

Γεωδαιτικές μέθοδοι ελέγχου των μικρομετακινήσεων του γήινου φλοιού και εφαρμογές στο δίκτυο Βόλβης

Χ. Πικριδάς, Δ. Ρωσσικόπουλος, Κ. Τοκμακίδης, Α. Φωτίου

Τομέας Γεωδαισίας και Τοπογραφίας, Πολυτεχνική Σχολή, ΤΑΤΜ - ΑΠΘ.

Περίληψη

Στην εργασία αυτή γίνεται μια σύντομη αναφορά στις μεθόδους ανάλυσης των *διαχρονικών δικτύων* που ιδρύονται με σκοπό την εκτίμηση των μεταβολών της θέσης των κορυφών τους και τον προσδιορισμό της παραμόρφωσης του γήινου φλοιού. Παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα από την εφαρμογή ορισμένων από τις μεθόδους αυτές, που επιλέγονται ανάλογα με το είδος των παρατηρήσεων, τον τρόπο παραμόρφωσης και γενικότερα τις διαθέσιμες γεωφυσικές πληροφορίες, στην επεξεργασία των μετρήσεων του δικτύου Βόλβης.

1. Εισαγωγή

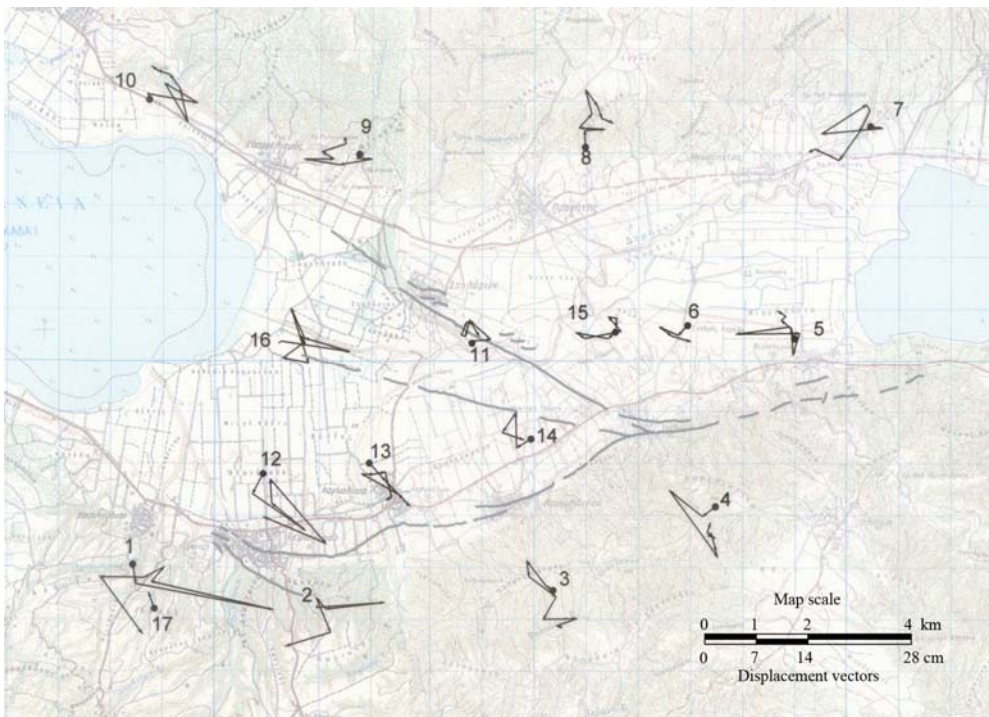
Όπως είναι γνωστό το καλοκαίρι του 1978 στην περιοχή των λιμνών Κορώνειας και Βόλβης παρατηρήθηκε μια έντονη σεισμική δραστηριότητα που κορυφώθηκε στις 20 Ιουνίου με το μεγάλο σεισμό μεγέθους 6.5 μονάδων της κλίμακας Richter. Ο σεισμός αυτός προκάλεσε μεγάλες καταστροφές στα γύρω χωριά και στην πόλη της Θεσσαλονίκης, όπου η κατάρρευση μιας πολυκατοικίας στοίχισε τη ζωή σε 49 άτομα. Από την τότε Έδρα Τοπογραφίας του ΑΠΘ εγκαταστάθηκε στην ευρύτερη επικεντρική περιοχή ένα δίκτυο ελέγχου μικρομετακινήσεων 16 κορυφών, που ονομάστηκε “δίκτυο Βόλβης”, με σκοπό τη συνεχή παρακολούθηση των παραμορφώσεων του εδάφους και της σεισμικής συμπεριφοράς των επιφανειακών ρηγμάτων που παρατηρήθηκαν μετά το σεισμό και γενικότερα με σκοπό τη συμβολή στην έρευνα για την πρόγνωση των σεισμών, (Βλάχος, 1980). Στο δίκτυο αυτό έχουν γίνει μέχρι το 1990 έντεκα σειρές μετρήσεων γωνιών, αποστάσεων και υψομετρικών διαφορών ενώ τα έτη 1995, 1997, 2003 και το 2008 έγιναν μετρήσεις GPS και προσπάθειες επέκτασής του ώστε να καλύψει την ευρύτερη περιοχή των λιμνών Κορώνειας και Βόλβης, (Rossikopoulos and Fotiou 2001, Fotiou et al. 2003, Doukas et al. 2004).

Για την εκτίμηση των μετακινήσεων είναι ανάγκη το δίκτυο να μετριέται σε διάφορες εποχές. Σε κάθε εποχή υπολογίζονται οι συντεταγμένες των κορυφών του οι οποίες αναπαριστούν την γεωμετρία του δικτύου της εποχής, ορίζουν δηλαδή το σχήμα και το μέγεθός του. Οι μετακινήσεις μπορούν να εκτιμηθούν σε ένα δεύτερο βήμα, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της συνόρθωσης κάθε εποχής ή να προκύ-

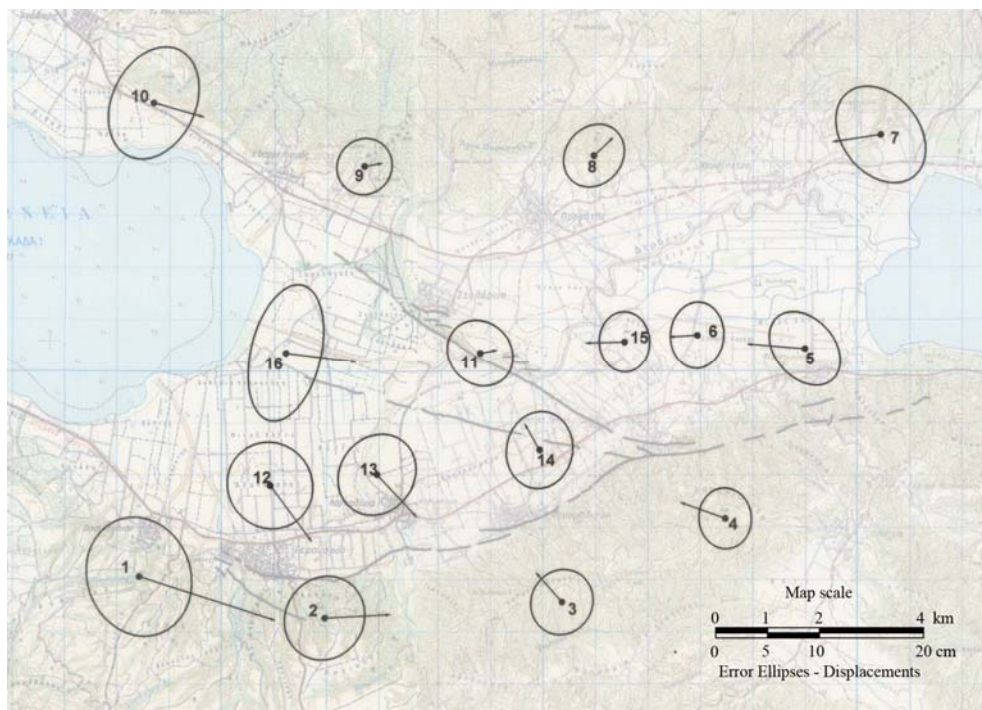
ψουν από την ταυτόχρονη συνόρθωση όλων των διαχρονικών παρατηρήσεων. Έτσι, η διαχρονική μεταβολή του δικτύου μπορεί να αντιμετωπισθεί από δύο σκοπιές: τη στατική, όπου συγκρίνονται διαφορετικές μορφές του δικτύου σε διαφορετικές εποχές, δηλαδή γίνεται η συνόρθωση του δικτύου κατά εποχή και στη συνέχεια συγκρίνονται τα αποτελέσματα για τον εντοπισμό και την εκτίμηση των μετακινήσεων, και τη δυναμική, όπου μελετάται αυτή καθαυτή η παραμόρφωση του δικτύου καθώς αναλύονται οι παρατηρήσεις όλων των εποχών ταυτόχρονα.

2. Η ανάλυση των παρατηρήσεων

Τη δημοφιλέστερη αντιμετώπιση ανάλυσης παραμορφώσεων στη γεωδαιτική βιβλιογραφία αποτελεί η σύγκριση των εποχών ανά δύο μεταξύ τους και η εφαρμογή μεθόδων παρεμβολής και πρόγνωσης, όπως είναι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων, η αναλυτική παρεμβολή ή η σημειακή προσαρμογή. Οι μετακινήσεις θεωρούνται εξαρτημένες μεταξύ τους στο χώρο και όλοι οι υπολογισμοί γίνονται σύμφωνα με τα παρακάτω βήματα:



Σχήμα 1. Το δίκτυο Βόλβης με τα 16 σημεία όπως ιδρύθηκε το 1979 και οι διαδοχικές μετακινήσεις μεταξύ των εποχών μέτρησης μέχρι το 1997. Στο χάρτη φαίνονται τα τρία ρήγματα που σχηματίστηκαν μετά το σεισμό της 20^{ης} Ιουνίου του 1978.



Σχήμα 2. Οι μετακινήσεις μεταξύ των εποχών 1979-81 και οι ελλείψεις εμπιστοσύνης τους για πιθανότητα 95%.

α. Συνόρθωση των παρατηρήσεων της κάθε εποχής: $\mathbf{b} = \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{v}$.

Γίνονται οι χωριστές συνορθώσεις ανά εποχή, αξιολογούνται στατιστικά τα αποτελέσματα και τελικά προκύπτουν οι συντεταγμένες των κορυφών του δικτύου για κάθε εποχή καθώς και ο πίνακας συµμεταβλητοτήτων τους.

β. Βέλτιστη προσαρμογή των συντεταγμένων μεταξύ των εποχών.

Απαλείφονται οι διαφορές των συντεταγμένων που οφείλονται στο διαφορετικό ορισμό του συστήματος αναφοράς των προηγούμενων συνορθώσεων, φέροντας σε βέλτιστη θέση τις συντεταγμένες της κάθε εποχής ως προς τις συντεταγμένες της εποχής αναφοράς, (της πρώτης συνήθως εποχής μέτρησης), με τη βοήθεια άκαμπτου μετασχηματισμού, όταν στις δύο εποχές έχουν γίνει μετρήσεις αποστάσεων, ή μετασχηματισμού ομοιότητας σε άλλη περίπτωση, στις 2 ή 3 διαστάσεις ανάλογα με τη μορφή των παρατηρήσεων. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται σύνδεση των διαχρονικών μορφών του δικτύου. Οι μορφές του δικτύου στις διάφορες εποχές μπορούν να θεωρηθούν ότι είναι συνδεδεμένες μεταξύ τους αν στις χωριστές συνορθώσεις χρησιμοποιηθούν οι ίδιες προσεγγιστικές συντεταγμένες για τα σημεία και επιπλέον, το πρόβλημα του ορισμού του συστήματος αναφοράς αντιμετωπιστεί εισάγοντας (μερικές) εσωτερικές δεσμεύσεις για την ομάδα όμως των σημείων

εκείνων που εμφανίζονται σε όλες τις εποχές. Με αυτόν τον τρόπο αντιμετωπίστηκε το πρόβλημα της σύνδεσης των διαχρονικών μορφών του δικτύου Βόλβης. Στο Σχήμα 1 δίνονται οι διαδοχικές μετακινήσεις των κορυφών του δικτύου μεταξύ των εποχών μέτρησης μέχρι το 1997 και στο Σχήμα 2 δίνονται οι μετακινήσεις 1979-1981 και οι ελλείψεις εμπιστοσύνης των μετακινήσεων για πιθανότητα 95%.

Σχετικά με το δίκτυο GPS (1995, 1997) μια εναλλακτική μεθοδολογία συνόρθωσης στις δύο διαστάσεις, είναι να χρησιμοποιήσουμε ως παρατηρήσεις τις ανηγμένες αποστάσεις του GPS και τα αντίστοιχα ανηγμένα αξιμούθια στο προβολικό επίπεδο, όπου αναφέρεται και το κλασικό δίκτυο. Απομονώνουμε, δηλαδή, τη γεωμετρική πληροφορία για τις 2-διαστάσεις, αγνοώντας την υψομετρική, (κατακόρυφες γωνίες ή υψομετρικές διαφορές), που δεν μας απασχολεί εδώ (Fotiou et al., 2003). Για να αποφευχθεί ο πιθανός κίνδυνος της μη σωστής σχετικής ακρίβειας ανάμεσα στα αξιμούθια και στις αποστάσεις, προτιμήθηκε να συνορθωθεί το δίκτυο GPS στις δύο διαστάσεις ως τριπλευρικό, με εσωτερικές δεσμεύσεις, και προσεγγιστικές συντεταγμένες αυτές των σημείων του κλασικού δικτύου.

γ. Ανάλυση των παραμορφώσεων με μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων, αναλυτικής παρεμβολής ή σημειακής προσαρμογής.

Οι διορθωμένες μεταβολές των συντεταγμένων, οι μετακινήσεις, θεωρούνται τιμές αγνώστων συναρτήσεων της θέσης των κορυφών του δικτύου, που μπορούν να προσεγγισθούν όμως από συναρτήσεις γραμμικής μορφής του τύπου $\mathbf{u}_i = \mathbf{\Phi}(\mathbf{r}_i) \mathbf{a}$, όπου \mathbf{u}_i είναι το διάνυσμα των «μετακινήσεων» του σημείου i , \mathbf{a} οι άγνωστες παράμετροι και $\mathbf{\Phi}(\mathbf{r}_i)$ ο γνωστός πίνακας των συντελεστών των αγνώστων, (τα στοιχεία του είναι οι τιμές γνωστών συναρτήσεων της θέσης του i). Συνήθως στη μελέτη των παραμορφώσεων του γήινου φλοιού για τη δημιουργία τέτοιων συναρτήσεων χρησιμοποιούνται εργαλεία από τη θεωρία ελαστικότητας και οι παράμετροι με περισσότερο ενδιαφέρον είναι η διασταλτικότητα, (dilatation) Δ και η μέγιστη διατμητική παραμόρφωση, (maximum shear strain) γ . Για μια συστηματική μελέτη της θεωρίας των παραμορφώσεων και των εφαρμογών της στη γεωδαισία και τη γεωδυναμική παραπέμπουμε στην εργασία *Applications of deformation analysis in Geodesy and Geodynamics* (Dermanis and Livieratos, 1983).

Το θεωρητικό υπόβαθρο της σημειακής προσαρμογής και η ισοδυναμία ανάμεσα στην αναλυτική παρεμβολή και τη στοχαστική πρόγνωση με το κριτήριο της ελάχιστης μεταβλητότητας παρουσιάζεται στην εργασία *Θεωρία και Εφαρμογή της μεθόδου της σημειακής προσαρμογής σε τοπογραφικά προβλήματα* (Δερμάνης, 1984). Ο όρος σημειακή προσαρμογή, (collocation) αποτελεί τη γενική ονομασία μεθόδων που έχουν αναπτυχθεί περίπου στη δεκαετία του 70 και έχουν εφαρμοσθεί στην ανάλυση δεδομένων σχετικών με το πεδίο βαρύτητας της γης. Οι μέθοδοι αυτές εφαρμόζονται σήμερα και σε άλλα επιστημονικά προβλήματα για την ανάλυση παρατηρήσεων που συνδέονται με μεγέθη τα οποία εξαρτώνται από μία άγνωστη συνάρτηση, όπως είναι αυτό της ανάλυσης των παραμορφώσεων από

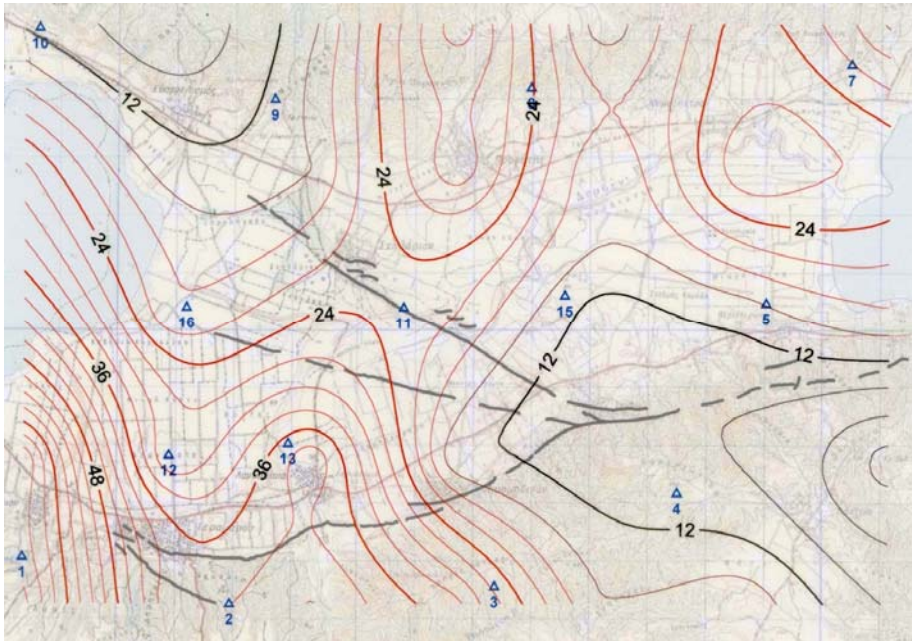
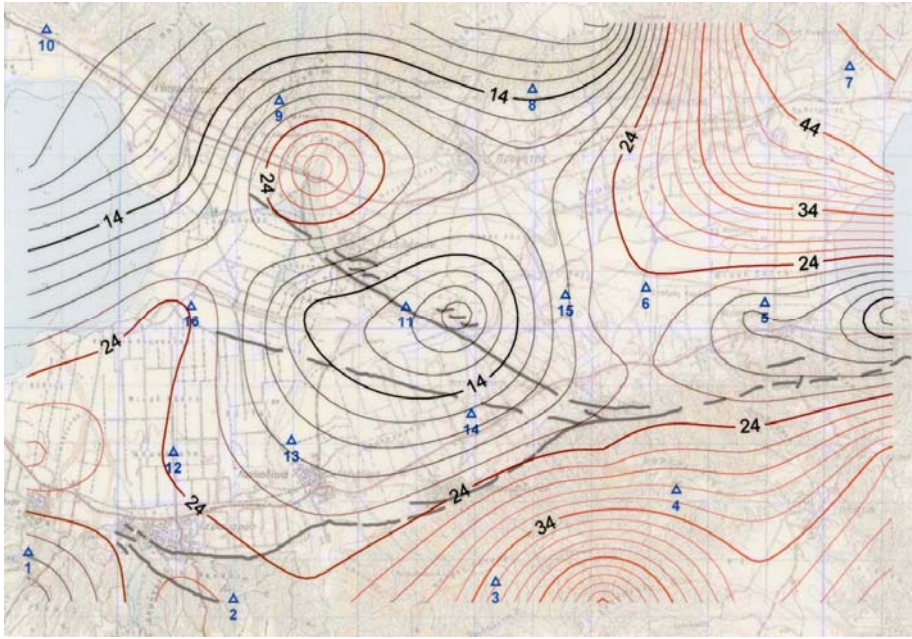
γεωδαιτικά δεδομένα. Η εφαρμογή της μεθόδου στην ανάλυση των δεδομένων του δικτύου της Βόλβης, για τον υπολογισμό της διασταλτικότητας Δ και της μέγιστης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε κάθε σημείο στην περιοχή που καλύπτει το δίκτυο, παρουσιάζεται στην εργασία *Geodetic prediction of crustal deformations at the seismic area of Volvi* (Dermanis et al., 1981). Στα Σχήματα 3α και 3β παρουσιάζονται οι ισარიθμηκές καμπύλες της μέγιστης διατμητικής παραμόρφωσης των εποχών 1981-1982, 1983-1989, 1990-1995 και 1995-1997, όπως προκύπτουν από την εφαρμογή της πιστής σημειακής προσαρμογής.

Οι μέθοδοι της αναλυτικής παρεμβολής, όπως εφαρμόζονται στην ανάλυση των παραμορφώσεων, αποτελούν μία πιστή προσαρμογή των αναλυτικών συναρτήσεων που περιγράφουν τις μετακινήσεις στις μεταβολές των συντεταγμένων. Εμφανίζεται το πρόβλημα της επιλογής της αναλυτικής συνάρτησης για την περιγραφή τους. Η επιλογή μιας αναλυτικής συνάρτησης εξαρτάται από τον τρόπο παραμόρφωσης του φλοιού ή του τεχνικού έργου. Συνήθως, δημιουργούνται αναλυτικές συναρτήσεις πολυωνυμικού τύπου με τη βοήθεια εργαλείων που προσφέρει η εφαρμογή μεθόδων της θεωρίας ελαστικότητας, (βλ. π.χ. Brunner et al. 1981, Chrzanowski et al. 1983). Άλλο παράδειγμα επιλογής είναι τα πολώνυμα Hermite κατά x και Legendre κατά y (Astariadis et al., 1988).

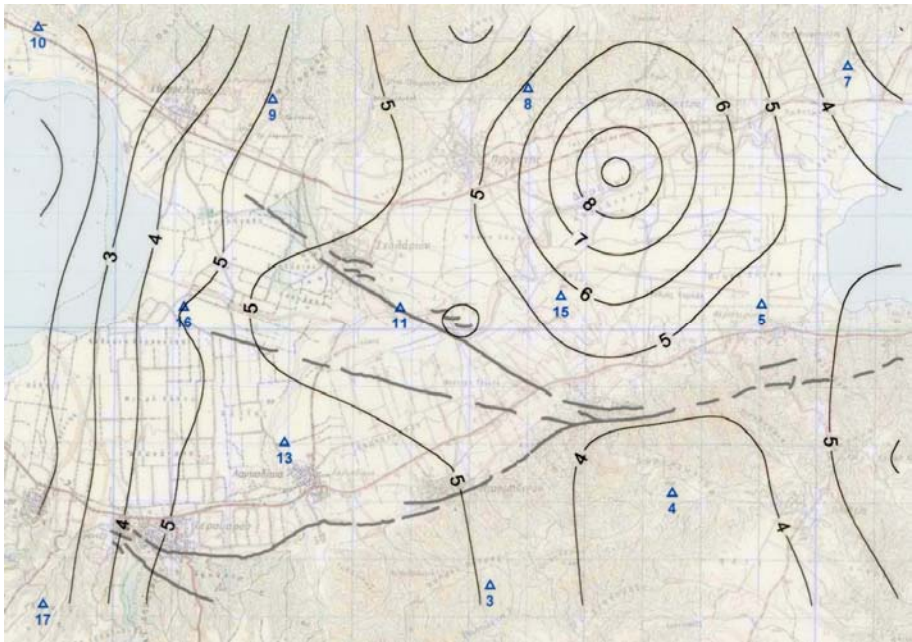
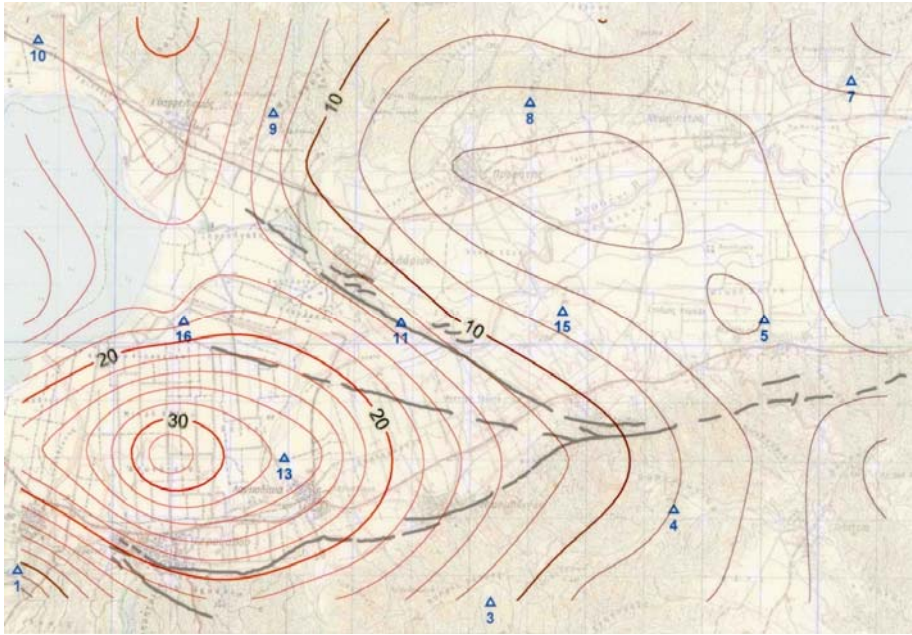
Η μέθοδος με τα πεπερασμένα στοιχεία, (finite elements method) είναι μια αριθμητική μέθοδος που εφαρμόζεται για ακριβή λύση σύνθετων προβλημάτων της μηχανικής, σε συνδυασμό όμως πάντοτε με μια από τις μεθόδους παρεμβολής. Κατά τη μέθοδο αυτή σχηματίζονται τρίγωνα μεταξύ των κορυφών του δικτύου, στο εσωτερικό των οποίων η παραμόρφωση θεωρείται σταθερή. Χρησιμοποιείται ευρύτατα στην Ιαπωνία σε σεισμολογικές εφαρμογές από γεωδαιτικές μετρήσεις (Livieratos 1980, Dermanis and Grafarend 1992). Στο Σχήμα 4β παρουσιάζονται οι ισარიθμηκές καμπύλες της διασταλτικότητας Δ της περιόδου 1983-89 για την περιοχή του δικτύου Βόλβης όπως προκύπτουν από την εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων.

Μια γενίκευση των μεθόδων παρεμβολής οδηγεί στη *διαχωρισμένη συνόρθωση* των παρατηρήσεων όπου εφαρμόζονται ειδικοί αλγόριθμοι με διαδοχικές συνορθώσεις και συνθετικές παρατηρήσεις, τα αποτελέσματα όμως πρέπει να ταυτίζονται με αυτά της ενιαίας συνόρθωσης. Εφαρμόζεται ανάλογα με τα διαθέσιμα δεδομένα, για παράδειγμα όταν δίνονται οι συντεταγμένες των κορυφών του δικτύου σε κάθε εποχή και ο πίνακας συμμεταβλητοτήτων τους. Γενικά, η ανάλυση ακολουθεί τα παρακάτω βήματα:

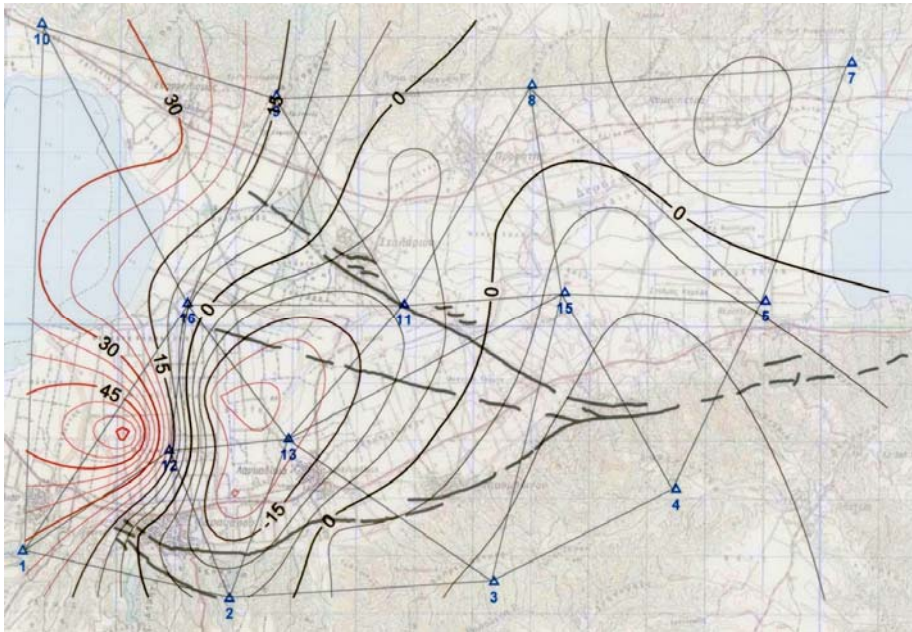
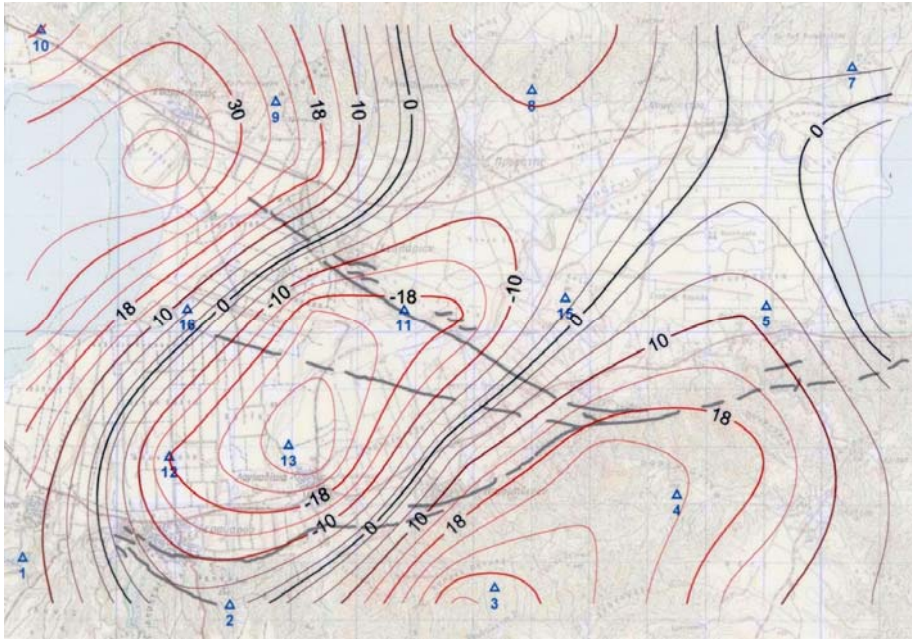
- α. Συνόρθωση κάθε εποχής: $\mathbf{b} = \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{v}$.
- β. Βέλτιστη προσαρμογή κάθε εποχής στην εποχή αναφοράς.
- γ. Συνόρθωση με το μοντέλο παραμόρφωσης: Οι συντεταγμένες της εποχής αναφοράς και οι μετασηματισμένες συντεταγμένες των άλλων εποχών είναι η παρατηρήσεις στην επόμενη συνόρθωση, που γίνεται μέσω ενός αναλυτικού ή



Σχήμα 3α. Ισαριθμικές καμπύλες της μέγιστης διατημητικής παραμόρφωσης ($\gamma \times 10^6$), των εποχών 1981-82 (πάνω) και 1983-89 (κάτω), όπως προκύπτουν από την εφαρμογή της πιστής σημειακής προσαρμογής



Σχήμα 3β. Ισαριθμικές καμπύλες της μέγιστης διατημητικής παραμόρφωσης ($\gamma \times 10^6$), των εποχών 1990-95 (πάνω) και 1995-97 (κάτω), όπως προκύπτουν από την εφαρμογή της πιστής σημειακής προσαρμογής.



Σχήμα 4. Ισαριθμικές καμπύλες της διασταλτικότητας ($\Delta \times 10^6$) της περιόδου 1983-89, όπως προκύπτουν από την εφαρμογή της πιστής σημειακής προσαρμογής (πάνω) και των πεπερασμένων στοιχείων (κάτω).

Πίνακας 1. Ταχύτητες μετακίνησης και ελλείψεις εμπιστοσύνης ($1-\alpha = 0.95$) των κοινών κορυφών παλαιού και διευρυσμένου δικτύου Βόλβης όπως προέκυψαν από την ανάλυση των των εποχών 1994, 1995, 1996, 1997 and 2003 (δίκτυο GPS).

Id	Ταχύτητες			Ελλείψεις Εμπιστοσύνης								
	(cm/year)			(x, y) επίπεδο			(x, z) επίπεδο			(y, z) επίπεδο		
	\hat{x}	\hat{y}	\hat{z}	a	b	ϑ	a	b	ϑ	a	b	ϑ
			(cm)	(cm)	(grad)	(cm)	(cm)	(grad)	(cm)	(cm)	(grad)	
1	0.47	0.07	0.11	1.24	0.69	71.85	1.37	0.77	56.06	1.17	0.65	34.46
3	0.08	0.04	0.04	0.62	0.32	71.60	0.70	0.37	57.22	0.55	0.35	30.40
4	0.70	0.32	0.48	1.02	0.50	68.40	1.12	0.57	54.78	0.92	0.57	31.04
5	-0.71	-0.17	-0.60	0.60	0.32	70.56	0.65	0.34	57.99	0.52	0.32	32.74
7	0.15	0.18	0.11	0.87	0.42	69.67	0.92	0.50	58.10	0.75	0.47	33.39
9	0.22	0.10	0.25	0.95	0.50	76.32	1.05	0.55	59.81	0.82	0.50	31.41
10	0.13	0.02	0.16	0.57	0.32	69.80	0.62	0.35	55.76	0.52	0.32	31.87
13	-0.07	0.03	-0.09	0.11	0.05	71.61	0.12	0.06	56.44	0.09	0.05	27.86
15	0.21	0.15	0.12	0.72	0.37	70.68	0.77	0.45	58.91	0.62	0.42	31.30
16	-0.71	-0.32	-0.70	0.67	0.35	74.11	0.72	0.40	60.11	0.57	0.35	32.55

στοχαστικού μοντέλου παραμόρφωσης. Το σύστημα των εξισώσεων παίρνει τη μορφή

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}_0 + \mathbf{\Phi} \mathbf{a} + \mathbf{v}_p \quad (1)$$

όπου, για:

- μετακινήσεις συνδεδεμένες στο χώρο: $\mathbf{u}_i = \mathbf{\Phi}_\alpha(\mathbf{r}_i) \mathbf{a}_\alpha$
- μετακινήσεις συνδεδεμένες στο χρόνο: $\mathbf{u}_i = \mathbf{\Phi}_i(t_\alpha, t_\beta) \mathbf{a}_i$ (Papo and Perelmuter 1983, Vanicek et al. 1979, Welsch 1986)
- μετακινήσεις συνδεδεμένες στο χώρο και στο χρόνο: $\mathbf{u}_i = \mathbf{\Phi}(\mathbf{r}_i, t_\alpha, t_\beta) \mathbf{a}$ (Bibby 1982, Snay et al. 1983, Welsch 1986).

Αναλυτική εφαρμογή των παραπάνω με την εφαρμογή των στατιστικών ελέγχων σε όλα τα βήματα, για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων έγινε στην περίπτωση δικτύου GPS 9 κορυφών, στην περιοχή του Ιονίου πελάγους και της Αδριατικής, μεταξύ Ελλάδας και Ιταλίας. Οι παρατηρήσεις έγιναν τα έτη 1991, 1994 και 1995 στο πλαίσιο του προγράμματος TYRGEONET (Rossikopoulos et al., 1998). Στον Πίνακα 1 δίνονται οι ταχύτητες μετακίνησης των κορυφών του δικτύου Βόλβης, όπως προέκυψαν από αντίστοιχη εφαρμογή για τις εποχές 1994, 1995, 1996, 1997 and 2003 (δίκτυο GPS).

Στη δυναμική αντιμετώπιση των διαχρονικών δικτύων μελετάται αυτή καθαυτή η παραμόρφωση του δικτύου, συνορθώνοντας τις παρατηρήσεις όλων των εποχών ταυτόχρονα. Το απλό γεωμετρικό μοντέλο εφαρμόζεται στην ανάλυση των κλασικών παρατηρήσεων (οριζόντιων γωνιών και διευθύνσεων, υψομετρικών διαφορών,

αποστάσεων) ή των σύγχρονων γεωδαιτικών παρατηρήσεων (GPS, VLBI, SLR κλπ.). Το σύστημα των εξισώσεων παρατηρήσεων γράφεται για όλες τις εποχές

$$\mathbf{b} = \mathbf{A} \mathbf{x}_0 + \mathbf{B} \mathbf{u} + \mathbf{v} \quad (2)$$

όπου \mathbf{x}_0 είναι οι συντεταγμένες των κορυφών της εποχής αναφοράς και \mathbf{u} είναι το διάνυσμα των διαχρονικών τους μεταβολών (μετακινήσεων). Παίρνοντας υπόψη αναλυτικές σχέσεις της μορφής

$$\mathbf{u} = \mathbf{\Phi} \mathbf{a} \quad (3)$$

οι οποίες χρησιμοποιούνται για την περιγραφή των μετακινήσεων, το σύστημα των εξισώσεων παρατήρησης γράφεται

$$\mathbf{b} = \mathbf{A} \mathbf{x}_0 + \mathbf{B} \mathbf{\Phi} \mathbf{a} + \mathbf{v} \quad \text{ή} \quad \mathbf{b} = \mathbf{A} \mathbf{x}_0 + \mathbf{F} \mathbf{a} + \mathbf{v} \quad (4)$$

Όλες οι προηγούμενες παρατηρήσεις, συμπεριλαμβανομένων και παρατηρήσεων του πεδίου βαρύτητας, για τρισδιάστατα ή κατακόρυφα δίκτυα, μπορούν να αναλυθούν ταυτόχρονα εφαρμόζοντας τις αρχές της ολοκληρωμένης γεωδαισίας, όπου το σύστημα των εξισώσεων παρατήρησης παίρνει τη μορφή

$$\mathbf{b} = \mathbf{A} \mathbf{x}_0 + \mathbf{B} \mathbf{u} + \mathbf{G} \mathbf{s} + \mathbf{v} \quad (5)$$

με \mathbf{s} το διάνυσμα των παραμέτρων του πεδίου βαρύτητας. Μπορούν, επίσης, να χρησιμοποιηθούν και άλλες γεωφυσικές πληροφορίες που συνδέονται με τις μεταβολές του πεδίου βαρύτητας (Rossikopoulos 1986, Dermanis and Rossikopoulos 1987).

3. Συμπεράσματα

Παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των μετρήσεων του δικτύου Βόλβης, των ετών-εποχών 1979, 1980, 1981, 1982, 1983, 1989, 1990 (κλασικό δίκτυο με παρατηρήσεις αποστάσεων και γωνιών) και 1995, 1996, 1997, 2003, 2008 (δίκτυο GPS), μέσα από μια γενική αναφορά στις μεθόδους ανάλυσης των διαχρονικών δικτύων που ιδρύονται με σκοπό τον προσδιορισμό των παραμορφώσεων του γήινου φλοιού.

Οι μεγαλύτερες μετακινήσεις παρατηρούνται την περίοδο 1979-1983, κατά την οποία τα περισσότερα σημεία μετακινούνται σημαντικά, από 4 cm έως 8cm. Η διασταλτικότητα και η μέγιστη διατμητική παραμόρφωση παρουσιάζουν τιμές, αντίστοιχα, $\Delta = 20 \times 10^{-6} \sim 30 \times 10^{-6}$ κατά απόλυτη τιμή και $\gamma = 20 \times 10^{-6} \sim 40 \times 10^{-6}$.

Οι πλέον μικρότερες τιμές μετακίνησης παρουσιάζονται στην περίοδο 1995-2003, οι οποίες στηρίζονται σε αμιγώς δορυφορικές παρατηρήσεις. Οι μετακινήσεις την περίοδο αυτή δεν ξεπερνούν τα 2 cm και μάλιστα σε ορισμένα μόνο σημεία του δικτύου. Οι ταχύτητες παραμόρφωσης μετά το 1995, μερικά χιλιοστά ανά

έτος, κρίνονται στατιστικά ασήμαντες. Η διασταλτικότητα και η μέγιστη διατμητική παραμόρφωση παρουσιάζουν τιμές $\Delta = 0 \sim 10 \times 10^{-6}$ κατά απόλυτη τιμή και $\gamma = 2 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-6}$ αντίστοιχα.

Βιβλιογραφία

- Asteriadis, G., H. Schwan and D. Arabelos (1988). Analysis of a geodetic network using products of Legendre and Hermite polynomials for detecting real crustal movements. *Geophysical Journal*, 93, pp. 559-564.
- Bibby, H. M. (1982). Unbiased estimate of strain from triangulation data using the method of simultaneous reduction. *Tectonophysics*, 82, pp. 161-174.
- Βλάχος, Δ. (1980). Το δίκτυο ελέγχου μικρομετακινήσεων στην επίκεντρη περιοχή των σεισμών της Βόλβης. *Γεωδαιτικά Τετράδια*, 1 (1-31).
- Brunner, F. K., R. Coleman, B. Hirsch (1981). A comparison of computation methods for crustal strains from geodetic measurements. *Tectonophysics*, 71, pp. 281-298.
- Chrzanowski, A., Y.Q. Chen, J. M. Secord (1983). On the strain analysis of tectonic movements using fault crossing geodetic surveys. *Tectonophysics*, 97, 297-315.
- Dermanis, A., E. W. Grafarend (1992). The finite element approach to the geodetic computations of two and three dimensional deformation parameters. A study of frame invariance and Parameter Estimability. Presented at the *Int. Conference "Cartography-Geodesy", 5th Centenary of the Americas: 1492-1992*, Maracaiho, Venezuela, 24 November-3 December, 1992.
- Dermanis, A. and E. Livieratos (1983). *Applications of deformation analysis in Geodesy and Geodynamics*.
- Dermanis, A., E. Livieratos, D. Rossikopoulos, D. Vlachos (1981). Geodetic prediction of crustal deformations at the seismic area of Volvi. In: *Deutsche Geod. Komm., Reihe B, Heft Nr. 258/V*, 234-248.
- Dermanis, A., D. Rossikopoulos (1988). Modeling Alternatives in Four-dimensional Geodesy. Pres. at the *Int. Symp. Instrumentation, Theory and Analyses for Integrated Geodesy*, Sopron, May 16 to 20.
- Doukas, I, A. Fotiou, I. M. Ifadis, K. Katsambalos, K. Lakakis, N. Petridou- Chrysohoidou, C. Pikridas, D. Rossikopoulos, P. Savvaidis, K. Tokmakidis and I. N. Tziavos (2004). Displacement field estimation from GPS measurements in the Volvi area. In *Proc. of FIG 27th Working Week "The Olympic Spirit in Surveying"*, Athens, Greece, 22-27 May.
- Fotiou A., V. Kagiadakis, C. Pikridas and D. Rossikopoulos (2003). Geodetically derived displacements and crustal deformation analysis: Application in the Volvi area . In *Proc. of the 11th International Symposium on Deformation Measurements*, FIG commission 6, Santorini, Greece, 25-28 May.
- Fotiou A., C. Pikridas and D. Rossikopoulos (2003). Adjustment of 2-D Networks using geometric derived observations from GPS baselines. *Pres. at the Int. Symp. MODERN*

- Heck, B. (1985): Ein- und zweidimensionale Ausreißertests bei der ebenen Helmert-Transformation. *ZfV*, 10, pp. 461-471.
- Livieratos, E. (1980). Crustal deformation from geodetic measurements. *Boll. Geofis. Teor. Appl.*, 22(88), pp. 255-260.
- Papo, H. B., A. Perelmutter (1983). Reparametrization of Deformation Analysis. *Manuscripta Geodaetica*, Vol. 8, 41-58.
- Rossikopoulos, D. (1986). *Integrated Control Networks*. Ph.D. Dissertation, Aristotle University of Thessaloniki.
- Rossikopoulos, D., A. Fotiou, E. Livieratos and P. Baldi (1998). A rigorous analysis of GPS data to detect crustal deformations. Application in the area of the Ionian Sea. *Tectonophysics* 294, 271-280.
- Rossikopoulos, D. (2001). Modeling Alternatives in Deformation Measurements. In: *First International Symposium on Robust Statistics and Fuzzy Techniques in Geodesy and GIS*. Ed.: A. Carosio and H. Kutterer. ETH Zurich
- Rossikopoulos, D. and A. Fotiou (2001). The Sequential Approach in Geodetic Determination of Crustal Deformations. Poster presented at *IAG Scientific Assembly, Vistas for Geodesy in the New Millenium*. September 2-7, Budapest, Hungary.
- Snay, R. A., M. W. Cline, E. L. Timmerman (1983). Regional Deformation of the Earth Model for the San Diego Region, California. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 88, No. B6, pp. 5009-5024.
- Vanicek, P., M. R. Elliot, R. O. Castle (1979). Four-dimensional modeling of recent crustal movements in the area of the Southern California Uplift. *Tectonophysics*, 52, pp. 287-300.
- Welsch, W. M. (1986). Some aspects of the analysis of geodetic strain observations in kinematic models. *Tectonophysics*, 130, pp. 437-458.