

Εκτίμηση των ταχυτήτων μετακίνησης επιλεγμένων σημείων του Ελληνικού Χώρου από μετρήσεις GNSS

Σ. Μπίθαρης*

Μηχανικός Γεωπληροφορικής & Τοπογραφίας, ΤΕΙ Σεργρών
Κρίτωνος 3, 18010, Αίγινα

Σ. Κατσουγιαννόπουλος

Επιστημονικός Συνεργάτης, Τμήματος Γεωπληροφορικής & Τοπογραφίας, ΤΕΙ Σεργρών
Τέρμα Μαγνησίας, 62124, Σέρρες

*Τηλ.:2321049247, Φαξ: 2321049247, E-mail: stylbith@gmail.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι σε πρώτο στάδιο, η εκτίμηση των συντεταγμένων και των ταχυτήτων μετακίνησης επιλεγμένων σημείων, ενός γεωδαιτικού δικτύου εγκατεστημένου στην Ελλάδα. Για το λόγο αυτό κρίνεται σκόπιμη να γίνει αρχικά μια παρουσίαση της γεωδυναμικής συμπεριφοράς, του ευρύτερου Ελλαδικού χώρου, όπως αυτή καταγράφεται σε προγενέστερες μελέτες. Ο Ελληνικός χώρος χαρακτηρίζεται από έντονη μεταβλητότητα και αποτελεί σημείο έρευνας, αφού σχετίζεται με αρκετά γεωτεκτονικά φαινόμενα της ευρύτερης περιοχής. Η συμβολή της γεωδαισίας και των δικτύων GNSS (Global Navigation Satellite System), κρίνεται σημαντική καθώς υπολογίζονται χρήσιμες ποσότητες που μπορούν να αξιοποιηθούν στη συνέχεια σε γεωδυναμικές μελέτες, στην εκτίμηση παραμορφώσεων αλλά και στα γεωδαιτικά δίκτυα (και κατ' επέκταση και την τοπογραφία) για την εκτίμηση των χρονικών μεταβολών των διαφόρων χωρικών ποσοτήτων (πχ. συντεταγμένες). Η μελέτη αφορά το χρονικό διάστημα των ετών 2010- 2011, που βέβαια δεν επαρκεί για μια πλήρη διερεύνηση του χώρου, παρέχει όμως σημαντικά συγκριτικά στοιχεία. Το δίκτυο μελέτης, αποτελείται από 32 μόνιμους σταθμούς αναφοράς GNSS, από του οποίους οι 17 αφορούν την ελληνική επικράτεια, στο πλαίσιο αναφοράς του ITRF08. Παράλληλα γίνεται παρουσίαση αρκετών παρόμοιων μελετών και τα αποτελέσματα συγκρίνονται με αυτά που προέκυψαν από τις επιλύσεις. Τα αποτελέσματα κρίνονται ικανοποιητικά σε σχέση με τα αναμενόμενα επίπεδα ακριβείας, καθώς οι διαφορές με τις επίσημες επιλύσεις που παρουσιάζονται από τη EUREF, για τις οριζόντιες ταχύτητες μετακίνησης, κυμαίνονται από 0.6 mm/yr έως 2 mm/yr.

Λέξεις Κλειδιά: Παραμορφώσεις γήινου φλοιού, Ταχύτητες μετατόπισης, Μικρόπλακες, Δορυφορική Γεωδαισία, Δίκτυα μόνιμων σταθμών GNSS, Gamit / Globk, Τεκτονική, Πλαίσια αναφοράς

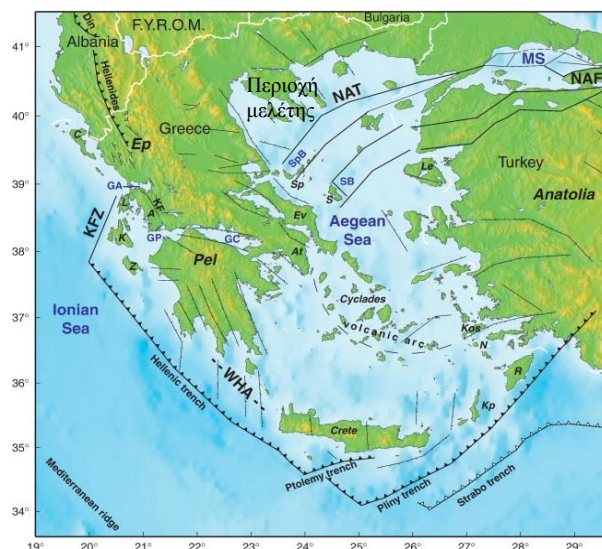
ABSTRACT: The main aim of the present work is to evaluate station coordinates and velocities over a network of GPS reference benchmarks of the Greek geodetic network. To this respect, first the geodynamic behavior of the wider Greek territory is presented alongside a review of relevant literature. The Hellenic territory is characterized by significant mutability and is a region of heavy geodynamic and geodetic research due to its intrinsic characteristics. The contribution of geodesy and GNSS (Global Navigation Satellite Systems) is of high importance to geodynamic research since valuable parameters can be estimated that can be used afterwards to determine deformations. Moreover, the contribution of the former to geodetic research is of main importance since time variations can be determined for geodetic networks. The analysis presented in this work covers the period between 2010-2011 and refer to a network of 32 permanent GNSS reference stations GNSS, 17 of which are located in Greece. The analysis is carried

out in ITRF08 while comparisons with results from existing research are carried out as well. The results are judged satisfying in comparison with the expected levels of accuracy, as the differences with official solutions presented by EUREF, for horizontal velocities, ranging from 0.6 mm/yr to 2 mm/yr.

Keywords: Crustal deformation, Movement velocities, Microplates, Satellite Geodesy, Permanent GNSS Networks, Gamit / Globk, Tectonics, Reference frames

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο Ελλαδικός χώρος χαρακτηρίζεται από μία έντονη γεωδυναμική μεταβλητότητα, καθώς βρίσκεται σε ένα κομβικό σημείο σύγκλισης δύο λιθοσφαιρικών πλακών, της Ευρασιατικής και της Αφρικανικής - Αραβικής. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την έντονη σεισμικότητα στις περιοχές σύγκλισης, ενώ αποτελεί μια από τις πιο ενεργές σεισμοτεκτονικές περιοχές στην Ευρώπη. Οι ισχυρές συμπίεστικές τάσεις που αναπτύσσονται, από τη σύγκλιση της ωκεάνιας πλάκας της Ανατολικής Μεσογείου, με αυτή του Αιγαίου, που αποτελεί τμήμα της Ευρασιατικής οδηγούν στην υποβύθιση της πρώτης, λόγω μεγαλύτερης πυκνότητας, ενώ η σχετική ταχύτητα υπολογίζεται στα 2,5 cm/yr [1]. Τα κυριότερα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά, είναι το ελληνικό τόξο, η ταύρος του βορείου Αιγαίου και το ηφαιστειακό τόξο (βλ. Εικόνα 1).



Εικόνα 1 - Γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά Ελλάδας (πηγή: [2])

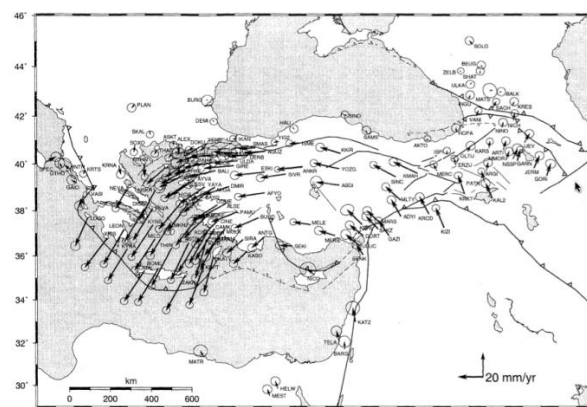
Ο ελλαδικός χώρος σύμφωνα με σχετικές μελέτες διαχωρίζεται σε επιμέρους πλάκες, μικρότερες της Ευρασιατικής, ο καθορισμός των οποίων πραγματοποιείται με βάση τη μελέτη της κινηματικής συμπεριφοράς επιλεγμένων σημείων ελέγχου. Σε παλαιότερες μελέτες [3] αυτό πραγματοποιούνταν με χρήση μεθόδων SLR ενώ σε νεώτερες ο διαχωρισμός γίνεται με τη συνεισφορά του GPS [4], [5], [6]. Η μοντελοποίηση και ο καθορισμός των ορίων για τις άκαμπτες επιφάνειες (μικρόπλακες), επιτυγχάνεται μέσω της εξέτασης και της ερμηνείας των διαφόρων πεδίων ταχύτητας, που παρουσιάζονται στο χώρο μελέτης. Η περιοχή του Αιγαίου παραμορφώνεται με ταχύτατους ρυθμούς, ενώ εμφανίζονται διαφορές στις ταχύτητες μετακίνησης 20 – 40 μμ/έτος [7]. Ακόμα σημαντικές εργασίες για τη μελέτη τεκτονικών μετατοπίσεων έχουν γίνει και για την περιοχή του Ιονίου [8], [9], αλλά και για την περιοχή των λιμνών Βόλβης και Λαγκαδά, στην οποία έχει παρουσιάσει έντονη σεισμική δραστηριότητα, από την οποία προήλθε ο ισχυρός σεισμός του 1978 [10], [11]. Ο Ελλαδικός χώρος αποτελεί κυρίαρχο πεδίο έρευνας και μελέτης, από τα σημαντικότερα ερευνητικά ιδρύματα όπως το MIT και το COMET+, καθώς χαρακτηρίζεται από πολύπλοκη μετακίνηση του φλοιού, παραμόρφωση, υψηλή σεισμική δραστηριότητα και έντονη ηφαιστειακή δραστηριότητα.

II. ΓΕΩΔΥΝΑΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΕΛΛΑΔΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ

Πρόσφατες μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί για τη μελέτη και προσέγγιση της γεωδυναμικής συμπεριφοράς της Ελλάδας, αλλά και της ευρύτερης Ανατολικής Μεσογείου [6], [7]. Οι κυριότερες τεχνικές που έχουν χρησιμοποιηθεί κατά το παρελθόν, βασίζονται σε παρατηρήσεις GPS και SLR σε συνδυασμό με γεωφυσικά δεδομένα σε ορισμένες από αυτές. Τα τελευταία χρόνια η συμβολή των σύγχρονων διαστημικών τεχνικών στη μελέτη τεκτονικών μετατοπίσεων παγκοσμίως είναι πολύ διαδομένη καθώς είναι δυνατόν να γίνει συλλογή γεωδαιτικής πληροφορίας σε μεγάλη έκταση. Επιπλέον, με την τεχνολογία των GNSS μπορεί να γίνει καταγραφή μετατοπίσεων αργής ολίσθησης (Slow Slip Events), η οποία δεν είναι εφικτό να καταγραφεί με σεισμόμετρα και αναφέρεται σε ζώνες υποβύθισης.

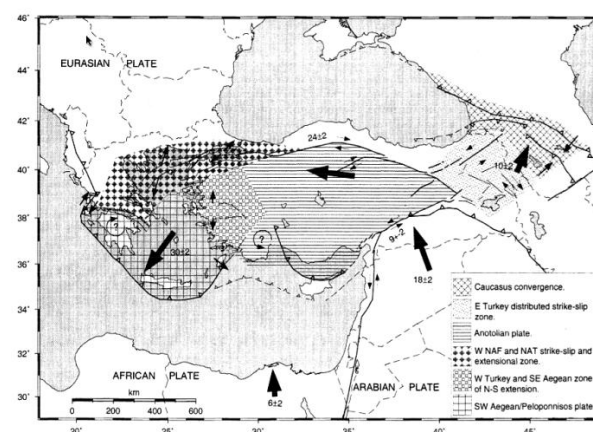
Παρατηρείται από το σύνολο των προγενέστερων μελετών, ανεξαρτήτως της τεχνικής που χρησιμοποιήθηκε, μια διαφορετική τάση μετακίνησης της βορείου Ελλάδος σε σχέση με αυτήν της νοτίου Ελλάδος και του Αιγαίου (βλ. Εικόνα 2.). Αυτό επαληθεύεται και από την εργασία που πραγματοποιήθηκε υπολογίζοντας στοιχεία τοπικών πόλων Euler, για όλες τις πλάκες που εμφανίζονται στο Εικόνα 3 [4]. Ακόμα, στην συγκεκριμένη εργασία παρουσιάστηκαν και οι οριζόντιες ταχύτητες

μετακίνησης σταθεροποιώντας διαδοχικά την πλάκα του Αιγαίου και της Ανατολίας, εκτός από αυτές που προέρχονται από την σταθεροποίηση της Ευρώπης όπως απεικονίζονται στο Εικόνα 2. Με τη βοήθεια μετρήσεων GPS έγινε ο καθορισμός των άκαμπτων επιφανειών στον ευρύτερο χώρο της Ανατολικής Μεσογείου και του Καυκάσου, για το χρονικό διάστημα από το 1988 έως 1997 με κατ' ελάχιστον χρονική περίοδο μέτρηση τα δύο (2) έτη για κάθε σημείο. Το πλαίσιο αναφοράς υλοποιήθηκε θέτοντας ως σταθερή την Ευρωπαϊκή πλάκα, δεσμεύοντας με μηδενικές ταχύτητες 14 Ευρωπαϊκούς σταθμούς στην κεντρική Ευρώπης [4].



Εικόνα 2 - Οριζόντιες ταχύτητες μετακίνησης (πηγή: [4])

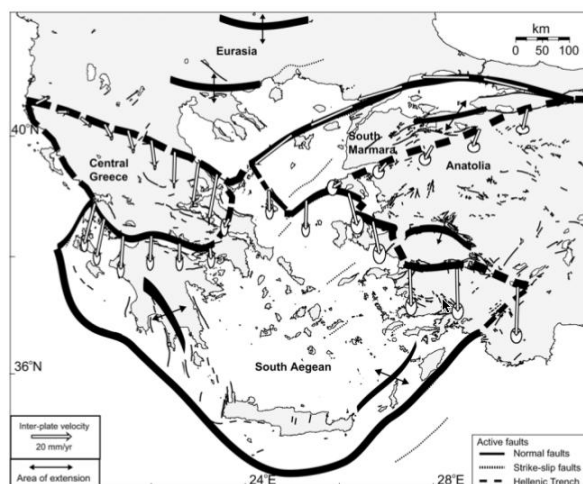
Από την συγκεκριμένη εργασία, αναγνωρίζονται δύο Μικρόπλακες, αυτή του Αιγαίου – Πελοποννήσου και αυτή της Ανατολίας (βλ. Εικόνα 3). Είναι εμφανές ότι τμήμα της πλάκας του Αιγαίου – Πελοποννήσου υπεισέρχεται στην Τουρκική επικράτεια. Η ταχύτητα της πλάκας της Ανατολίας όπως έχει υπολογισθεί κινείται με ταχύτητα 24 ± 2 μμ/έτος προς δυτικά και η πλάκα του Αιγαίου με ταχύτητα 30 ± 2 μμ/έτος προς νοτιοδυτικά [4].



Εικόνα 3 - Καθορισμός ορίων Μικρόπλακων (πηγή: [4])

Μεταγενέστερη εργασία [5], πραγματοποιήθηκε συνδυάζοντας δεδομένα από παλαιότερες εργασίες, με σκοπό να οδηγηθούν στο δικό τους μοντέλο μικρόπλακων. Περιλαμβάνονται δεδομένα από έξι (6) διαφορετικές περιόδους μετρήσεων, τα οποία έχουν χρονική περίοδο αρκετών ετών. Το σύστημα αναφοράς που χρησιμοποιήθηκε προερχόταν από

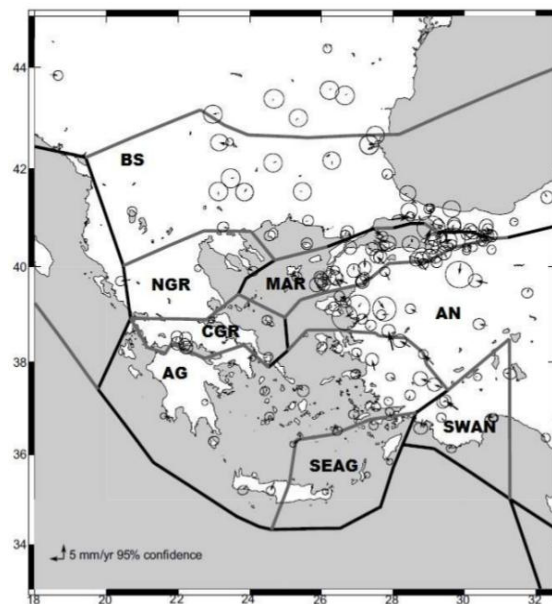
προγενέστερη εργασία, ενώ οι ταχύτητες από τις υπόλοιπες περιόδους μέτρησης μετασχηματίστηκαν και ανάχθηκαν, σύμφωνα με αυτή [4]. Κατά το συγκεκριμένο μοντέλο [5], ο ελλαδικός χώρος διαχωρίζεται σε τέσσερις (4) μικρόπλακες. Αυτές είναι της κεντρική Ελλάδος, του νότιου Αιγαίου - Πελοποννήσου, της Ανατολίας και της περιοχής του Μαρμαρά (βλ. Εικόνα 4).



Εικόνα 4 - Όρια Μικρόπλακων (πηγή: [5])

Η πλάκα της Ανατολίας κινείται ΔΝΔ με ταχύτητα ~25 μμ/έτος σε σχέση με την Ευρασία, το Νότιο Αιγαίο και η Πελοπόννησος έχει ΝΝΔ κατεύθυνση με ταχύτητα 30 – 35 μμ/έτος, ενώ η Κεντρική Ελλάδα παρουσιάζει δεξιόστροφη κίνηση ~4,3ο/Myr, με ταχύτητες που ποικίλουν και διαφέρουν ανά περιοχές. Η πλάκα του Μαρμαρά στο Βόρειο Αιγαίο κινείται με ταχύτητα ~23 μμ/έτος με ΔΝΔ κατεύθυνση, διαφορετική από εκείνη της Ανατολίας, λόγω και των ρηγμάτων στην συγκεκριμένη περιοχή [5].

Η πιο πρόσφατη από τις εργασίες για το διαχωρισμό τις ελληνικής επικράτειας αλλά και του ευρύτερου χώρου της, δημοσιεύτηκε το 2006 από το τμήμα Γήινων, Ατμοσφαιρικών και Πλανητικών Επιστημών του MIT (EAPS), σε αυτή συμμετείχαν και ερευνητές από την αντίστοιχη περιοχή μελέτης [6]. Το διάστημα των παρατηρήσεων είναι από το 1988 έως 2005, για τη ζώνη αλληλεπίδρασης της Αραβικής, της Αφρικανικής και της Ευρασιατικής πλάκας. Το τελικό πλαίσιο αναφοράς και στην συγκεκριμένη εργασία ορίστηκε σταθεροποιώντας 32 σταθμούς GPS που βρίσκονται στην Ευρασία. Οι ταχύτητες μετακίνησης στη συγκεκριμένη μελέτη καθορίζονται από συνολικά 440 σταθμούς, από τους οποίους οι 337 αποτελούν καμπάνιες, survey-mode GPS (SGPS), ενώ οι 103 είναι μόνιμοι σταθμοί αναφοράς, continuously recording GPS (CGPS). Ο καθορισμός των μικρόπλακων απεικονίζεται στο Εικόνα 5.



Εικόνα 5 - Μικρόπλακες του Ελληνικού χώρου (πηγή: [6])

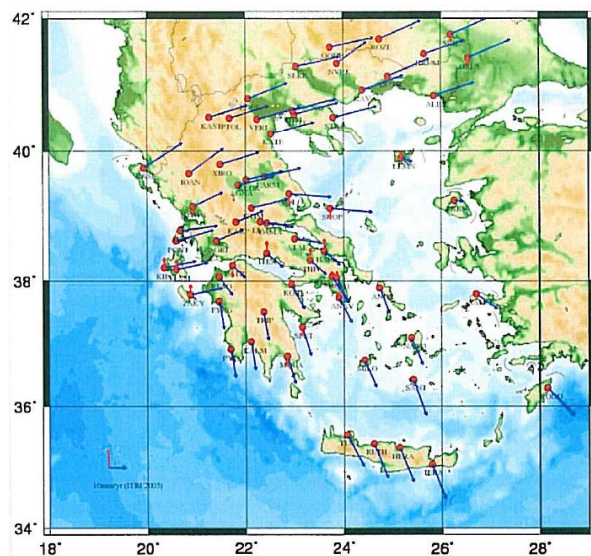
Η πολυπλοκότητα μοντελοποίησης της Γεωδυναμικής συμπεριφοράς της Ανατολικής Μεσογείου αναδεικνύεται από το σύνολο των εργασιών που έχουν πραγματοποιηθεί κατά το παρελθόν για τη μελέτη και εύρεση των διαφόρων πεδίων ταχυτήτων. Από τις πρώτες μελέτες στην περιοχή μέχρι και τις πιο πρόσφατες, αναγνωρίζονται κοινά χαρακτηριστικά, όπως η διαφοροποίηση της Βόρειας Ελλάδος από την Νότια και το Αιγαίο και η μη υπαγωγή του βορείου Ιονίου στην Ευρασιατική πλάκα. Ωστόσο, η κάθε εργασία ξεχωριστά προσπαθεί να προσεγγίσει όσο το δυνατόν καλύτερα τα όρια των μικρόπλακων αλλά και τον αριθμό τους, που παρουσιάζει αυξητική τάση διαχρονικά. Στις πρώτες εργασίες γίνεται λόγος για τρεις (3) πλάκες [3], [12], στον ευρύτερο ελλαδικό χώρο, οχτώ (8) σε μεταγενέστερες [6], ενώ οι πιο πρόσφατες αναφέρουν δέκα (10) μικρόπλακες [7].

III. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗΣ ΕΠΙΛΕΓΜΕΝΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ ΤΟΥ ΕΛΛΗΝΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΟΥΣ ΜΕ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

Όπως περιγράφεται και στην προηγούμενη ενότητα, η μελέτη της γεωδυναμικής συμπεριφοράς της ευρύτερης περιοχής της Ελλάδας απαιτεί την εγκατάσταση ενός δικτύου παρακολούθησης, με πιο προσιτή λύση να αποτελεί ένα δίκτυο μόνιμων σταθμών αναφοράς GNSS. Επίσης από γεωδαιτική σκοπιά κρίνεται απαραίτητη η μελέτη των ταχυτήτων μετακίνησης των τριγωνομετρικών σημείων προκειμένου να εξασφαλίζεται η βιωσιμότητα ενός τέτοιου δικτύου. Στην Ελλάδα τα τελευταία χρόνια ο αριθμός των μόνιμων σταθμών GNSS έχει αυξηθεί κατά πολύ, κυρίως με την λειτουργία του επίσημου "εθνικού" δικτύου μόνιμων σταθμών του HEPOS, με 98 εγκατεστημένους σταθμούς που βρίσκεται υπό τον έλεγχο του ΟΚΧΕ (Οργανισμός Κτηματολογίου και

Χαρτογράφησης Ελλάδος) [13]. Ακόμα, έχουν ιδρυθεί δίκτυα για ερευνητικούς σκοπούς παρακολούθησης των παραμορφώσεων του φλοιού της γης, όπως το δίκτυο το NOANet του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών, το HemusNET στην Βόρεια Ελλάδα και Βουλγαρία, καθώς επίσης το HERMES του ΑΠΘ, στο οποίο συμμετέχει και το Τμήμα Γεωπληροφορικής και Τοπογραφίας [14],[15]. Υπάρχουν όμως και αρκετοί σταθμοί εγκατεστημένοι από ιδιωτικές εταιρίες για εμπορικούς σκοπούς κυρίως.

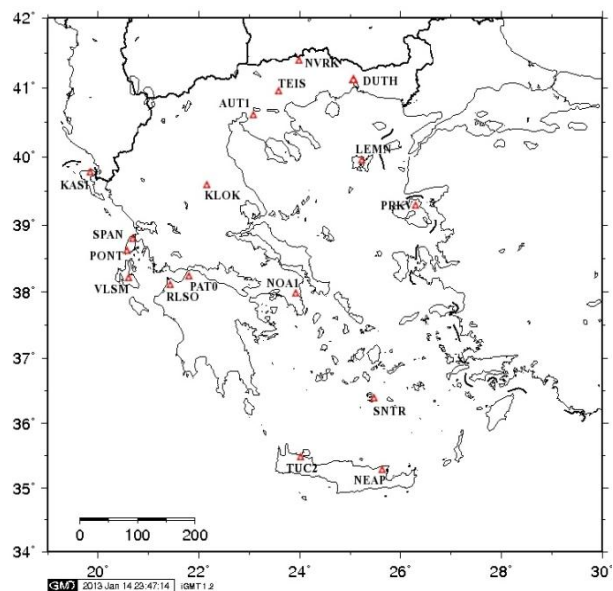
Σημαντική και εμπειροστατωμένη μελέτη έγινε από την ερευνητική ομάδα του ΤΑΤΜ της Πολυτεχνικής του ΑΠΘ αποτελούμενη από τους, Α. Φωτίου, Δ. Ρωσσικόπουλο, Χ. Πικριδά και Μ. Χατζηνίκο, με αντικείμενο την επίλυση του διευρυνμένου δικτύου AUTH – METRICA, τον προσδιορισμό ταχυτήτων μετακίνησης, την ένταξη του στο ITRS07 και γενικότερα την μελέτη της Γεωδυναμικής συμπεριφοράς της Ελλάδος [16]. Για την επίλυση του δικτύου χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα αρκετών ετών, ενώ η μεθοδολογία για τον υπολογισμό των ταχυτήτων έχει αναπτυχθεί από την ερευνητική ομάδα από προηγούμενες μελέτες συνδυάζοντας δορυφορικά δεδομένα που διατίθενται για όλη την Ελλάδα (βλ. Εικόνα 6).



Εικόνα 6 - Ταχύτητες μετακίνησης στο ITRF05 του δικτύου AUTH – METRICA (πηγή: [16])

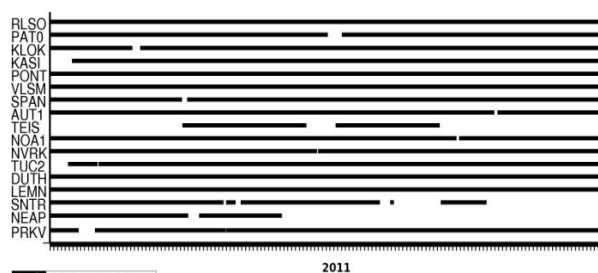
Η μεθοδολογία που θα ακολουθηθεί προκειμένου να ερμηνευτούν αξιόπιστα οι ταχύτητες μετακίνησης και να οδηγήσουν σε ρεαλιστικά αποτελέσματα είναι μείζονος σημασίας, απαιτούνται δε και μετρήσεις αρκετών ετών για διαχρονική παρακολούθηση. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκαν μετρήσεις δύο ετών (2010, 2011), συνεχούς καταγραφής, ώστε να γίνει μια εκτίμηση των ταχυτήτων μετακίνησης σε μια πρώτη προσέγγιση. Το δίκτυο μελέτης το οποίο χρησιμοποιήθηκε (βλ. Εικόνα 7) εστιάζεται κυρίως στον ελλαδικό χώρο, συμπεριλαμβάνει όμως και διεθνείς σταθμούς GNSS, συνεχούς καταγραφής. Συνολικά, το δίκτυο

περιλαμβάνει 32 σταθμούς, από τους οποίους οι 17 αποτελούν το τοπικό δίκτυο και οι υπόλοιποι 15 σταθμοί που συμβάλουν στην υλοποίηση του πλαισίου αναφοράς του ITRF08 [17], αποτελούν σταθμούς του δικτύου της IGS. Η επεξεργασία του δικτύου πραγματοποιήθηκε με το λογισμικό GAMIT/GLOBK 10.4 [18], [19], του MIT, ενώ η απεικόνιση των χαρτών και των διαγραμμάτων έγινε με το πρόγραμμα GMT [20].



Εικόνα 7 - Τμήμα του δικτύου εντός του Ελλαδικού χώρου.

Η επεξεργασία των παρατηρήσεων στο επίπεδο του GAMIT ανάγεται σε ημερήσια βάση, για τα έτη 2010 και 2011 (βλ. Εικόνα 8), με ρυθμό καταγραφής 30 s. Η ένταξη του δικτύου στο ITRF08 προήλθε από τις απόλυτες τιμές βαθμονόμησης των κέντρων φάσης των κεραιών που παρέχει η IGS.



Εικόνα 8 - Χρονικό διάστημα παρατηρήσεων

Ενδεικτικά, παρουσιάζονται οι συντεταγμένες και οι ταχύτητες μετακίνησης στο ITRF08 για επιλεγμένους ελληνικούς σταθμούς που συμμετέχουν στο δίκτυο της EUREF και τον σταθμό TEIS του τμήματος Γεωπληροφορικής & Τοπογραφίας, όπως προέκυψαν από την τελική συνόρθωση (βλ. Πίνακα 1). Ακόμα, πραγματοποιήθηκε η εξαγωγή χρονοσειρών (repetabillites) με σκοπό να αξιολογηθούν σε ημερήσιο επίπεδο οι ακρίβειες των αποτελεσμάτων και να ελεγχθεί η σταθεροποίηση σε ημερήσια πλαίσια αναφοράς. Τα στατιστικά στοιχεία των μετασχηματισμών υλοποίησης των ενιαίων πλαισίων αναφοράς (POST RMS) κυμάνθηκαν στα 0.00282 m

για τις συντεταγμένες και 0.00138 m/yr για τις ταχύτητες. Τα ποσοστά των μετασχηματισμών κρίνονται θετικά καθώς για να εξαλειφθούν τα περιοδικά φαινόμενα απαιτούνται επιλύσεις 2,5 - 3 ετών τουλάχιστον.

Πίνακας 1 - Αποτελέσματα ελληνικών σταθμών στο ITRF08

SITE	X [m]	Y [m]	Z [m]	Vx [m/yr]	Vy [m/yr]	Vz [m/yr]
AUT1	4466283.336	1896167.003	4126096.809	-0.0134	0.0219	0.0059
DUTH	4362689.664	2026648.220	4174234.330	-0.0173	0.0173	0.0092
NOA1	4599641.948	2034827.370	3909890.584	0.0020	0.0100	-0.0088
PAT0	4635002.784	1860619.687	3930281.845	0.0028	0.0105	-0.0033
TEIS	4414007.297	1924331.645	4168705.384	-0.0189	0.0196	0.0097
TUC2	4744543.818	2119411.971	3686258.796	0.0028	0.0107	-0.0087

- Σύγκριση αποτελεσμάτων με υφιστάμενες μελέτες

Με σκοπό την αξιολόγηση και ερμηνεία των αποτελεσμάτων, πραγματοποιήθηκε σύγκριση με τα δημοσιευμένα στοιχεία της ερευνητικής ομάδας του TATM [16]. Για να είναι αξιοποιήσιμη η σύγκριση μεταξύ των δύο διαφορετικών εργασιών πραγματοποιήθηκε μετασχηματισμός από το πλαίσιο αναφοράς του ITRF08, στο ITRF05 και στην αντίστοιχη εποχή αναφοράς 2011.128. Η διαδικασία του μετασχηματισμού, πραγματοποιήθηκε μέσω της εφαρμογής “ETRS89/ITRS Transformation” που παρέχεται μέσω της ιστοσελίδα της EUREF [21].

Πίνακας 2 - Διαφορές αποτελεσμάτων Ε.Ο. ΑΠΘ στο ITRF05 (epoch 2011.128)

SITE	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔVx	ΔVy	ΔVz
	[mm]			[mm/yr]		
AUT1	0.50	1.40	0.40	1.80	1.40	2.50
DUTH	1.10	0.10	2.00	0.50	0.50	3.50
NOA1	4.60	0.50	0.70	5.60	0.60	0.60
PAT0	7.40	5.20	6.50	6.80	3.90	6.10
TEIS	2.50	0.10	3.50	3.50	0.80	4.10
TUC2	1.30	0.60	8.80	0.00	0.00	1.50

Από την παραπάνω σύγκριση (βλ. Πίνακα 2) παρατηρείται σχεδόν ταύτιση των αποτελεσμάτων, μεταξύ των δύο εργασιών σε ότι αφορά τις διαφορές των συντεταγμένων και ταχυτήτων. Οι μεγαλύτερες αποκλίσεις παρουσιάζονται στον σταθμό PAT0 στην Πάτρα και στην οριζόντια ταχύτητα μετακίνησης Vx για το σταθμό NOA1 στην Πεντέλη. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα αποτελέσματα των ταχυτήτων μετακίνησης δεν αποτελούν τα τελικά, καθώς δεν θα ήταν δυνατόν να παρουσιασθούν ευρέως τέτοιου είδους στοιχεία επειδή είναι διαθέσιμα αποκλειστικά σε χρήστες – συνδρομητές του δικτύου. Επισημαίνεται ακόμα, ότι λόγω μικρού χρονικού διαστήματος παρατηρήσεων στο σταθμό PAT0 (μικρότερο από 2.5 έτη), οι τιμές δόθηκαν με την μέθοδο της παρεμβολής από την Ε.Ο.

Παρά τη διαφορετική προσέγγιση, στην εκτίμηση των συντεταγμένων και των ταχυτήτων μεταξύ των δύο εργασιών, υπάρχει σύγκλιση αποτελεσμάτων. Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε από την Ε.Ο. του ΑΠΘ διαφέρει από αυτή που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, καθώς ο σκοπός της ήταν η βέλτιστη συμβατότητα και προσέγγιση στον

τρόπο με τον οποίο συνορθώθηκε, το εθνικό δίκτυο μονίμων σταθμών του HEPOS, που υλοποιήθηκε με μερικές εσωτερικές δεσμεύσεις στον AUT1.

Τέλος, για λόγους διασφάλιση της ποιότητας των αποτελεσμάτων πραγματοποιούνται διαχρονικές επιλύσεις, με την παράλληλη διεύρυνση του δικτύου από τη Ε.Ο. του ΑΠΘ.

- Σύγκριση ταχυτήτων με το δίκτυο EUREF στο ITRF08

Ακολουθώντας, πραγματοποιήθηκε σύγκριση με τα δημοσιευμένα αποτελέσματα της EUREF. Η σύγκριση πραγματοποιήθηκε μεταξύ των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας στο πλαίσιο του ITRF08 και των ταχυτήτων στο πλαίσιο αναφοράς IGS08, το οποίο υλοποιείται από την IGS. Ωστόσο τα δύο πλαίσια αναφοράς είναι παρόμοια, καθώς το ITRF08 χρησιμοποιεί το απόλυτο μοντέλο για τη μεταβολή του κέντρου φάσης της κεραίας, σε αντίθεση με τα προηγούμενα ITRF [17]. Η ουσιαστική διαφοροποίηση είναι ότι υλοποιείται αποκλειστικά με την χρήση GNSS σταθμών.

Πίνακας 3 - Διαφορές ταχυτήτων μετακίνησης στο ITRF08 με EUREF

SITE	Vx [m]	Vy [m]	Vz [m]	
AUT1	-0.0143	0.0206	0.0039	EUREF
	-0.0134	0.0219	0.0059	GLOBK
	0.95	1.27	2.02	Διαφορά (mm)
DUTH	-0.0179	0.0174	0.0075	EUREF
	-0.0173	0.0173	0.0092	GLOBK
	0.64	0.07	1.67	Διαφορά (mm)
NOA1	0.004	0.0099	-0.0083	EUREF
	0.0020	0.0100	-0.0088	GLOBK
	2.02	0.08	0.51	Διαφορά (mm)
PAT0	0.0013	0.0092	-0.0057	EUREF
	0.0028	0.0105	-0.0033	GLOBK
	1.54	1.29	2.4	Διαφορά (mm)
TUC2	0.0029	0.0099	-0.0095	EUREF
	0.0028	0.0107	-0.0087	GLOBK
	0.09	0.76	0.77	Διαφορά (mm)

Οι αποκλίσεις των ταχυτήτων μετακίνησης κατά X και Y, όπως φαίνεται παραπάνω (βλ. Πίνακα 3), είναι της τάξεως του 1 mm ή και μικρότερες. Αξίζει να σημειωθεί, ότι στον σταθμό TUC2 υπήρξε αλλαγή της κεραίας τον Ιούλιο του 2010 με αποτέλεσμα να επηρεάζεται άμεσα η εκτίμηση των ταχυτήτων και των συντεταγμένων του σταθμού και να εξάγονται μη ρεαλιστικές ταχύτητες. Η αλλαγή της κεραίας είχε ληφθεί υπόψη κατά τα αρχικά στάδια των επιλύσεων, παρόλα αυτά, επιδρούσε σημαντικά, όπως φάνηκε και στην χρονοσειρά του σταθμού. Το συγκεκριμένο πρόβλημα αντιμετωπίστηκε επιτυχώς, αφαιρώντας το τμήμα πριν την αλλαγή της κεραίας, από την τελική συνόρθωση του δικτύου, προσεγγίζοντας πολύ καλά τις ταχύτητες μετακίνησης με αυτές που δημοσιεύονται από την EUREF.

IV. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με βάση τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην προηγούμενη παράγραφο III, η παρούσα μελέτη κυρίως καταδεικνύει την μεταβλητότητα του Ελληνικού χώρου από γεωδυναμική σκοπιά, συγκρίνοντας όλες τις προηγούμενες μελέτες με τα αποτελέσματα της παρούσης. Συμπεραίνουμε ότι αφενός οι εκτιμήσεις των ταχυτήτων της παρούσας μελέτης συμπίπτουν με αυτές ανάλογων μελετών και επαληθεύεται το γεγονός ότι η Ελλάδα παρουσιάζει μια έντονη γεωδυναμική συμπεριφορά, βέβαια αυτό μπορεί να αξιολογηθεί σε πρώτο στάδιο με βάση την παρούσα μελέτη. Αυτό όμως που προκύπτει εμφανώς σε αυτό το πρώτο στάδιο και το οποίο φαίνεται και τις προγενέστερες μελέτες είναι ότι η μεταβλητότητα αυτή θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ώστε να εξασφαλίζεται μια μεγαλύτερη σε χρονικό βάθος βιωσιμότητα ενός γεωδαιτικού συστήματος αναφοράς. Σημαντικό εδώ κρίνεται κυρίως το γεγονός ότι παρουσιάζεται διαφορετική συμπεριφορά μεταξύ του βόρειου, του νότιου και του νησιωτικού τμήματος της Ελλάδας, γεγονός που επαληθεύεται και από την παρούσα μελέτη αφού προκύπτουν εμφανείς διαφορές μεταξύ των πεδίων ταχυτήτων. Ενδεικτικά, βάση των ταχυτήτων μετακίνησης για τους σταθμούς AUT1 (Θέσση, Θεσσαλονίκη) και NOA1 (Πεντέλη, Αττική), γίνεται αντιληπτό ότι η σχετική θέση μεταξύ τους μπορεί να μεταβληθεί έως και ~1,7 cm/yr κατά τις διευθύνσεις East και North σε γεωκεντρικό σύστημα αναφοράς

Επίσης κάτι το οποίο δεν προκύπτει άμεσα από την παρούσα μελέτη αλλά θα πρέπει να ληφθεί υπόψη σε μεταγενέστερο στάδιο, είναι ότι η χρησιμοποίηση περιφερειακών ή διεθνών πλαισίων αναφοράς δεν είναι εύκολο να υιοθετηθεί σε γεωδαιτικές εφαρμογές γιατί πρέπει να λαμβάνονται υπόψη προβλήματα ανομοιογένειας ως προς τις ταχύτητες μετακίνησης σε τοπικό επίπεδο και συνεπώς η υλοποίηση ενός σύγχρονου δυναμικού "τοπικού" πλαισίου αναφοράς κρίνεται απαραίτητη προκειμένου να ερμηνευτούν στο μεγαλύτερο δυνατό βαθμό οι παράμετροι μετακίνησης. Ωστόσο, η σύνδεση με τα παγκόσμια και περιφερικά πλαίσια αναφοράς κρίνεται απαραίτητη προκειμένου να εξασφαλίζεται η βιωσιμότητα του εθνικού πλαισίου αναφοράς και να ακολουθείται η ευρωπαϊκή και παγκόσμια γεωδαιτική πολιτική.

Η παρακολούθηση της γεωδυναμικής συμπεριφοράς αποτελεί σημαντική πληροφορία που σχετίζεται μεταξύ άλλων και με χαρτογραφικές και κτηματογραφικές εφαρμογές. Σε επίπεδο εφαρμογής στο Ελλαδικό χώρο προκύπτουν προβλήματα που είναι άμεσα συνδεδεμένα με χαρτογραφικά και κτηματογραφικά προϊόντα και συνεπώς η ανάγκη υλοποίησης ενός σύγχρονου, τρισδιάστατου γεωδαιτικού συστήματος αναφοράς, είναι απαραίτητη για όλες τις μεγάλου εύρους εφαρμογές όπως το Εθνικό Κτηματολόγιο. Η χωρική πληροφορία

που θα καταχωρείται θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη τη μεταβλητότητα που αντιστοιχεί σε έκταση στο σύνολο του Ελλαδικού χώρου και η βιωσιμότητα έργων τέτοιου μεγέθους, μπορεί να επιτευχθεί, αξιολογώντας τα γεωδυναμικά φαινόμενα που παρουσιάζονται, λαμβάνοντας υπόψη την χρονική παράμετρο.

V. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς θα ήθελαν να ευχαριστήσουν τον επίκ. καθηγητή Δρ. Γεώργιο Βέργο για τις εύστοχες υποδείξεις του, που συνέβαλαν στη βελτίωση της τελικής μορφή της παρούσας εργασίας. Θερμές ευχαριστίες στον αναπληρωτή καθηγητή του τμήματος Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Α.Π.Θ. Δρ. Χρήστο Πικριδά αλλά και στον υπ. διδάκτορα του Α.Π.Θ. Μιλτιάδη Χατζηνίκο για την υποστήριξη τους σε κρίσιμα ζητήματα σχετικά με την αξιολόγηση των ταχυτήτων μετακίνησης.

VI. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας. (n.d.). Σεισμοί και Ελλαδικός Χώρος. Ανάκτηση Μάρτιος 2013, από <http://www.oasp.gr/node/3>
- [2] Hollenstein, C., Müller, M. D., Geiger, A., & Kahle, H. (2008). Crustal motion and deformation in Greece from a decade of GPS measurements, 1993–2003. *Tectonophysics*, pp. 17–40.
- [3] McKenzie, D. (1972). Active tectonics of the Mediterranean region. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, pp. 109–185.
- [4] McClusky, S. C., Balassanian, S., Barka, A., Demir, C., Ergintav, S., Georgiev, I., et al. (2000). Global Positioning System constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus. *Journal of Geophysical Research* (105(B3)), 5695–5719, doi:10.1029/1996JB900351.
- [5] Nyst, M., & Thatcher, W. (2004). New constraints on the active tectonic deformation of the Aegean. *Journal of Geophysical Research* (109), B11406, doi:10.1029/2003JB002830.
- [6] Reilinger, R., McClusky, S., Vernant, P., Lawrence, S., Ergintav, S., Cakmak, R., et al. (2006). GPS Constraints on Continental Deformation in the Africa-Arabia-Eurasia Continental Collision Zone and Implications for the Dynamics of Plate Interactions. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 111, B05411.
- [7] Floyd, M. A., Billiris, H., Paradissis, D., Veis, G., Avallone, A., Briole, P., et al. (2010). A new velocity field for Greece: Implications for the kinematics. *Journal of Geophysical Research* (Vol. 115).
- [8] Rossikopoulos, D., Fotiou, A., Livieratos, E., & Baldi, P. (1998). A rigorous analysis of GPS data to detect crustal deformations. *Tectonophysics* (294).
- [9] Ganas, A., Marinou, A., Anastasiou, D., Paradissis, D., Papazissi, K., Tzavaras, P., et al. (2012, May 21). GPS-derived estimates of crustal deformation in the central and north Ionian Sea, Greece: 3-yr results from NOANET continuous network data. *Journal of Geodynamics*.
- [10] Fotiou, A., Kagiadakis, V., Pikridas, C., & Rossikopoulos, D. (2003). Geodetically Derived Displacements And Crustal Deformation Analysis: Application In The Volvi Area. *11th FIG Symposium on Deformation Measurements*. Santorini, Greece.
- [11] Doukas, I., Fotiou, A., Ifadis, I. M., Katsambalos, K., Lakakis, K., Petridou - Chrysoidou, N., Pikridas, C., Rossikopoulos, D., Savvaidis, P., Tokmakidis, K., and Tziavos, (2004). Displacement Field Estimation from GPS Measurements. *FIG Working Week 2004*. Athens, Greece.
- [12] McKenzie, D. (1978). Active tectonics of the Alpine-Himalayan belt: The Aegean sea and surrounding regions. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, pp. 217–254.

- [13] Gianniou, M. (2008). HEPOS: Designing and Implementing an RTK Network. *Geoinformatics* , pp. 10-13 Internet resources, http://www.hepos.gr/hepos/HEPOS_pub_2008b_en.pdf.
- [14] Φωτίου, Α., Πικριδάς Χ. (2012). «GPS και Γεωδαιτικές εφαρμογές» 2^η εκδόση, εκδ. ΖΗΤΗ Θεσ/νίκη.
- [15] Fotiou A., Pikridas C., Rossikopoulos D., Spatalas S., Tsioukas V. and Katsougiannopoulos S., "The Hermes GNSS NtripCaster of AUTH", EUREF 2009 Symposium, May 27-30 2009, Florence Italy
- [16] Φωτίου, Α., Ρωσσικόπουλος, Δ., Πικριδάς, Χ., & Χατζηνίκος, Μ. (2011). *Τελική Έκθεση Πεπραγμένων - Παραδοτέο ΠΕ3*. Θεσσαλονίκη: Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών - ΑΠΘ.
- [17] Altamimi, Z., Collilieux, X., & Métivier, L. (2011). ITRF2008: an improved solution of the international. *Journal of Geodesy* .
- [18] Herring, T. A., King, R. W., & McClusky, S. C. (2010a). *GAMIT Reference Manual: GPS Analysis at MIT*. Department of Earth Atmospheric and Planetary Science, Massachusetts Institute of.
- [19] Herring, T. A., King, R. W., & McClusky, S. C. (2010b). *GLOBK Reference Manual: Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program, Release 10.4*. Department of Earth Atmospheric and Planetary, Massachusetts Institute of Technology.
- [20] Wessel, P., & Smith. (1991). Free software helps map and display data. EOS, Transactions. *American Geophysical Union*
- [21] *EUREF Permanent Network*. (n.d.). Retrieved 01 15, 2012, from EUREF Permanent Network: <http://www.epncb.oma.be/>

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ

Στυλιανός Ι. Μπίθαρης

Μηχανικός Γεωπληροφορικής & Τοπογραφίας Τ.Ε.

Κρίτωνος 3, 18010 Αίγινα, Ελλάδα

Τηλ.: 2321049247, Φαξ: 2321049247

e-mail: stylbith@gmail.com

Χωρογραφίες/ Τόμος 3/ Αρ1/ 2012 – σελ 7-13