφίδων και των οκτώ γειτονικών της (Σχ. 1). Ως σημεία αναφοράς για την μέτρηση των αποστάσεων λαμβάνονται τα κέντρα των ψηφίδων του DEM. Οι παραπάνω αποστάσεις βάση των οποίων εκτιμάται κάθε φορά το άνωσμα της κλίσης σχετίζονται με την ανάλυση του εκάστοτε πλέγματος υψομετρικών τιμών – DEM.

C ₁	C ₂	C ₃
C ₄	C ₅	C ₆
C ₇	C ₈	C ₉

Σχήμα 1. Αρίθμηση ψηφίδων στο παράθυρο 3x3.

Ο υπολογισμός μέρους ή του συνόλου των οκτώ περιφερειακών ψηφίδων, ο συνυπολογισμός ή όχι της κεντρικής ψηφίδας και η χρήση αυτούσιων των τιμών των υψομέτρων ή η προσομοίωση του τοπικού αναγλύφου στο 3x3 παράθυρο, αποτελούν στοιχειώδεις διαφορές των αλγορίθμων. Μέθοδοι που περιορίζονται σε τέσσερις ή και λιγότερες γειτονικές ψηφίδες, έχουν σαφώς χειρότερα αποτελέσματα συγκριτικά με εκείνες που χρησιμοποιούν το μέγιστο δυνατό αριθμό δεδομένων, καθώς δε λαμβάνουν υπ' όψιν τους το σύνολο της τοπικής διακύμανσης του αναγλύφου (Skidmore 1989, Jones 1998). Παρακάτω περιγράφονται επιγραμματικά οι εξεταζόμενες μέθοδοι καθώς και οι περιορισμοί που τις διέπουν:

I. Η μέθοδος d8 (ή αλλιώς Maximum Downward Gradient method - MDG ή Steepest Descent method) πρωτοαναφέρθηκε από τον Travis et al. (1975) και αποτελεί μια απλοϊκή μέθοδο υπολογισμού της κλίσης. Στη συγκεκριμένη μέθοδο υπολογίζεται η μέγιστη παρατηρούμενη ταπείνωση του αναγλύφου μεταξύ του κέντρου του υπό εξέταση σημείου και των οκτώ γειτονικών του, χρησιμοποιώντας αποκλειστικά τις σημειακές τιμές των υψομέτρων,

$$S \equiv \max [(c_5 - c_i) / l_c]$$

όπου S η μέγιστη παρατηρούμενη κλίση, c₅ το υψόμετρο της κεντρικής ψηφίδας, c_i το υψόμετρο σε κάποια γειτονική ψηφίδα, l_c, η απόσταση (m) μεταξύ των κέντρων των εγκάρσιων ψηφίδων και l_c*√2 (στον παρονομαστή) για διαγώνιες ψηφίδες.

Όπως φαίνεται και από την παραπάνω εξίσωση οι ψηφίδες εξετάζονται ανά ζεύγη, ενώ στην τελική καταχώρηση της μέγιστης κλίσης δε συμμετέχουν τα υπόλοιπα σημεία, των οποίων οι κλίσεις σε σχέση με τη κεντρική ψηφίδα ήταν μικρότερες. Μειονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου η εκτίμηση του ανύσματος της κλίσης αποκλειστικά σε μία από τις οκτώ προκαθορισμένες διευθύνσεις του παραθύρου 3x3 ψηφίδων.

Στις παρακάτω μεθόδους (II, III και IV) η κλίση υπολογίζεται συναρτήσει των επιμέρους κλίσεων στις διευθύνσεις των αξόνων (x - y) του ψηφιακού μοντέλου αναγλύφου,

$$S = \sqrt{S_x^2 + S_y^2}$$

όπου S_x και S_y οι βαθμίδες μεταβολής του υψόμετρου κατά μήκος της τετμημένης και τεταγμένης του DEM αντίστοιχα.

II. Τροποποίηση της μεθόδου των Fleming & Hoffer (1979), αποτελεί η εκείνη των Zevenbergen & Thorne (1987), βάση της οποίας θεωρείται μια επιφάνεια ελάχιστης καμπυλότητας που διέρχεται από τις εννέα ψηφίδες ενός παραθύρου 3x3 και ορίζεται από μια μερική πολυωνυμική συνάρτηση. Οι εννέα σταθερές της συνάρτησης μπορούν να υπολογιστούν από τα υψόμετρα του DEM

βάση των πολυωνύμων του Lagrange. Η κλίση κατά μήκος των αξόνων x και y δίνεται αντίστοιχα από τις εξισώσεις,

$$S_x = \frac{-C_4 + C_6}{2 dx} \quad \text{και} \quad S_y = \frac{C_2 - C_8}{2 dy}$$

Τονίζεται ότι το υψόμετρο της κεντρικής ψηφίδας δεν συνεκτιμάται στους υπολογισμούς.

III. Η μέθοδος του Horn (1981) αποτελεί τροποποίηση εκείνης των Sharpnack & Akin (1969). Για την προσομοίωση του ανάγλυφου χρησιμοποιεί διαφορετικούς συντελεστές βαρύτητας για κάθε ένα από τα οκτώ γειτονικά υψομετρικά σημεία και όχι κάποιο πολυώνυμο. Οι συντελεστές βαρύτητας είναι αντιστρόφως ανάλογοι του τετραγώνου της απόστασης από το κέντρο του παράθυρου 3x3 ψηφίδων. Ο υπολογισμός των βαθμίδων μεταβολής των υψομέτρων κατά μήκος των αξόνων του πλέγματος πραγματοποιείται βάσει των εξισώσεων,

$$S_x = (dz/dx) = ((c_1 + 2c_4 + c_7) - (c_3 + 2c_6 + c_9)) / (8 * dx)$$

$$S_y = (dz/dy) = ((c_1 + 2c_2 + c_3) - (c_7 + 2c_8 + c_9)) / (8 * dy)$$

όπου dx, dy η διαστάσεις των ψηφίδων τους πλέγματος κατά μήκος των αξόνων x και y αντίστοιχα και dz η υψομετρική διαφορά. Για τετράγωνα ψηφίδες dx = dy.

Ούτε εδώ δεν λαμβάνεται υπ' όψιν η τιμή υψομέτρου της κεντρικής ψηφίδας, ενώ παρατηρείται όπωσ και στην προηγούμενη μέθοδο κάποιο βαθμού εξομάλυνση των εκτιμώμενων κλίσεων λόγω της διαδικασίας προσομοίωσης του αναγλύφου .

IV. Στην προσπάθεια προσομοίωσης της επιφανειακής απορροής ο Tarboton (1997) έχοντας ως βάση τη μέθοδο του Travis et al. (1975), ανέπτυξε μια τεχνική εκτίμησης της κλίσης που καλείται 'd-infinite'. Πραγματοποιείται λοιπόν τριγωνισμός των κέντρων των ψηφίδων στο παράθυρο 3x3 και εκτιμάται η κλίση από τις υψομετρικές διαφορές στο εκάστοτε τρίγωνο. Ως κλίση καταχωρείται η μέγιστη παρατηρούμενη μεταβολή υψομέτρου στα οκτώ τρίγωνα (κάθε τρίγωνο περιέχει μια κορυφή που αντιστοιχεί το κέντρο του παράθυρου 3x3 ψηφίδων).

Με την τροποποίηση του Tarboton το άνωμα της κλίσης λαμβάνει όλες τις δυνατές τιμές (από 0 έως 2π), ξεπερνώντας έναν από τους βασικότερους περιορισμούς της μεθόδου του Travis et al. (1975). Οι βαθμίδες μεταβολής των υψομέτρων δίνονται από τις εξισώσεις,

$$S_x = (dz/dx) = (c_i - c_i') / dx \quad \text{και} \quad S_y = (dz/dy) = (c_5 - c_i) / dy$$

όπου c₅ το υψόμετρο της κεντρικής ψηφίδας, c_i και c_{i'} τα υψόμετρα στην εγκάρσια και στην διαγώνια ψηφίδα του εκάστοτε τριγώνου του παράθυρου 3x3 αντίστοιχα.

Για λόγους ευκολίας οι αναφορές στις μεθόδους θα πραγματοποιείται με συντομογραφίες. Έτσι η μέθοδος του Travis et al. (1975) θα αναφέρεται ως 'd8', του Horn (1981) απλά ως 'Horn', των Zevenbergen & Thorne (1987), ως 'Z&T' και τέλος η μέθοδος του Tarboton (1997) ως 'd-inf'.

3 ΠΟΣΟΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΚΛΙΣΕΩΝ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ

Ακολούθησε η εκτίμηση της κλίσης βάσει των προαναφερόμενων μεθόδων στις επιλεγμένες υδρολογικές λεκάνες. Προκειμένου να διερευνηθούν οι αποκλίσεις μεταξύ των μεθόδων ακολούθησε στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων σε περιβάλλον GIS. Η ανάλυση περιλάμβανε το σύνολο των υπό εξέταση λεκανών με αριθμό ψηφίδων που έφτανε το 1.108.198, στοιχείο που σε συνδυασμό με την ανάλυση του πλέγματος (20m) μεταφράζεται σε έκταση περίπου 443 km². Σκόπιμα διερευνήθηκε μια περιοχή μεγάλης έκτασης έτσι ώστε να συμπεριληφθούν όλοι οι δυνατοί τύποι μορφολογικών ενοτήτων.

Ποσοτικό μέτρο σύγκρισης των μεθόδων αποτέλεσε ο δείκτης RMSEr (Route Mean Square Error) που δίνεται από την εξίσωση,

$$RMSEr = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta S)^2}$$

όπου ΔS η διαφορά των απόλυτων τιμών των κλίσεων μεταξύ δύο μεθόδων (ανά ψηφίδα του πλέγματος) και n ο συνολικός αριθμός των ψηφίδων.

καθώς και ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης r (Ripley, 1981),

$$r = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sqrt{\left[n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right] \left[n \sum_{i=1}^n y_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2 \right]}} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

όπου x_i και y_i οι τιμές της κλίσης στις εξεταζόμενες ψηφίδες για τις επιμέρους μεθόδους, \bar{x} και \bar{y} οι μέσες τιμές κλίσης των επιλεγμένων μεθόδων αντίστοιχα.

Αμφότεροι οι στατιστικοί έλεγχοι εξετάζουν τις μεθόδους ανά ζεύγη λαμβάνοντας υπ' όψιν τις απόλυτες τιμές κλίσης κάθε επιμέρους ψηφίδας του πλέγματος. Ο μεν δείκτης RMSEr εκφράζει το βαθμό διαφοροποίησης των μεθόδων, με τις υψηλές τιμές να υποδηλώνουν ανομοιογένεια των αποτελεσμάτων. Ο δε συντελεστής γραμμικής συσχέτισης αποδίδει το βαθμό αντιστοιχίας των μεθόδων και λαμβάνει τιμές που κυμαίνονται από 0 έως 1, με τη μονάδα να δηλώνει την απόλυτη συσχέτιση. Για την αποπεράτωση των απαιτούμενων υπολογισμών αναπτύχθηκε στο περιβάλλον του ArcView 3.2 GIS κώδικας με σειρά εντολών της Avenue.

Πίνακας 1. Ποσοτικοποίηση των αποκλίσεων μεταξύ των εξεταζόμενων μεθόδων βάση του δείκτη RMSEr και το συντελεστή γραμμικής συσχέτισης (r) για το σύνολο των επιλεγμένων υδρολογικών λεκανών.

	RMSEr					r			
	d8	Horn	Z&T	d-inf		d8	Horn	Z&T	d-inf
d8	-				d8	-			
Horn	3,280	-			Horn	0,975	-		
Z&T	3,439	0,816	-		Z&T	0,972	0,988	-	
d-inf	0,542	3,224	3,452	-	d-inf	0,997	0,978	0,963	-

Όπως προκύπτει από την ανάλυση (Πιν. 2) οι αποκλίσεις που παρατηρούνται μεταξύ των επιμέρους μεθόδων είναι πλήρως συχετίσιμες με τις αρχές που τις διέπουν. Η ομαδοποίηση των μεθόδων είναι εμφανείς με τις μεθόδους Horn και Z&T να παρουσιάζουν σημαντικές ομοιότητες (χαμηλές τιμές του RMSEr και συνεπώς υψηλή συσχέτιση), ενώ ανάλογα αποτελέσματα παρουσιάζουν οι μέθοδοι d8 και d-inf.

Φαίνεται λοιπόν ότι ο αριθμός των ψηφίδων που λαμβάνεται τελικά υπ' όψιν κατά την εκτίμηση της κλίσης είναι από τους πιο κρίσιμους παράγοντες διαφοροποίησης των μεθόδων. Οι μαθηματικές αρχές βάσει των οποίων συνεκτιμάται το υψόμετρο των γειτονικών ψηφίδων διαδραματίζει ουσιαστικά δευτερεύοντα ρόλο. Με άλλα λόγια μέθοδοι που συνεκτιμούν την τοπική διακύμανση του αναγλύφου (Horn και Z&T), δηλαδή τα υψόμετρα του συνόλου των γειτονικών ψηφίδων του παράθυρου 3x3, παρέχουν συγκρίσιμα αποτελέσματα ανεξάρτητα με τον τρόπο που πραγματοποιείται η παραπάνω συνεκτίμηση. Αντίθετα μέθοδοι όπου το άνωμα της κλίσης δε προκύπτει από την προσομοίωση του αναγλύφου στο παράθυρο 3x3 (d8 και d-inf) παρουσιάζουν έντονη διαφοροποίηση

από τις προηγούμενες. Σε αντίστοιχα αποτελέσματα κατέληξαν και οι Zhang et al. (1999) και Jones (1998) συγκρίνοντας μερικές από τις παραπάνω μεθόδους.

Εκ πρώτης άποψης οι αποκλίσεις μεταξύ των μεθόδων δεν μπορεί να θεωρηθούν σημαντικές αφού οι συντελεστές γραμμικής συσχέτισης έχουν γενικά πολύ υψηλές τιμές. Τονίζεται ωστόσο ότι αμφότεροι οι έλεγχοι πραγματοποιούνται για το σύνολο των ψηφίδων και έτσι αν οι αποκλίσεις καταλαμβάνουν έστω και συγκεκριμένες μόνο θέσεις εντός των λεκανών θα συνεισφέρουν απλώς σε αύξηση του υπολογιζόμενου σφάλματος.

4 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΚΛΙΣΕΩΝ

Υπολογίστηκαν στατιστικά μεγέθη όπως η μέση τιμή, η τυπική απόκλιση και η μέγιστη τιμή κλίσης για τις επιλεγμένες υδρολογικές λεκάνες (Πιν. 2). Εντύπωση προκαλεί το γεγονός ότι παρά τις εν γένει διαφορές των μεθόδων, οι αποκλίσεις της μέσης τιμής της κλίσης στις υπό εξέταση λεκάνες ήταν αμελητέες (<1°). Μεγαλύτερες υπήρξαν οι διαφορές (έως και 5°) στις μέγιστες παρατηρούμενες τιμές κλίσης. Παρατηρήθηκαν επίσης διαφορές στις τυπικές αποκλίσεις (std.dev.) των μέσων τιμών, γεγονός που υποδηλώνει την ανομοιογένεια των εκτιμώμενων απόλυτων τιμών κλίσης αλλά και της κατανομής τους εντός των λεκανών, ακριβώς λόγω της φύσης κάθε μεθόδου.

Πίνακας 2. Στατιστικά μεγέθη των κλίσεων που εκτιμήθηκαν στις επιλεγμένες υδρολογικές λεκάνες (b1 έως b25) βάση των εξεταζόμενων μεθόδων.

ΤΑΞΗ		ΜΕΣΕΣ ΤΙΜΕΣ				ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΤΙΜΕΣ			
		d8	Horn	Z & T	d-inf	d8	Horn	Z & T	d-inf
b1	5	11,33	11,36	11,43	11,56	57,99	56,14	57,30	59,25
b8	4	9,25	9,32	9,37	9,45	43,53	40,12	40,92	44,49
b9	4	10,76	10,78	10,84	10,97	56,31	52,02	52,62	56,31
b11	4	13,77	13,85	13,91	14,04	65,56	63,40	64,01	65,56
b12	4	7,61	7,61	7,65	7,77	47,73	43,87	47,38	48,33
b14	4	13,96	14,05	14,14	14,25	45,00	41,32	42,10	46,23
b17	3	18,94	19,29	19,36	19,33	60,26	59,63	60,35	61,40
b18	3	18,57	18,67	18,76	18,94	62,24	57,76	59,85	63,02
b19	3	16,83	16,94	17,01	17,20	43,53	38,58	41,37	43,53
b20	5	20,60	20,81	20,89	21,02	69,68	66,25	68,01	69,88
b25	5	20,44	20,69	20,75	20,86	69,08	66,39	67,59	69,33
					[d-inf] > [Z&T] > [Horn] > [d8]				
					[d-inf] > [d8] > [Z&T] > [Horn]				

Παρατηρώντας προσεκτικά τον πίνακα 2 διακρίνουμε μια συστηματικότητα μεταξύ των παραπάνω στατιστικών μεγεθών. Συγκεκριμένα οι διαφορές μεταξύ των μεθόδων όσ' αναφορά τη μέση και τη μέγιστη παρατηρούμενη τιμή κλίσης υπήρξαν στη πλειοψηφία των περιπτώσεων σταθερές ανεξάρτητα από την έκταση, το ανάγλυφο και το στάδιο γεωμορφολογικής εξέλιξης των υδρολογικών λεκανών. Για το σύνολο των λεκανών, υψηλότερες τιμές μέσης κλίσης εμφανίζει η μέθοδος d-inf και ακολουθούν με φθίνουσα σειρά η Z&T, η Horn και τέλος η d8 ([d-inf]>[Z&T]>[Horn]>[d8]). Αντίστοιχα για τις μέγιστες τιμές κλίσης η μέθοδος d-inf εξακολουθεί να παρουσιάζει τις υψηλότερες τιμές όμως στη συνέχεια η σειρά διαφοροποιείται με την d8 να ακολουθεί και τις Z&T και Horn να έχουν τις χαμηλότερες τιμές μέγιστης κλίσης στις λεκάνες ([d-inf]>[d8]>[Z&T]>[Horn]).

Χαρακτηριστικό είναι το γεγονός ότι παρά τη σταθερά υψηλή τιμή μέγιστης παρατηρούμενης κλίσης για τη μέθοδο d8, η συγκεκριμένη μέθοδος διατηρεί τη χαμηλότερη μέση τιμή κλίσης στο σύνολο των λεκανών. Κατά συνέπεια η υπερεκτίμηση των κλίσεων από τη μέθοδο, λαμβάνει χώρα

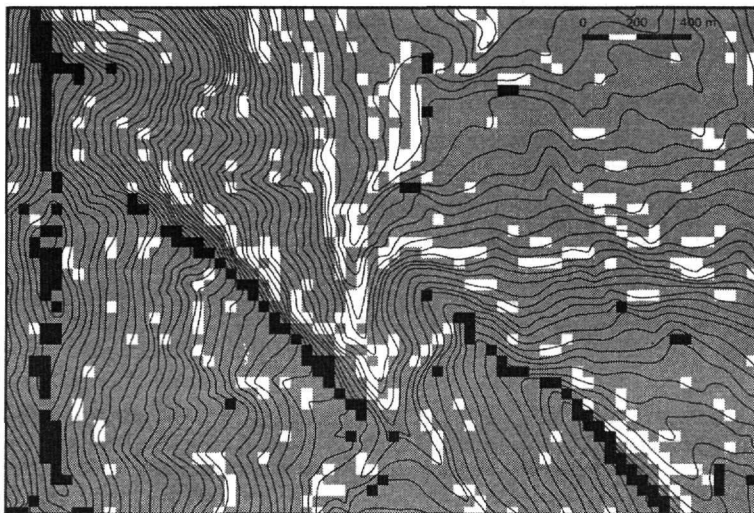
Πίνακας 3. Αποκλίσεις στο σύνολο των ψηφίδων μεταξύ των μεθόδων d8 και Horn στην ευρύτερη περιοχή μελέτης.

ΕΥΡΟΣ ΑΠΟΚΛΙΣΕΩΝ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΨΗΦΙΔΩΝ	%
< 1	863015	44,79
1 - 2	464326	24,09
2 - 5	405917	21,06
5 - 10	154446	8,01
10 - 15	30319	1,57
15 - 20	6788	0,35
20 - 25	1688	0,09
25 - 30	460	0,02
> 30	240	0,01
ΣΥΝΟΛΟ	1927199	100

περίπτωση διερευνήθηκαν οι διαφορές των μεθόδων για κάθε επιμέρους ψηφίδα του DEM. Ενδεικτικά αναφέρονται τα αποτελέσματα κατά τη σύγκριση των μεθόδων d8 και Horn. Οι παρατηρούμενες αποκλίσεις ξεπέρασαν σε ορισμένες περιπτώσεις τις 40°, με το 2% περίπου των ψηφίδων στο το σύνολο των λεκανών να εμφανίζουν διαφορές άνω των 10° και το 90% μικρότερες των 5°. Παρ' όλα αυτά τέτοιες διαφορές είναι ικανές να εισάγουν σημαντικό σφάλμα σε πολλές εφαρμογές, αν και εφόσον η κατανομή τους λαμβάνει χώρα σε πολύ συγκεκριμένες μορφολογικές δομές και δεν είναι ομοιόμορφα κατανεμημένες εντός της εκάστοτε περιοχή μελέτης.

5 ΧΩΡΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΑΠΟΚΛΙΣΕΩΝ

Το ουσιαστικότερο πλεονέκτημα των GIS είναι η δυνατότητα χωρικής απεικόνισης των περιοχών εκείνων όπου παρατηρούνται αποκλίσεις. Ταυτόχρονα γίνεται με σχετική ευκολία η διάκριση τυχόν συστηματικότητας των υφιστάμενων αποκλίσεων σε σχέση με τις μορφολογικές δομές.



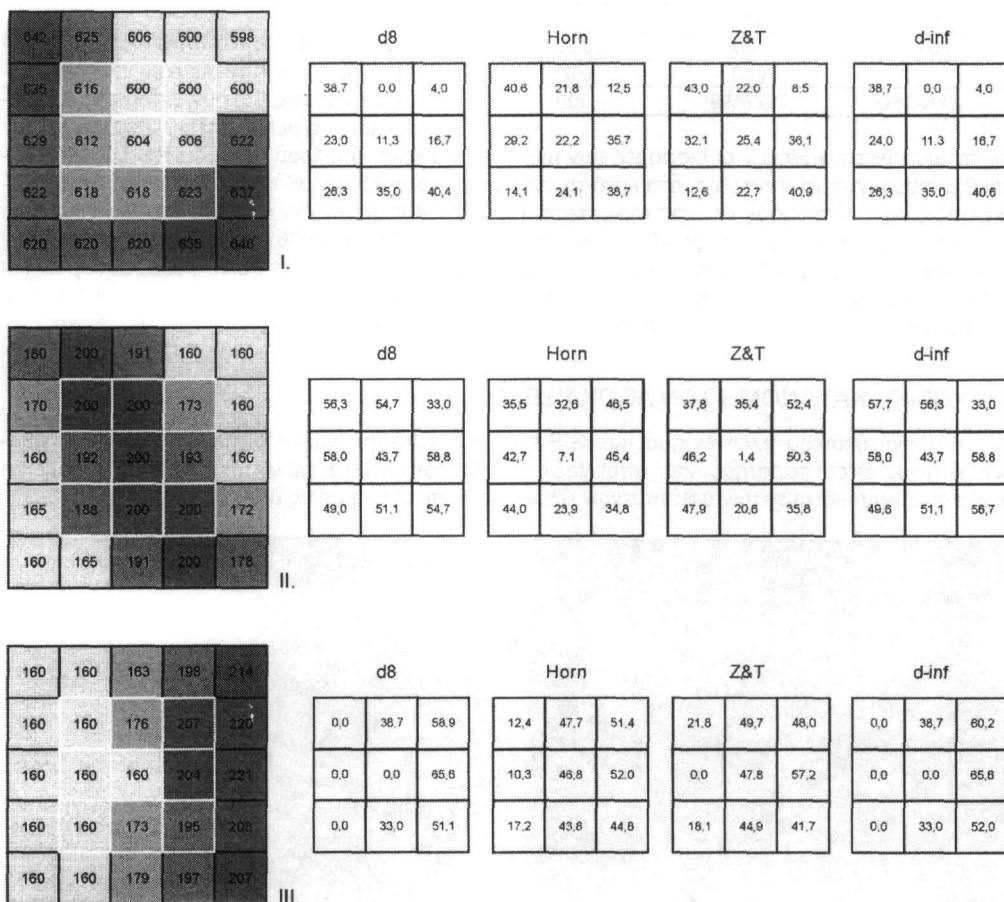
Σχήμα 2. Χωρική κατανομή των αποκλίσεων μεταξύ των μεθόδων d8 και Horn. Οι μαύρες και λευκές ψηφίδες απεικονίζουν την υπερεκτίμηση των τιμών των κλίσεων από τις μεθόδους d8 και Horn αντίστοιχα.

Όπως ήταν αναμενόμενο οι διαφορές εντοπίζονται κυρίως σε περιοχές με έντονες διακυμάνσεις της μορφολογίας και συγκεκριμένα κατά μήκος των υδροκριτικών γραμμών, ρεμάτων και γενικότερα σε κάθε είδους μορφολογικής ασυνέχειας. Παλαιότερες μελέτες αναφέρουν επίσης τη διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων μεταξύ των αλγόριθμων εκτίμησης της κλίσης σε περιοχές με έντονο ανάγλυφο (Jones 1998, Zhang et al. 1999).

σε συγκεκριμένες περιοχές των λεκανών και όχι σε όλη την έκτασή τους. Η περίπτωση να υπάρχουν αποκλίσεις σε ευρύτερες περιοχές είναι αμφίβολη καθώς θα αναμενόταν αύξηση της διαφοράς των μέσων τιμών κλίσης. Αποκλίσεις επομένως μεταξύ των μεθόδων υφίστανται ακόμα και αν δεν εκφράζονται με σαφήνεια στις μέγιστες και ιδιαίτερα στις μέσες τιμές κλίσης των λεκανών, γεγονός που οφείλεται πιθανόν στον τοπικό χαρακτήρα των αποκλίσεων.

Στη συνέχεια εξετάστηκε λεπτομερέστερα το εύρος των αποκλίσεων και το ποσοστό που καταλαμβάνουν εντός της ευρύτερης περιοχής μελέτης (Πιν. 3). Σε αυτή την

Ωστόσο, προκαλεί εντύπωση το γεγονός ότι κάθε μέθοδος υπερεκτιμά ή υποεκτιμά την κλίση σε καθορισμένα σημεία της μορφολογίας, όπως για παράδειγμα στα ανώτερα ή τα κατώτερα τμήματα των μορφολογικών ασυνεχειών. Πράγματι, εξετάζοντας ένα ενδεικτικό τμήμα του χάρτη κατανομής των αποκλίσεων μεταξύ των μεθόδων d8 και Horn, φαίνεται ότι οι αποκλίσεις λαμβάνουν χώρα σε συγκεκριμένες μορφολογικές ζώνες. Συγκεκριμένα περιορίζονται σε κάθε είδους μορφολογική ασυνέχεια, είτε πρόκειται για κρημνό, είτε για κάποιο ρέμα με έντονη κατά βάθος διάβρωση ή ακόμα και κατά μήκος των υδροκρίτων (Σχ. 2). Αντίστοιχη είναι η εικόνα των χαρτών κατανομής των αποκλίσεων μεταξύ των μεθόδων με υψηλές τιμές του δείκτη RMSEr και χαμηλή γραμμική συσχέτιση. Τέτοιου είδους συστηματικότητα δεν παρατηρείται μεταξύ των αποτελεσμάτων ομοειδών μεθόδων (d8 – d-inf, Horn – Z&T), με τις αποκλίσεις να λαμβάνουν μεμονωμένο και διάσπαρτο χαρακτήρα.



Σχήμα 3. Χαρακτηριστικές μορφολογικές δομές όπου παρατηρούνται αποκλίσεις μεταξύ των μεθόδων εκτίμησης της κλίσης. I.) κοιλιάδα, II.) λοφοειδής μορφή και III.) μορφολογική ασυνέχεια. Διακρίνονται οι ψηφιακές τιμές υψομέτρου στις ψηφίδες του DEM (αριστερά) και οι εκτιμώμενες τιμές κλίσης στις κεντρικές ψηφίδες βάση του παράθυρου 3x3 ψηφίδων.

Σε γενικές γραμμές οι μέθοδοι που δε λαμβάνουν υπ' όψιν τους την τοπική διακύμανση του αναγλύφου στο παράθυρο 3x3 ψηφίδων (d8 και d-inf) έχουν την τάση υπερεκτίμησης της κλίσης στα ανώτερα τμήματα των μορφολογικών ασυνεχειών, εκεί δηλαδή που μεταπίπτουμε από ομαλές σε σχετικά πιο απότομες κλίσεις καθώς και στις υδροκρικές γραμμές. Αντίθετα οι πιο σύνθετες τεχνικές Horn και Z&T υπερεκτιμούν την κλίση στα κατώτερα τμήματα των μορφολογικών ασυνεχειών

και στις κοιλάδες. Στην εικόνα (Σχ. 3) παρουσιάζονται χαρακτηριστικές θέσεις όπου παρατηρήθηκαν οι μέγιστες αποκλίσεις μεταξύ των μεθόδων στην ευρύτερη περιοχή μελέτης.

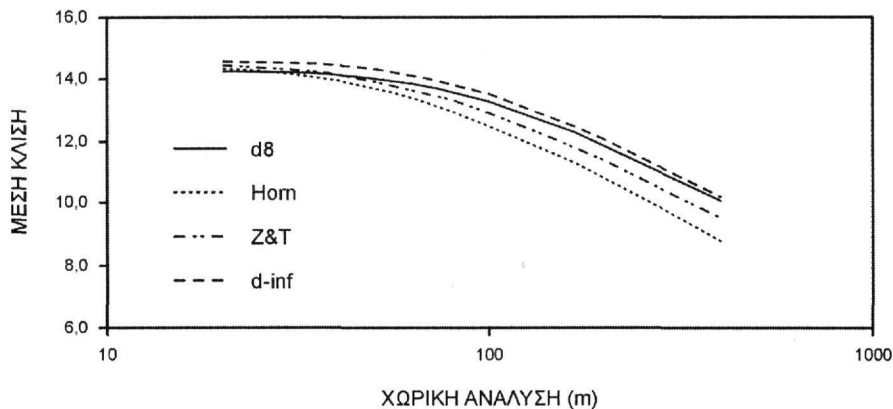
Το πρόβλημα που προκύπτει είναι εμφανές καθώς οι αποκλίσεις επικεντρώνονται σε θέσεις ιδιαίτερου γεωλογικού ενδιαφέροντος. Ο χαρακτηρισμός επομένως μιας γεωμορφής ως επιφάνεια επιπέδωσης (Σχ. 3-I) ή των συνθηκών διάβρωσης ενός υδρορέματος (Σχ. 3-II) εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τη μέθοδο που θα χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της κλίσης. Ακόμα και η οριοθέτηση μιας μορφολογικής ασυνέχειας (Σχ. 3-III) εμπεριέχει ένα ποσοστό σφάλματος, ανάλογο των διαστάσεων της ψηφίδας – χωρική ανάλυση του DEM.

6 ΡΟΛΟΣ ΤΗΣ ΧΩΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Από τα υπάρχοντα ανυσματικά δεδομένα (ισοϋψείς των τοπογραφικών χαρτών) και βάσει της ίδιας μεθόδου παρεμβολής, κατασκευάστηκε ένας αριθμός DEM διαφορετικής χωρικής ανάλυσης. Εκτιμήθηκε στη συνέχεια για κάθε ένα από τα παραγόμενα DEM η κλίση με τις επιλεγμένες μεθόδους και διερευνήθηκε η μεταβολή της μέσης τιμής της για την ευρύτερη περιοχή μελέτης με την ελάττωση της ανάλυσης του DEM (Σχ. 4).

Οι βασικότερες παρατηρήσεις που προκύπτουν συνοψίζονται παρακάτω:

- Ανεξαρτήτως της μεθόδου εκτίμησης της κλίσης, η αύξηση των διαστάσεων των ψηφίδων και κατά συνέπεια ελάττωση της χωρικής ανάλυσης επιφέρει την υποεκτίμηση των τιμών των κλίσεων.
- Η υποεκτίμηση των κλίσεων οφείλεται στην ομαλοποίηση (περιορισμός των λεπτομερειών) που υφίσταται το DEM με την ελάττωση της ανάλυσής του.
- Οι αποκλίσεις μεταξύ των μεθόδων είναι αντιστρόφως ανάλογες της χωρικής ανάλυσης του DEM.



Σχήμα 4. Ημιλογαριθμικό διάγραμμα των εκτιμώμενων τιμών μέσης κλίσης βάσει των επιλεγμένων μεθόδων για την ευρύτερη περιοχή μελέτης κατά τη μεταβολή της ανάλυσης του DEM.

Η χρήση πιο αξιόπιστων από άποψης υψομετρικής ακρίβειας DEM, δε βελτιώνει σε καμία περίπτωση το προκύπτον σφάλμα που σχετίζεται με τη χωρική ανάλυση του πλέγματος των ψηφιακών υψομετρικών τιμών, την κλίμακα δηλαδή του DEM. Με αυτήν την έννοια η χωρική ανάλυση του DEM έχει σημαντική επίδραση στα αποτελέσματα μιας εφαρμογής, αφού επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τις αποκλίσεις μεταξύ των μεθόδων. Πρέπει να τονισθεί ότι η ποσοτικοποίηση των αποκλίσεων και η διερεύνηση της χωρικής τους κατανομής στα προηγούμενα στάδια της εργασίας πραγματοποιήθηκε με βάση το DEM των 20m, περιοχή με μικρό εύρος αποκλίσεων (Σχ. 4). Η οποιαδήποτε ελάττωση της ανάλυσης όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στο διάγραμμα θα επέφερε την αύξηση των αποκλίσεων μεταξύ των μεθόδων και κατ' επέκταση της ασάφειας στον καθορισμό των κλίσεων στην εκάστοτε περιοχή μελέτης.

7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ποσοτικοποίηση των αποκλίσεων μεταξύ των μεθόδων βάσει του δείκτη RMSEr και του συντελεστή γραμμικής συσχέτισης r επέτρεψε την διάκριση των μεθόδων σε επιμέρους ομάδες με παρόμοια αποτελέσματα. Ο αριθμός των ψηφίδων που συνεκτιμώνται από κάθε μέθοδο φαίνεται να αποτελεί την πλέον κρίσιμη παράμετρο διαφοροποίησης μεταξύ τους.

Οι παρατηρούμενες αποκλίσεις είχαν περιορισμένη έκφραση στις μέγιστες και ιδιαίτερα στις μέσες τιμές κλίσης των επιλεγμένων υδρολογικών λεκανών. Οι συγκεκριμένες στατιστικές παράμετροι δε δύναται επομένως να θεωρηθούν κριτήρια ελέγχου των αποκλίσεων μεταξύ των επιμέρους μεθόδων.

Μέχρι στιγμής, προϋπάρχουσες μελέτες είχαν υπογραμμίσει την διαφοροποίηση των μεθόδων σε περιοχές με έντονο ανάγλυφο. Η διερεύνηση της χωρικής κατανομής των αποτελεσμάτων των διαφόρων αλγόριθμων εκτίμησης της κλίσης απέδειξε ότι αποκλίσεις υφίσταται και λαμβάνουν χώρα σε συγκεκριμένες μορφολογικές δομές. Οι μέθοδοι που λαμβάνουν υπ' όψιν τους την τοπική διακύμανση του αναγλύφου στο παράθυρο 3×3 ψηφίδων (Horn, Z&T), υπερεκτιμούν την κλίση στις κοίλες μορφολογικές δομές (κατώτερα τμήματα μορφολογικών ασυνεχειών, κοιλάδες, κλπ.). Αντίστοιχα οι μέθοδοι που δεν προσομοιώνουν το ανάγλυφο στο παράθυρο 3×3 ($d8$, $d-1nf$) υπερεκτιμούν την κλίση στις κυρτές μορφολογικές δομές (άνωτερα τμήματα μορφολογικών ασυνεχειών, υδροκριτικές γραμμές, κλπ.).

Οι ασάφειες που προκύπτουν στο χαρακτηρισμό ορισμένων γεωμορφών (π.χ. των επιφανειών επιπέδωσης), τον καθορισμό της έντασης φαινομένων όπως η κατά βάθος διάβρωση ακόμα και στην οριοθέτηση των μορφολογικών ασυνεχειών είναι υπαρκτές. Είναι κατανοητό ότι δεδομένα που αφορούν την πραγματική κλίση της μορφολογίας είναι πρακτικά αδύνατο να συλλεχθούν σε κλίμακες της παρούσας εργασίας. Μιλώντας λοιπόν για υπερεκτίμηση και υποεκτίμηση της κλίσης αναφερόμαστε πάντα στις σχετικές τιμές μεταξύ των μεθόδων, καθώς δεν υπάρχει κάποιου είδους μέτρηση που να αποτελέσει αξιόπιστο επίπεδο αναφοράς.

Επιπλέον διαφορά μεταξύ των διαφόρων μεθόδων εντοπίζεται στην ίδια τη δομή των αλγόριθμών τους, τις αρχές δηλαδή που διέπουν την επεξεργασία των υψομέτρων. Έτσι ορισμένες μόνο τεχνικές (Horn, Z&T) είναι ικανές να εκτιμήσουν εκτός της πρώτης παραγώγου της τοπογραφίας – κλίση και δεύτερης τάξης παράγωγο – 'τοπογραφική καμπυλότητα' (curvature). Η αδυναμία επίσης ορισμένων μεθόδων να εκτιμούν το άνυσμα της κλίσης – προσανατολισμός των κλίσεων – σε όλο το δυνατό εύρος τιμών ($0 - 2\pi$) ασκεί ουσιαστικό περιορισμό στους στόχους πολλών εφαρμογών.

Τέλος η χωρική ανάλυση του DEM όπως διαπιστώθηκε συμβάλλει δραστικά στην διακύμανση των αποκλίσεων μεταξύ των μεθόδων. Το παραπάνω γεγονός σε συνδυασμό με την ενδεχόμενη υποεκτίμηση της κλίσης κατά την ελάττωση της χωρικής ανάλυσης, επιβάλλει την ορθή επιλογή, όπου βέβαια είναι εφικτό, της καταλληλότερης κλίμακας για την εκάστοτε εφαρμογή.

Θα πρέπει να τονισθεί ότι εφόσον κάθε μέθοδος στηρίζεται σε κάποιο μαθηματικό μοντέλο, η γνώση των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων καθώς και των περιορισμών ενός μοντέλου, όπως αυτές διατυπώνονται από τη μαθηματική του έκφραση, επιτρέπει κατά έναν έμμεσο τρόπο την επιλογή της καταλληλότερης μεθόδου για την εκάστοτε εφαρμογή. Αν για παράδειγμα το DEM που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί δεν έχει ικανοποιητική χωρική ανάλυση και ο στόχος της εφαρμογής είναι η αναγνώριση της κατά βάθος διάβρωσης, η χρήση μιας μεθόδου που 'υπερεκτιμά' την κλίση στις συγκεκριμένες μορφολογικές δομές είναι αναγκαία ώστε να αντισταθμιστεί η ομαλοποίηση του αναγλύφου λόγω της χαμηλής χωρικής ανάλυσης των υψομετρικών δεδομένων.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Fleming, M.D., Hoffer, R.M., 1979. Machine processing of landsat MSS data and DMA topographic data for forest cover type mapping, LARS Technical Report 062879. Laboratory for Applications of Remote Sensing, Purdue University, West Lafayette, Indiana.
- Horn, B.K.P., 1981. Hill shading and reflectance map, Proceedings of the IEEE, 69(1), 14-47.
- Jones, K.H., 1998. A comparison of algorithms used to compute hill slope as a property of the DEM, Computers & Geosciences, 24(4), 315-323.
- Ripley, B.D., 1981. Spatial statistics. New York, John Wiley, 252p.
- Sharpnack, D.A., Akin, G., 1969. An algorithm for computing slope and aspect from elevations, Photogrammetric Engineering, 35(3), 247-248.

- Skidmore, A.K., 1989. A comparison of techniques for calculating gradient and aspect from a gridded digital elevation model, *International Journal of Geographical Information Systems*, 3(4), 323-334.
- Strahler, A.N., 1952. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography, *Geological Society of America Bulletin*, 63, 1117-1142.
- Strahler, A.N., 1958. Dimensional analysis applied to fluvially eroded landforms, *Geological Society of America Bulletin*, 69, 279-300.
- Tarboton, D.G., 1997. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models, *Water Resources Research*, 33(2), 309-319.
- Travis, M.R., Elsner, G.H., Iverson, W.D., Johnson, C.G., 1975. VIEWIT computation of seen areas, slope and aspect for land-use planning, U.S. Dept. of Agriculture Forest Service Gen. Techn. Rep. PSW 11/1975, Pacific Southwest Forest and Range Experimental Station, Berkeley, California, 70pp.
- Zevenbergen, L.W., Thorne, C., 1987. Quantitative analysis of land surface topography, *Earth Surface Processes and Landforms*, 12, 47-56.
- Zhang, X., Drake, N.A., Wainwright, J., Mulligan, M., 1999. Comparison of slope estimates from low resolution DEMs: Scaling issues and fractal method for their solution, *Earth Surface Processes and Landforms*, 24, 763-779.

ABSTRACT

DEVIATION BETWEEN HILL SLOPE ESTIMATION METHODS AND THE ROLE OF DEM SPATIAL RESOLUTION. COMPARATIVE STUDY IN A GIS ENVIRONMENT

Foumelis M. and Vassilakis Emm.

¹ *Department of Dynamic Tectonic & Applied Geology, Faculty of Geology, University of Athens, mfoum@geol.uoa.gr, evasilak@geol.uoa.gr*

Three methods are described between the most frequently used for the estimation of hill slope from digital elevation models (DEM), the 'd8' method (Travis et al. 1975), Horn's method (1981) and Zevenbergen and Thorne method (1987), are described. Also a new approach was examined introduced by Tarboton (1997) called 'd-infinite' method.

In order to investigate the spatial distribution of deviations between the examined methods, a statistical analysis was performed in a GIS environment. The magnitude of the differences between the methods was determined by calculating the RMSEr (Root Mean Square Error), while the degree of their equivalence was expressed by the linear correlation factor (r). Most deviations were located in areas of high relief, whereas the most interesting fact was that each method overestimates or underestimates the slope in very specific morphological structures, e.g. along watersheds, streams and generally in some types of morphological discontinuities.

Finally, the DEM spatial resolution effect was explored on the estimated slope values using the selected methods. Regardless the method used, a general tendency of underestimating slope values by decreasing the DEM resolution was observed. The degree of divergences between these was also highly depended on the change of spatial resolution. Thus, the importance of defining a suitable resolution for each application should be addressed.