

ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΡΟΝΙΚΑ

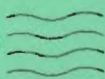
τεχνικό επιμελητήριο ελλαδας

Ψηφιακή χαρτογραφία, φωτογραμμετρία, τηλεπισκόπηση - τεχνολογίες αιχμής

διήμερο

ISSN 0376 - 2211

2η έκτακτη έκδοση '95



Συζήτηση, ερωτήσεις - απαντήσεις, παρεμβάσεις

Ρόκος: Μαρίνο, δεν θα είναι καθόλου άσχημο να πληρώσουμε και εμείς, εάν βάλουμε επάνω το δίκτυο της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού, διότι αν δεν το κάνουμε αυτό, όλοι όσοι οραματίζονται ότι θα γίνει το κτηματολόγιο με χρηματοδότηση, θα δουν όνειρα στο ξύπνιο τους.

Αυτό που θέλω να ρωτήσω, βέβαια, είναι το εξής: Εάν προβλέπει το σύστημα κωδικοποίησης οντοτήτων, που λες, συνθήκες και πρότυπα τα οποία διαχωρίζουν τα είδη, π.χ. να έχουμε αμπέλι κυπελοειδούς διαμόρφωσης, ή ανοιχτής διαμόρφωσης, δάσος χαλέπιας πεύκης πυκνής ή αραιής, υγιούς ή ασθενούς, καμένης, αναγεννώμενης και πώς σκέφτεστε αυτά να τα αντιμετωπίσετε;

Κάβουρας: Η κωδικοποίηση έχει, όπως είπα, πολλά τμήματα. Όπως είπα, στο τελευταίο επίπεδο, το είδος δεν έχει συμπληρωθεί πλήρως, έχει αρκετό χώρο για να συμπληρωθεί με στοιχεία τα οποία αφορούν, όμως, συγκεκριμένους φορείς. Επίσης, υπάρχει και κάποι-

ος άλλος κωδικός, είναι κατά πόσο αυτό, που λέμε ότι είναι δάσος ή όχι, είναι θεσμοθετημένο ή όχι. Είχαμε τέτοιου είδους πολλά προβλήματα, τα οποία φυσικά δεν είχαν ληφθεί υπόψη στην αρχική κωδικοποίηση.

Εξάλλου, η αρχική κωδικοποίηση αφορούσε στο τι βλέπουμε όταν πάμε έξω και δεν γνωρίζουμε εκείνη τη στιγμή κατά πόσο αυτό είναι θεσμοθετημένο ή όχι. Επομένως, σε πρώτη φάση θα έπρεπε να καταλήξουμε, ίσως, στις γενικές κατηγορίες και να συμβουλευθούμε αυτούς που γνωρίζουν τον κατάλληλο κλάδο για να προχωρήσουμε παρακάτω σε θέματα ποιότητας είδους.

Πρόεδρος (Τσούλος): Άλλες ερωτήσεις υπάρχουν; Ευχαριστώ το συνάδελφο κ. Κάβουρα και παρακαλώ το συνάδελφο κ. Βύρωνα Νάκο, λέκτορα του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου να παρουσιάσει την κοινή μας εισήγηση, με θέμα: «Χαρτογραφικές βάσεις δεδομένων και σφάλματα».

Θέμα: Χαρτογραφικές βάσεις δεδομένων και σφάλματα.

Εισηγητές: **Β. Νάκος**, δρ ΑΤΜ, λέκτορας Ε.Μ.Π., **Α. Τσούλος**, δρ ΑΤΜ, λέκτορας Ε.Μ.Π.

Παρουσιαστής: **Β. Νάκος**.

Ευχαριστώ τον πρόεδρο. Για όση ώρα ήμουν ακροατής, προσπάθησα να καταγράψω το χώρο που έχουμε στην οθόνη, έτσι ώστε να μην τοποθετώ τις διαφάνειες χαμηλά και δημιουργώ πρόβλημα.

Περίληψη

Το πλέον σημαντικό τμήμα ενός χαρτογραφικού συστήματος αποτελεί η βάση των χαρτογραφικών δεδομένων που περιέχει τα στοιχεία του γεωγραφικού χώρου. Οι χαρτογραφικές λειτουργίες που υλοποι-

ούνται στο πλαίσιο ενός Συστήματος Γεωγραφικών Πληροφοριών (Geographic Information System) με σκοπό την παραγωγή χαρτών, προϋποθέτουν ότι η βάση των χαρτογραφικών δεδομένων είναι απαλλαγμένη από σφάλματα (error free). Αυτό δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα, λόγω κυρίως των εγγενών χαρακτηριστικών των πηγών που χρησιμοποιούνται για την ψηφιακή καταγραφή, των σφαλμάτων της ψηφιακής καταγραφής και των σφαλμάτων των χαρτογραφικών μετασχηματισμών. Επομένως, είναι απαραίτητος ο σαφής προσδιορισμός των πηγών του σφάλματος, αλλά και η ποσοτική εκτίμηση των διαφόρων κατηγοριών σφαλμάτων, ώστε να καταστεί δυνατή η στρατηγική διαχείρισης και ελαχιστοποίησης του σφάλματος.

Στην εργασία που ακολουθεί, μετά από σύντομη τοποθέτηση του προβλήματος και παρουσίαση των διαφόρων κατηγοριών του σφάλματος, εκτίθενται η μεθοδολογία και τα συμπεράσματα της ποσοτικής εκτίμησης των σφαλμάτων που οφείλονται στους χαρτογραφικούς μετασχηματισμούς.

1. Τοποθέτηση του προβλήματος

Τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (ΣΓΠ-GIS) συνιστούν ιδιαίτερα αποτελεσματικά εργαλεία διαχείρισης της γεωγραφικής πληροφορίας και η υλοποίηση ενός προγράμματος στο πλαίσιο των ΣΓΠ αποτελεί μια επίπονη και ιδιαίτερα δαπανηρή διαδικασία.

Η ιδιαιτερότητα στη δαπάνη δεν οφείλεται μόνο στο κόστος του εξοπλισμού, του λογισμικού και του εξειδικευμένου προσωπικού αλλά, κυρίως, στο κόστος συλλογής, επεξεργασίας και απόδοσης των γεωγραφικών στοιχείων (ή άλλως κόστος δημιουργίας της βάσης δεδομένων). Η αναλογία του κόστους προμήθειας του απαραίτητου εξοπλισμού και λογισμικού σε σχέση με το κόστος δημιουργίας της βάσης δεδομένων είναι της τάξεως του 1:10 γεγονός που προσδίδει ιδιαίτερη σημασία στον παράγοντα αυτόν.

Οι χαρτογραφικές διαδικασίες, που υλοποιούνται στο πλαίσιο ενός Συστήματος Γεωγραφικών Πληροφοριών, προϋποθέτουν την ύπαρξη δεδομένων που είναι απαλλαγμένα από σφάλμα (error free). Δηλαδή, κάθε χάρτης που χρησιμοποιείται ως πηγή πληροφοριών θεωρείται σωστός για το σύνολο της περιοχής που καλύπτει και το σύνολο των επιπέδων πληροφορίας που απεικονίζει. Φυσικά, η παραδοχή αυτή δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα.

Από την άλλη πλευρά, η υψηλή ποιότητα των χαρτογραφικών προϊόντων που παράγονται στο περιβάλλον των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών και οι δυνατότητες συσχετισμού και επεξεργασίας δεδομένων διαφορετικών χαρτογραφικών παραμέτρων, αφήνουν χωρίς ιδιαίτερη προσοχή τον παράγοντα του σφάλματος ο οποίος ενυπάρχει, τόσο στα δεδομένα, όσο και στις διαδικασίες ψηφιακής καταγραφής και επεξεργασίας. Η λέξη σφάλμα, εν προκειμένω, χρησιμοποιείται με την ευρύτερη έννοιά της, ώστε να περιλάβει, τόσο τα λάθη (mistakes), όσο και τη μετα-

βλητότητα (variation).

Προκύπτει, επομένως, η ανάγκη προσδιορισμού και εκτίμησης του σφάλματος και η δημιουργία των κατάλληλων προϋποθέσεων για την υλοποίηση μιας στρατηγικής διαχείρισης και, ει δυνατόν, ελαχιστοποίησής του. Στο πλαίσιο της εισήγησης θα καλυφθεί το τμήμα του αντικειμένου που αφορά στον προσδιορισμό των πηγών του σφάλματος.

2. Ανάλυση

Η προσέγγιση στο πρόβλημα αυτό περνάει από πέντε (5) διαδοχικές φάσεις των οποίων το περιεχόμενο συνίσταται στα εξής:

- Προσδιορισμός των πηγών του σφάλματος.
- Αναγνώριση και εκτίμηση του σφάλματος.
- Δημιουργία μοντέλου διάδοσης του σφάλματος.
- Στρατηγική διαχείρισης του σφάλματος.
- Στρατηγική ελαχιστοποίησης του σφάλματος.

Δίνεται έμφαση στο γεγονός ότι οι φάσεις αυτές είναι διαδοχικές υπό την έννοια ότι κάθε μια αξιοποιεί υποχρεωτικά τα αποτελέσματα της προηγούμενης. Είναι γνωστό ότι κάθε χωρικό στοιχείο προσδιορίζεται από τη θέση του και τις περιγραφικές του παραμέτρους. Επομένως, ένας βασικός διαχωρισμός του σφάλματος οδηγεί στη διάκριση μεταξύ χαρτογραφικού σφάλματος και θεματικού σφάλματος. Τόσο, όμως, η χαρτογραφική, όσο και θεματική συνιστώσα των χωρικών στοιχείων ακολουθούν παράλληλη ροή στο περιβάλλον ενός Συστήματος Γεωγραφικών Πληροφοριών, γεγονός που οδηγεί σε περαιτέρω ομαδοποίηση των πιθανών πηγών του σφάλματος των χωρικών στοιχείων στις ακόλουθες κατηγορίες:

Σφάλματα πηγής.

Σφάλματα επεξεργασίας.

Σφάλματα χρήσης.

Η κατάταξη αυτή οδηγεί στην αναζήτηση των πηγών του σφάλματος μετά από αναλυτική προσέγγιση κάθε μιας κατηγορίας χωρίς τον κίνδυνο επικάλυψης μεταξύ των διαφόρων κατηγοριών. Ακολουθεί περιληπτική αναφορά των διαφόρων πηγών σφάλματος κατά κατηγορία.

2.1. Σφάλματα πηγής

Τα σφάλματα πηγής οφείλονται προφανώς στη χρησιμοποιούμενη (αναλογική) χαρτογραφική πηγή. Ορισμένα εξ αυτών είναι εύκολο να προσδιορισθούν από έναν έμπειρο χαρτογράφο άμεσα, θεωρούνται εμφανή (προφανή) και ως εκ τούτου είναι εύκολη η διαχείρισή τους, σε αντίθεση με τα σφάλματα μετρήσεων ή μεταβλητότητας του μέσου, τα οποία δεν είναι δυνατόν να προσδιορισθούν τουλάχιστον άμεσα.

2.1.1. Εμφανή σφάλματα

Ηλικία δεδομένων: Αναφέρονται στο χρόνο συλλογής των απεικονιζόμενων στους χάρτες - πηγές στοιχείων.

Κάλυψη της περιοχής: Ανομοιομορφία στην κάλυψη περιοχών - αποσπασματική κάλυψη.

Κλίμακα των χρησιμοποιούμενων χαρτών: Η κλίμακα των χρησιμοποιούμενων χαρτών πρέπει να αρμόζει στις ανάγκες της εφαρμογής και να επιδιώκεται η χρήση χαρτών ενιαίας κλίμακας.

Πυκνότητα των παρατηρήσεων: Η πυκνότητα των παρατηρήσεων αποτελεί χονδρική ένδειξη της ποιότητας των δεδομένων.

Format των δεδομένων: Αφορά, κυρίως, στη χρήση ψηφιακών δεδομένων διαφορετικής προέλευσης και πρέπει να είναι συμπαγές, ώστε να είναι δυνατή η πλήρης μεταφορά.

Πρόσβαση: Προβλήματα που δημιουργούνται από αδυναμία πρόσβασης στην κατάλληλη χαρτογραφική πηγή.

Κόστος: Μείωση του ύψους της δαπάνης οδηγεί σε λύσεις που επηρεάζουν αρνητικά την ορθότητα των ψηφιακών δεδομένων.

2.1.2. Σφάλματα μετρήσεων ή μεταβλητότητας του μέσου

Ορθότητα θέσης: Οι απεικονιζόμενες στους χάρτες θέσεις των χαρτογραφικών στοιχείων ενέχουν σφάλματα τα οποία οφείλονται, είτε στις εργασίες προσδιορισμού των θέσεων, είτε στην παραμόρφωση του μέσου απόδοσης του χάρτη.

Ορθότητα περιεχομένου: Αφορά στα θεματικά χαρακτηριστικά και διακρίνεται σε ποιοτική και ποσοτική.

2.2. Σφάλματα επεξεργασίας

Αριθμητικά σφάλματα του συστήματος Η/Υ: Αναφέρονται στη δυνατότητα επεξεργασίας και αποθήκευσης μεγάλων αριθμών.

Σφάλματα ψηφιοποίησης: Η ψηφιακή καταγραφή (ιδιαίτερα η χειροκίνητη) αποτελεί σημαντική πηγή σφάλματος δεδομένων των εγγενών χαρακτηριστικών των χαρτών και της χρησιμοποιούμενης μεθοδολογίας.

Σφάλματα μετατροπής της δομής: Αναφέρονται στη μετατροπή διανυσματικών (vector) δεδομένων σε κανονικοποιημένα (raster).

Σφάλματα επίθεσης: Προέρχονται από τις ασυμφωνίες που παρατηρούνται στην απόδοση των ίδιων γραμμών στα διάφορα επίπεδα.

Σφάλματα ταξινόμησης: Δημιουργούνται από την έλλειψη ολοκληρωμένων συστημάτων ταξινόμησης των χαρτογραφικών στοιχείων.

Σφάλματα γενίκευσης: Τοπολογικά σφάλματα που δημιουργούνται κατά το μετασχηματισμό της γενίκευσης των χαρτογραφικών στοιχείων.

Σφάλματα χαρτογραφικών απεικονίσεων: Προέρχονται από τις αναπόφευκτες παραμορφώσεις κατά την απεικόνιση της γήινης επιφάνειας στο επίπεδο.

2.3. Σφάλματα χρήσης

Εσφαλμένη ερμηνεία του περιεχομένου: Προέρχονται από την ανορθόδοξη ερμηνεία και χρήση της χαρτο-

γραφικής πληροφορίας.

Απουσία επεξηγηματικής πληροφορίας: Οφείλονται στην παντελή ή μερική έλλειψη υπομνήματος.

Απόκλιση από τις προδιαγραφές: Αναφέρονται στη διαφοροποιημένη, σε σχέση με τις προδιαγραφές, απόδοση.

Χρήση αρχείων ακατάλληλης κλίμακας: Προκαλούνται από τη χρήση ψηφιακών αρχείων κλίμακας ακατάλληλης σε σχέση με τις απαιτήσεις της εφαρμογής.

3. Αναγνώριση και εκτίμηση του σφάλματος

Είναι προφανές ότι ο προσδιορισμός των πηγών του σφάλματος αποτελεί υποχρεωτικό σημείο διάβασης για την αντιμετώπιση του προβλήματος. Πρέπει, όμως, να ακολουθείται από την ποσοτική εκτίμηση των κατηγοριών των σφαλμάτων που προαναφέρθηκαν, ώστε να είναι πρακτικά δυνατή η στρατηγική διαχείρισης και ελαχιστοποίησης του σφάλματος.

Ουσιαστικό ρόλο στη χαρτογραφική διαδικασία διαδραματίζουν οι **χαρτογραφικοί μετασχηματισμοί** που προκαλούν σφάλματα για τα οποία ακολουθεί ποσοτική εκτίμηση.

3.1. Ομοπαράλληλος μετασχηματισμός

Η ψηφιοποίηση των χαρτών αποτελεί τη βασικότερη μεθοδολογία δημιουργίας των χαρτογραφικών βάσεων δεδομένων. Με την ψηφιοποίηση εισάγεται στο περιβάλλον του συστήματος μεγάλος αριθμός σημείων μέσω των συντεταγμένων τους. Οι συντεταγμένες, ανεξάρτητα του είδους της μονάδας ψηφιοποίησης (ψηφιοποιητής ή σαρωτής), εκφράζονται σε ένα ορθογώνιο σύστημα αναφοράς, και αποδίδονται, συνήθως, σε φυσικές μονάδες της επιφάνειας ψηφιοποίησης (δηλαδή mm ή inches). Η πληροφορία, όμως, του χάρτη είναι καταγραμμένη είτε με γεωγραφικές (φ , λ), είτε με ορθογώνιες (X, Y) συντεταγμένες του συστήματος απεικόνισης. Η μετατροπή των γεωγραφικών συντεταγμένων σε ορθογώνιες του συγκεκριμένου συστήματος απεικόνισης και αντίστροφα, αποτελεί αντικείμενο της μαθηματικής χαρτογραφίας. Η μετατροπή αυτή υλοποιείται με τη βοήθεια προγραμμάτων, όσα και τα συστήματα απεικόνισης σε χρήση, με τον αλγόριθμο των σχέσεων $X = f(\varphi, \lambda)$, $Y = g(\varphi, \lambda)$ και των αντιστρόφων τους. Σε οποιαδήποτε διαδικασία ψηφιοποίησης, πλέον, μπορεί να θεωρηθεί ότι η πληροφορία του χάρτη εκφράζεται σε ορθογώνιες συντεταγμένες του συστήματος απεικόνισης.

Οι συντεταγμένες των σημείων που ψηφιοποιούνται, εκφρασμένες αποκλειστικά στο σύστημα αναφοράς της μονάδας ψηφιοποίησης, δεν έχουν, για προφανείς λόγους, χαρτογραφικό ενδιαφέρον. Απαιτείται, επομένως, μια διαδικασία που να μετατρέπει τις συντεταγμένες των σημείων από το σύστημα της μονάδας ψηφιοποίησης στο σύστημα απεικόνισης του χάρτη. Η διαδικασία ονομάζεται γεωγραφική προσαρμογή συντεταγμένων ή αγκίστρωση. Με τη διαδικασία αυτή επιδιώκεται η επίλυση του γεωμετρικού προβλήματος της μετάθεσης και στροφής κατά την τυχαία τοποθέτηση του χάρτη πάνω στο επίπεδο του

ψηφιοποιητή.

Είναι γνωστό ότι ένας χάρτης, λόγω των ιδιοτήτων του υλικού, παραμορφώνεται από τις μεταβολές της θερμοκρασίας και υγρασίας. Αλλά και ο τρόπος σύνταξης και αναπαραγωγής του, έχει δημιουργήσει παραμορφώσεις σε αυτόν. Το μοντέλο, λοιπόν, που θα επιλεγεί να επιλύσει το γεωμετρικό πρόβλημα καλό θα είναι να αφομοιώνει και τις παραμορφώσεις που έχει υποστεί ο χάρτης. Ένα τέτοιο μοντέλο είναι ο ομοπαράλληλος μετασχηματισμός (affine transformation).

Ο ομοπαράλληλος μετασχηματισμός είναι ένα πλήρες γραμμικό μοντέλο διδιάστατου πολυωνυμικού μετασχηματισμού. Ο μετασχηματισμός περιλαμβάνει έξι παραμέτρους που αποτελούν τους αγνώστους του προβλήματος:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a \\ d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b & c \\ e & f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$$

όπου (X, Y) οι συντεταγμένες του συστήματος απεικόνισης του χάρτη, (x, y) οι συντεταγμένες του συστήματος της μονάδας ψηφιοποίησης και a, b, ..., f οι έξι παράμετροι του μετασχηματισμού.

Το γεωμετρικό πρόβλημα της γεωγραφικής προσαρμογής των συντεταγμένων μπορεί να περιγραφεί, έτσι ώστε να περιλαμβάνει μετάθεση (X_0, Y_0), διαφορετική κλίμακα κατά X: m_x και Y: m_y , διαφορετική στροφή του άξονα X: θ_x και Y: θ_y και, με τον τρόπο αυτό, να αφομοιώνει τις -συστηματικές- παραμορφώσεις, όπως αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Οι σχέσεις που δίνουν τη μετάθεση, τις στροφές και τις κλίμακες συναρτήσει των έξι παραμέτρων του ομοπαράλληλου μετασχηματισμού, είναι:

$$\begin{aligned} \text{μετάθεση:} \quad X_0 &= a, \\ Y_0 &= d, \\ \text{στροφές:} \quad \theta_x &= \arctan(-e/b), \\ \theta_y &= \arctan(c/f), \\ \text{κλίμακες:} \quad m_x &= \sqrt{(b^2 + e^2)}, \\ m_y &= \sqrt{(c^2 + f^2)}. \end{aligned}$$

Προκύπτει επομένως ότι, για την αντιμετώπιση της γεωγραφικής προσαρμογής, το πρόβλημα ανάγεται στον προσδιορισμό των έξι παραμέτρων του ομοπαράλληλου μετασχηματισμού. Ο προσδιορισμός αυτός γίνεται με τη βοήθεια σημείων με γνωστές συντεταγμένες στο σύστημα απεικόνισης του χάρτη (σημεία γεωγραφικής προσαρμογής συντεταγμένων ή σημεία αγκίστρωσης). Τα σημεία αυτά, συνήθως, προτιμάται να είναι τριγωνομετρικά σημεία ή τομές του καννάβου των ορθογωνίων συντεταγμένων [ή του πλέγματος μεσημβρινών και παραλλήλων]. Για κάθε σημείο προκύπτουν δύο εξισώσεις, επομένως, ο προσδιορισμός των έξι αγνώστων παραμέτρων απαιτεί να χρησιμοποιηθούν τουλάχιστον τρία σημεία. Στην περίπτωση

αυτή το πρόβλημα συνίσταται στην επίλυση ενός γραμμικού συστήματος έξι εξισώσεων με έξι αγνώστους, που μπορεί εύκολα να επιλυθεί αν η ορίζουσα των συντελεστών των αγνώστων είναι διάφορη του μηδενός.

Επειδή, αφ' ενός η ψηφιοποιούμενη περιοχή, συνήθως, είναι εκτεταμένη και αφ' ετέρου ο σκοπός της γεωγραφικής προσαρμογής είναι, κυρίως, να αφομοιωθούν οι παραμορφώσεις στην έκταση του χάρτη, απαιτείται να χρησιμοποιηθούν περισσότερα των τριών σημείων κατά την επίλυση. Για n σημεία ($n \geq 4$) σχηματίζονται 2n εξισώσεις, και ο προσδιορισμός των έξι παραμέτρων προϋποθέτει διαδικασία συνόρθωσης. Η συνόρθωση γίνεται με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων. Κατά τη συνόρθωση θεωρείται ότι οι συντεταγμένες του χάρτη (X, Y) είναι τιμές σταθερές, δηλαδή δεν έχουν μεταβλητότητα. Αυτό, άλλωστε, είναι γεγονός που ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα, δεδομένου ότι στόχος είναι να μετατραπούν οι συντεταγμένες της μονάδας ψηφιοποίησης (x, y) στις συμβατικές (X, Y) του χάρτη. Αν, επιπλέον, θεωρηθεί ότι και οι συντεταγμένες της μονάδας ψηφιοποίησης (x, y) δεν έχουν μεταβλητότητα, ή ότι η μεταβλητότητά τους είναι ασήμαντη για τις απαιτήσεις ακρίβειας της ψηφιοποίησης, τότε οι παρατηρήσεις που εκφράζονται από το μοντέλο του ομοπαράλληλου μετασχηματισμού μπορούν να συνορθωθούν με τη μέθοδο των εμμέσων παρατηρήσεων και να προσδιοριστούν οι άγνωστες παράμετροι. Λόγω της ιδιομορφίας, μάλιστα, των εξισώσεων παρατήρησης δεν χρειάζεται να αντιστραφεί ένας κανονικός πίνακας 6x6, αλλά ένας πίνακας 3x3. Με τον τρόπο αυτό απλοποιούνται οι υπολογισμοί και μειώνεται ο χρόνος εκτέλεσης των πράξεων. Με τη θεώρηση της επίλυσης, όπως αναπτύχθηκε μέχρι το σημείο αυτό, αντιμετωπίζεται η γεωγραφική προσαρμογή συντεταγμένων για τρέχουσες εργασίες ψηφιοποίησης χαρτών.

Οι συντεταγμένες, όμως, της μονάδας ψηφιοποίησης (x, y) αποτελούν μετρήσεις και έχουν, επομένως, μεταβλητότητα. Η μεταβλητότητα αυτή μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι συνάρτηση της ακρίβειας της μονάδας ψηφιοποίησης (σ_d) αφ' ενός και της διαχωριστικής ικανότητας του ματιού (σ_e) του χειριστή (αποκτικτικά για τον ψηφιοποιητή) αφ' ετέρου. Η ακρίβεια της μονάδας ψηφιοποίησης αναφέρεται στα εγχειρίδια των οργάνων και, συνήθως, κυμαίνεται μεταξύ $\pm 0.25\text{mm} \div \pm 0.1\text{mm}$. Εκτιμάται ότι, για έναν εξασκημένο χειριστή και λόγω των συνθηκών ψηφιοποίησης (δυνατότητα χρήσης μεγεθυντικού φακού και κατάλληλου φωτισμού), η διαχωριστική ικανότητα του ματιού είναι $\pm 0.1\text{mm}$. Η ψηφιοποίηση, επομένως, ενός σημείου -μέτρηση (x, y)- θεωρείται ότι αποτελείται από δύο ανεξάρτητες διαδικασίες (για την περίπτωση του ψηφιοποιητή). Η πρώτη αφορά την αρχή της λειτουργίας του οργάνου η δεύτερη τη σκόπευση από το χειριστή του συγκεκριμένου σημείου πάνω στο χάρτη. Η μεταβλητότητα επομένως των x και y είναι:

$$\sigma_o^2 = \sigma_d^2 + \sigma_e^2.$$

Αν η μονάδα ψηφιοποίησης είναι σαρωτής, δηλαδή η ψηφιοποίηση γίνεται αυτόματα χωρίς την επέμβαση

χειριστή, η μεταβλητότητα των συντεταγμένων x και y θα εξαρτάται αποκλειστικά από το όργανο οπότε:

$$\sigma_x^2 = \sigma_d^2.$$

Σε κάθε εξίσωση παρατήρησης, λοιπόν, θα υπεισέρχονται δύο μετρούμενες μεταβλητές, οι συντεταγμένες (x, y) , με μεταβλητότητες $\sigma_x^2 = \sigma_d^2$ και $\sigma_y^2 = \sigma_d^2$. Η συνόρθωση με αυτές τις προϋποθέσεις μπορεί να γίνει σύμφωνα με τη γενικευμένη μέθοδο. Οι προσωρινές τιμές για τις έξι παραμέτρους λαμβάνονται ύστερα από επίλυση σύμφωνα με τη μέθοδο των έμμεσων παρατηρήσεων. Κατά τη συνόρθωση με τη γενικευμένη μέθοδο παρατηρείται ότι δεν χρειάζονται πλέον της μιας επαναλήψεις, η διαφοροποίηση ουσιαστικά εμφανίζεται στον πίνακα μεταβλητότητας - συμμεταβλητότητας του αποτελέσματος. Από τον πίνακα αυτόν και την a posteriori τυπική απόκλιση προκύπτει η ακρίβεια και αξιοπιστία του συστήματος μοντέλου και μονάδας ψηφιοποίησης για τη γεωγραφική προσαρμογή των συντεταγμένων. Κατά τη συνόρθωση με τη γενικευμένη μέθοδο έχουμε $2n$ παρατηρήσεις-μετρήσεις, ο αριθμός των ανεξαρτήτων καθοριστικών παραμέτρων του μοντέλου είναι 6 , οι βαθμοί ελευθερίας $2n-6$, ο αριθμός των αγνώστων παραμέτρων που ενδιαφέρουν 6 και ο αριθμός των συνθηκών $2n$.

Μεταβλητές εισόδου για τον αλγόριθμο επίλυσης αποτελούν ο αριθμός των σημείων γεωγραφικής προσαρμογής, η κλίμακα του χάρτη και τα δύο σύνολα των συντεταγμένων, της μονάδας ψηφιοποίησης και του χάρτη. Μεταβλητές εξόδου είναι οι έξι παράμετροι του μετασχηματισμού, η a posteriori τυπική απόκλιση (κυρίως για τον εντοπισμό χονδροειδών λαθών), και, εάν έχει επιλεγεί, ο πίνακας μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας των αγνώστων παραμέτρων, καθώς και ο πίνακας μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας των συντεταγμένων κάθε σημείου που ψηφιοποιείται από το χάρτη σύμφωνα με το νόμο μετάδοσης των σφαλμάτων. Οι πράξεις πρέπει να γίνονται με διπλή ακρίβεια και πριν από την επίλυση οι συντεταγμένες του χάρτη να υφίστανται προεπεξεργασία απαλοιφής του συστηματικού μέρους της μετάθεσης και της κλίμακας του χάρτη, με σκοπό τον ακριβέστερο προσδιορισμό των παραμέτρων και τη μείωση

του σφάλματος στρογγύλευσης κατά την εκτέλεση των πράξεων από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Στον πίνακα 1 συνοψίζονται ιεραρχημένες οι αιτίες που καθορίζουν την ποιότητα και ακρίβεια της ψηφιοποίησης ενός χάρτη. Όπως φαίνεται, κυριότερος παράγοντας είναι η ίδια η ποιότητα του χάρτη που πρόκειται να ψηφιοποιηθεί.

Πίνακας 1.	
Ψηφιοποιητής	Σαρωτής
Ποιότητα χάρτη	Ποιότητα χάρτη
Εξοικείωση χειριστή	
Κατανομή σημείων	Κατανομή σημείων
Όργανο	Όργανο
Μοντέλο	Μοντέλο

Σε περιπτώσεις που η ποιότητα του χάρτη είναι πολύ κακή (π.χ. λόγω παλαιότητας), το μοντέλο του ομοπαράλληλου μετασχηματισμού μπορεί να βελτιωθεί. Για τις περιπτώσεις αυτές ο αλγόριθμος τροποποιείται ως προς το βαθμό του διδιάστατου πολυωνυμικού μετασχηματισμού. Δηλαδή, μπορεί να χρησιμοποιηθεί πλήρης διδιάστατος πολυωνυμικός μετασχηματισμός β' βαθμού με δώδεκα παραμέτρους, όπως δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$X = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy + a_4x^2 + a_5y^2$$

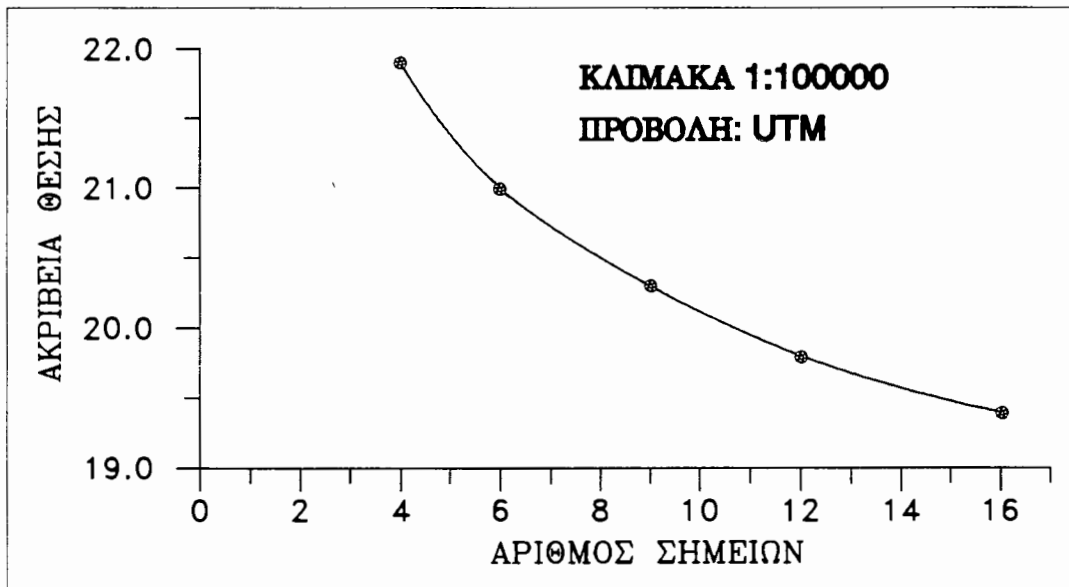
$$Y = b_0 + b_1x + b_2y + b_3xy + b_4x^2 + b_5y^2$$

Για τις ανάγκες της γεωγραφικής προσαρμογής συντεταγμένων, στην ψηφιοποίηση χαρτών, ο ομοπαράλληλος μετασχηματισμός κρίνεται αρκετά ικανοποιητικός. Οι τιμές του RMS για διαφορετικό αριθμό σημείων αγκίστρωσης στις πλέον χρησιμοποιούμενες χαρτογραφικές κλίμακες φαίνονται στον πίνακα 2. Διαφορετικά μοντέλα μετασχηματισμών, που έχουν δοκιμασθεί, δίνουν αποτελέσματα που ενισχύουν τον παραπάνω ισχυρισμό.

Πίνακας 2.					
Ψηφιοποιητής	Σαρωτής				
	4 σημεία	6 σημεία	9 σημεία	12 σημεία	16 σημεία
1:5000	± 1.10 m	± 1.05 m	± 1.01 m	± 0.99 m	± 0.97 m
	± 0.74 m	± 0.70 m	± 0.68 m	± 0.66 m	± 0.65 m
1:25000	± 5.5 m	± 5.4 m	± 5.1 m	± 5.0 m	± 4.9 m
	± 3.7 m	± 3.5 m	± 3.4 m	± 3.3 m	± 3.3 m
1:50000	± 11.0 m	± 10.5 m	± 10.1 m	± 9.9 m	± 9.7 m
	± 7.3 m	± 7.0 m	± 6.8 m	± 6.6 m	± 6.5 m
1:100000	± 21.9 m	± 21.0 m	± 20.3 m	± 19.8 m	± 19.4 m
	± 14.7 m	± 14.0 m	± 13.5 m	± 13.3 m	± 13.0 m

Στον πίνακα 2 δίνονται αποτελέσματα δοκιμαστικών εφαρμογών για την ακρίβεια της ψηφιοποίησης σε διάφορες κλίμακες, για διαφορετικές μονάδες ψηφιοποίησης και διαφορετικό αριθμό σημείων γεωγραφικής προσαρμογής. Η ακρίβεια προσδιορισμού θέσης κατά την ψηφιοποίηση χαρτών προσδιορίστη-

κε από τη σχέση: $\sigma = \pm \sqrt{(\sigma_x^2 + \sigma_y^2)}$. Για τον ψηφιοποιητή έχει ληφθεί $\sigma_0 = .127\text{mm}$, για το σαρωτή $\sigma_0 = .085\text{mm}$. Όπως φαίνεται στον πίνακα 2, αλλά και το σχήμα 1 με εννέα σημεία γεωγραφικής προσαρμογής επιτυγχάνεται ικανοποιητική ακρίβεια.



Σχήμα 1. Ακρίβεια ψηφιοποίησης σαν συνάρτηση του αριθμού σημείων γεωγραφικής προσαρμογής.

Εξετάζοντας πειραματικά δεδομένα της συμπεριφοράς του ομοπαράλληλου μετασχηματισμού καταλήγουμε στα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η απεικόνιση του προβολικού συστήματος, στο οποίο αναφέρεται ο χάρτης, επηρεάζει το μέσο τετραγωνικό σφάλμα του μετασχηματισμού.
- Όσο μικραίνει η έκταση της επιφάνειας, τόσο ελαττώνεται και η τιμή του μέσου τετραγωνικού σφάλματος σε όλες τις απεικονίσεις.
- Στις ορθές απεικονίσεις το μέσο τετραγωνικό σφάλμα κατά τον άξονα X είναι μηδενικό. Στις κωνικές και στις εγκάρσιες απεικονίσεις το μέσο τετραγωνικό σφάλμα κατά τον άξονα X εμφανίζει πολύ μεγαλύτερες τιμές απ' ό,τι κατά τον άξονα Y.

3.2. Χαρτογραφικές απεικονίσεις

Βασική αρχή της χαρτογραφίας αποτελεί η απεικόνιση υπό σμίκρυνση τμήματος της επιφάνειας της γης ή ολόκληρης της γης σε ένα επίπεδο, το επίπεδο του χάρτη. Η επιφάνεια της γης είναι αρκετά πολύπλοκη, ώστε ο μαθηματικός προσδιορισμός της να είναι αδύνατος. Για τις ανάγκες των γεωεπιστημών, η γήινη επιφάνεια προσομοιώνεται από κατάλληλα στερεά σώματα που έχουν τη μορφή ελλειψοειδούς εκ περιστροφής. Η απεικόνιση της επιφάνειας ενός ελλειψοειδούς στο επίπεδο συνοδεύεται πάντα από παραμορφώσεις, δεδομένου ότι η επιφάνεια αυτή παρουσιάζει διπλή καμπυλότητα. Η διαδικασία με την οποία γίνεται η απεικόνιση ονομάζεται χαρτογραφική προβολή. Οι παραμορφώσεις που προκαλούν οι χαρτο-

γραφικές προβολές αναφέρονται σε αλλοιώσεις της μορφής και του μεγέθους στοιχειωδών σχημάτων, δηλαδή σε παραμορφώσεις γωνιών, εμβαδών και μηκών. Είναι, βέβαια, αδύνατο να επινοηθεί κάποια χαρτογραφική προβολή που να μην επιφέρει παραμορφώσεις, μπορούν όμως να κατασκευαστούν προβολές που να διατηρούν τα σχήματα (σύμμορφες), ή τα εμβαδά (ισοδύναμες), ή, τέλος, τα μήκη σε ορισμένες μόνο διευθύνσεις (ισαπέχουσες).

Το γεγονός ότι κάθε χάρτης είναι χτισμένος πάνω σε κάποιο συγκεκριμένο σύστημα προβολής έχει σαν άμεσο επακόλουθο την ύπαρξη αιτιοκρατικών αλλοιώσεων, των παραμορφώσεων. Οι γεωμετρικές αυτές αλλοιώσεις είναι αιτιοκρατικές, γιατί, με δεδομένο το νόμο της προβολής, μπορούν να προσδιοριστούν από παράγωγες σχέσεις. Πολλές φορές το μέγεθος των γεωμετρικών αλλοιώσεων, λόγω της κλίμακας του χάρτη ή της έκτασης της περιοχής που απεικονίζεται μπορεί να είναι ασήμαντες. Η διαπίστωση, όμως, αυτή με κανένα τρόπο δεν αποτελεί κανόνα και, δυστυχώς, πολλές φορές ενώ οι παραμορφώσεις δεν είναι ασήμαντες σε σχέση με την πραγματικότητα, δεν λαμβάνονται υπόψη κατά τη δημιουργία μιας βάσης δεδομένων.

Η εκτίμηση του μεγέθους των παραμορφώσεων σε μορφή, εμβαδό και μήκη που επιφέρουν οι χαρτογραφικές προβολές, μπορεί να διερευνηθεί με πειραματικά δεδομένα. Παρουσιάζεται στα πλαίσια της εισήγησης αυτής η διερεύνηση των παρακάτω προβολών:

Ορθή μερκατορική (σύμμορφη).

Ορθή κυλινδρική ισοδύναμη.

Εγκάρσια μερκατορική (σύμμορφη).

Κωνική σύμμορφη Lambert.

Κωνική ισαπέχουσα.

Κωνική Albers (ισοδύναμη).

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν είναι τα ακόλουθα:

- Η ορθή κυλινδρική ισοδύναμη παρουσιάζει τις μεγαλύτερες παραμορφώσεις σε εμβαδό και μήκη, ενώ η εγκάρσια μερκατορική τις μικρότερες.
- Η ορθή μερκατορική προβολή παρουσιάζει μεγάλες παραμορφώσεις στο εμβαδό. Οι παραμορφώσεις στην απεικόνιση αυτή αυξάνονται όσο απομακρυνόμαστε από τον ισημερινό.
- Η ορθή μερκατορική και ορθή κυλινδρική ισοδύναμη προβολή παρουσιάζουν πολύ μεγάλες παραμορφώσεις όσο πλησιάζουμε στους πόλους.
- Η εγκάρσια μερκατορική προβολή παρουσιάζει παραμορφώσεις που αυξάνουν όσο απομακρυνόμαστε από τον κεντρικό μεσημβρινό, ανάλογα με το τετράγωνο της απόστασης από αυτόν.
- Στις κωνικές απεικονίσεις η παραμόρφωση του εμβαδού και των μηκών παρουσιάζει τη μορφή μιας καμπύλης υπερβολής, που, βέβαια, μηδενίζεται στον παράλληλο επαφής του κώνου με το ελλειψοειδές.
- Από τις μη σύμμορφες προβολές, τις μεγαλύτερες παραμορφώσεις σε μορφή παρουσιάζει η ορθή κυλινδρική ισοδύναμη και ακολουθούν με μικρότερες, αλλά σημαντικές, η κωνική Albers και η κωνική ισαπέχουσα προβολή.

3.3. Χαρτογραφική γενίκευση

Η απεικόνιση της πραγματικότητας στους χάρτες υπό σμίκρυνση γίνεται για λόγους εποπτείας του γεωγραφικού χώρου. Η σμίκρυνση, όμως, προϋποθέτει και αφαίρεση πληροφορίας, διαδικασία η οποία στη χαρτογραφία ονομάζεται γενίκευση. Η γενίκευση γίνεται, αφ' ενός στα χωρικά δεδομένα, αφ' ετέρου, όμως, και στα θεματικά δεδομένα του γεωγραφικού χώρου (περιγραφικά).

Για τις ανάγκες της γενίκευσης έχουν επινοηθεί και χρησιμοποιούνται σήμερα έξυπνοι αλγόριθμοι κατάλληλοι για σημειακά, γραμμικά ή επιφανειακά δεδομένα. Είναι γεγονός ότι ένα μεγάλο ποσοστό (80%) της πληροφορίας που περιλαμβάνει κάθε χάρτης συνίσταται τελικά από γραμμικά δεδομένα. Ο μεγαλύτερος φόρτος στη διαδικασία της γενίκευσης ενός χάρτη, επομένως, ανάγεται στην αντιμετώπιση αυτής της περίπτωσης. Από τους υπάρχοντες αλγόριθμους, που είναι κατάλληλοι σήμερα για τη διαδικασία της γενίκευσης γραμμικών δεδομένων, ο αλγόριθμος των Douglas - Peucker παρουσιάζει πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα.

Η δημιουργία μιας βάσης δεδομένων από την ψηφιοποίηση υπαρχόντων χαρτών, λόγω της γενίκευσης, παρουσιάζει ένα σημαντικό πρόβλημα. Το πρόβλημα αναφέρεται στο γεγονός ότι η διαδικασία της γενίκευσης σαν αφαιρετικός μετασχηματισμός αλλοιώνει τις θέσεις των γεωγραφικών δεδομένων, με αποτέλεσμα να επιφέρει αναπόφευκτα σφάλματα. Διαπιστώνεται, λοιπόν, ένα βασικό ερώτημα: Ποιο είναι το μέγεθος αυτών των σφαλμάτων και με ποιο τρόπο τα σφάλματα αυτά επιδρούν στους χάρτες που συντίθενται;

Η διερεύνηση του παραπάνω ερωτήματος έγινε με τη βοήθεια πειραματικών δεδομένων, αξιοποιώντας τον αλγόριθμο των Douglas and Peucker στο περιβάλλον ενός Συστήματος Γεωγραφικών Πληροφοριών.

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν είναι τα ακόλουθα:

- Επιβεβαιώθηκαν τα πλεονεκτήματα του αλγόριθμου των Douglas and Peucker, δεδομένου ότι διατηρείται ακόμα και σε μεγάλους βαθμούς γενίκευσης η μορφή των αρχικών δεδομένων.
- Το σφάλμα γενίκευσης στο εμβαδό είναι άμεσα συνδεδεμένο με το μέγεθος των πολυγώνων των δεδομένων. Όσο μεγαλύτερα είναι τα πολύγωνα, τόσο μικρότερο είναι το αναλογικό σφάλμα στο εμβαδόν τους.
- Το σφάλμα γενίκευσης στα μήκη (περίμετρος) είναι άμεσα συνδεδεμένο με την πολυπλοκότητα της μορφής των πολυγώνων των δεδομένων. Όσο πιο απλή είναι η μορφή, τόσο πιο μικρό είναι το αναλογικό σφάλμα στο μήκος. Η πολυπλοκότητα όμως της μορφής δεν επιδρά στο σφάλμα του εμβαδού των πολυγώνων.
- Στα πολύγωνα με κανονικό σχήμα το σφάλμα γενίκευσης στο εμβαδό αυξάνει ομαλά σε σχέση με το βαθμό γενίκευσης. Ενώ στα πολύγωνα με ακανόνιστο σχήμα, για μικρούς βαθμούς γενίκευσης το σφάλμα γενίκευσης στο εμβαδό είναι μικρό και αυξάνει απότομα όταν ο βαθμός γενίκευσης παίρνει μεγάλες τιμές.
- Η διαδικασία της εξομάλυνσης, σαν τελικό στάδιο της γενίκευσης με σκοπό την αισθητική βελτίωση των γραμμικών δεδομένων, επειδή τροποποιεί τις θέσεις των γενικευμένων σημείων μιας γραμμής, επιφέρει επιπρόσθετα σφάλματα στο εμβαδό και στα μήκη των δεδομένων.

Ευχαριστώ πάρα πολύ, είμαι έτοιμος να δεχθώ ερωτήσεις.

Βιβλιογραφία

Burrough P. A. Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment. Clarendon Press. Oxford. 1986.

Clarke K. C. Analytical and computer cartography. Prentice Hall. 1990.

Goodchild M. and G. Sucharita. The accuracy of spatial

data bases. Taylor and Franses 1989.

Mikhail F.M. and F. Ackermann. Observations and Least Squares. T.Y. Crowell Co. 1976.

Μπαλοδήμου Α. Μ. Ειδικά Θέματα Θεωρίας Σφαλμάτων και Μέθοδος Ελαχίστων Τετραγώνων. Τμήμα Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών ΕΜΠ. Αθήνα, 1983.

Muller J. C. The concept of error in cartography. Cartographica. Vol. 24, No. 2, pp. 1-15. 1987.

Νάκος Β. Ψηφιακή απεικόνιση χαρτογραφικών φαινομένων βασισμένη στη θεωρία της κλασματικής γεωμετρίας. Εφαρμογή στο τοπογραφικό ανάγλυφο με ψηφιακά μοντέλα. Διδακτορική διατριβή. Τμήμα Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών ΕΜΠ. Αθήνα 1990.

Νάκος Β. Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών. Μια τεχνολογία για την ανάλυση του γεωγραφικού χώρου. Ανακοίνωση στο επιστημονικό διήμερο του ΤΕΕ. Οι Μηχανικοί και Εφαρμογές Πληροφορικής. Αθήνα 6 & 7 Δεκ. 1990.

Νάκος Β. και Β. Φιλιππακοπούλου. Θεματική χαρτογραφία. Τμήμα Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών ΕΜΠ. Αθήνα 1991.

Robinson A. H., R. D. Sale, J. L. Morrison and P. C. Muercke. Elements of Cartography. (5th edition). John

Wiley and Sons. 1984.

Παρασχάκης Ι., Μ. Παπαδοπούλου και Π. Πατιάς. Αυτοματοποιημένη Χαρτογραφία. Εκδόσεις Ζήτη. Θεσσαλονίκη. 1990.

Παρασχάκης Ι., Μ. Παπαδοπούλου και Π. Πατιάς. Σχεδίαση με Η/Υ. Εκδόσεις Ζήτη. Θεσσαλονίκη 1990.

Peuquet D. J. and D. F. Marble, Introductory readings in Geographic Information Systems. Taylor & Fransis Ltd. London. 1990.

Ripple W. J. (ed.). Fundamentals of Geographic Information Systems: A Compendium. ASPRS & ACSM. 1989.

Star J. and J. Estes. Geographic Information Systems. An Introduction. Prentice Hall. 1990.

Στεφανάκης Ε. Αναγνώριση και εκτίμηση του σφάλματος στις βάσεις χαρτογραφικών στοιχείων. Διπλωματική εργασία ΤΑΤΜ ΕΜΠ. Ιούνιος 1992.

Τσούλος Λ. Ψηφιακή Χαρτογραφία. Τμήμα Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών ΕΜΠ. Αθήνα. 1991.

Τσούλος Λ. Σφάλματα στις βάσεις Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών. Ανακοίνωση στη διημερίδα Δήμου Κω «Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών και Τοπική Αυτοδιοίκηση». Οκτώβριος 1993.