

Συσχέτιση Μεταξύ Σεισμικότητας και Βαρομετρικών Παλιρροϊκών Εξάρσεων

Σ. Σπαταλάς

*Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών,
Τομέας Γεωδαισίας και Τοπογραφίας, 54124 Θεσσαλονίκη*

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν οι παλιρροϊκές μεταβολές της βαρομετρικής πίεσης στην περιοχή της Θεσσαλονίκης, αναλύοντας ένα δείγμα ωριαίων τιμών για μία χρονοσειρά 31 ετών και υπολογίστηκαν οι παράμετροι των παλιρροϊκών κυμάτων. Μία ανιχνεύσιμη συσχέτιση μεταξύ των εξάρσεων της παραμέτρου του εύρους των παλιρροϊκών κυμάτων και περιστατικών ισχυρών σεισμών οδήγησε στην εκ νέου ανάλυση των δεδομένων σε ομάδες διάρκειας τριών μηνών. Τα υπολογισθέντα εύρη συγκρίθηκαν με τους καταλόγους σεισμικότητας των αντίστοιχων χρονικών περιόδων και προέκυψε τελικά ισχυρή συσχέτιση στην τελευταία περίπτωση. Η εκτίμηση των παλιρροϊκών παραμέτρων όμως περιορίστηκε σε μικρής περιόδου συνιστώσες. Έγινε εκ νέου ανάλυση διατηρώντας το ετήσιο μήκος κάθε πακέτου δεδομένων, αλλά μεταφέροντας το ετήσιο παράθυρο με βήμα τριών μηνών από την αρχή έως το τέλος της περιόδου των 31 ετών. Εκτιμήθηκαν με τον τρόπο αυτό εκ νέου παλιρροϊκές παράμετροι με περιόδους από 8 ώρες (M3) έως ένα έτος (Sa). Η συσχέτιση μεταξύ των παλιρροϊκών παραμέτρων και των σεισμικών δεικτών για τις αντίστοιχες χρονικές περιόδους είναι ιδιαίτερα αυξημένη.

Correlation Between Seismicity and Barometric Tidal Exalting

S. Spatalas

*Aristotle University of Thessaloniki, School of Rural and Surveying Engineering,
Department of Geodesy and Surveying, 54124 Thessaloniki, Greece*

Abstract

Tidal changes of barometric pressure in the area of Thessaloniki in Northern Greece were studied by analysing a sample of 31 years of hourly measurements and the parameters of the tidal waves were calculated. A detectable correlation between the exalting of the amplitude parameters of the tidal waves with strong seismic events, lead us to a new analysis of the data in groups of 3-months extend. The resulted amplitudes were compared with seismicity index of corresponding time periods and a stronger

correlation was found in the last case. The estimation of tidal parameters was restricted to short period constituents. A new analysis was performed, retaining the one year length of each data block shifting though the one year window by steps of three months from the beginning to the end of the 31 years period. This way, we were able to estimate again tidal parameters ranging from periods of eight hours (M3) to one year (Sa). The correlation between the tidal parameters and the seismicity index for the corresponding time periods is remarkably increased.

1. Εισαγωγή

Είναι ευρέως αποδεκτό και τεκμηριωμένο ότι ένας αριθμός φυσικών φαινομένων και αντίστοιχα ένας αριθμός φυσικών παραμέτρων παρουσιάζουν ασυνήθιστη συμπεριφορά τόσο κατά τη διάρκεια μιας προσεισμικής περιόδου όσο και κατά τη διάρκεια του κυρίως σεισμού (βλ. Rikitake, 1981; Hayakawa, 1999; Hayakawa and Molchanov, 2002). Η κατανόηση του τρόπου με τον οποίο συνδέονται αυτά τα φαινόμενα με την τεκτονική δραστηριότητα δια μέσου της σύνδεσης λιθόσφαιρας - ατμόσφαιρας - ιονόσφαιρας είναι ένας ιδιαίτερα προκλητικός στόχος. Επιπλέον, λόγω του σημαντικού κόστους σε ανθρώπινες ζωές και στην οικονομία που έχει ένας πιθανός δυνατός σεισμός είναι αναγκαία η εξέταση αυτών των φαινομένων έτσι ώστε να εξαχθεί κάθε σημαντική πληροφορία αναφορικά με τη σχέση τους με γεγονότα καταστροφής και να χρησιμοποιηθεί για την κατά το δυνατόν ελαχιστοποίηση των σεισμικών καταστροφών. Εκτός από την καθαρά σεισμολογική έρευνα σημαντική έρευνα είναι ήδη σε εξέλιξη πάνω σε ένα πλήθος παρατηρήσιμων μεγεθών που σχετίζονται με τα φαινόμενα αυτά. Πολλές ατμοσφαιρικές φυσικές παράμετροι όπως η πυκνότητα, η περιεκτικότητα σε ιόντα της ιονόσφαιρας, το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, η μετάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων κ.α., διαφοροποιούνται με μία σχέση αμοιβαίας αλληλεπίδρασης τους με λιθосφαιρικές και ιονοσφαιρικές μεταβολές (βλ. Hayakawa et al., 1996; Silina et al., 2001; Mareev et al., 2002; Biagi et al., 2003; Molchanov et al., 2003; Plotkin, 2003; Molchanov et al., 2004), και είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν για τον εντοπισμό ιδιαίτερων λιθосφαιρικών μεταβολών, όπως αυτές που προκύπτουν από ένα σεισμό, μετά από προσεκτική και συχνά περίπλοκη ανάλυση για την απομάκρυνση του ιδιοθορύβου.

Οι ατμοσφαιρικές παλίρροιες που προκαλούνται από την περιοδικά μεταβαλλόμενη σεληνοηλιακή βαρυτική έλξη καθώς και από τη θέρμανση από τον ήλιο λόγω της περιστροφής της γης, υποκείμενες στην επίδραση παραμέτρων που εκφράζουν τη θερμική διέγερση (θερμοκρασία ατμόσφαιρας, περιεκτικότητα υδρατμών, περιεκτικότητα όζοντος, μοριακό ιξώδες και αγωγιμότητα, περιεκτικότητα και τριβή ιόντων της ιονόσφαιρας) καθώς και παραμέτρων που εκφράζουν τη βαρυτική διέγερση (ατμοσφαιρική πυκνότητα, τοπογραφία και ανομοιογένειες του φλοιού κοντά στην επιφάνεια), έχουν

μελετηθεί σε ικανοποιητικό βαθμό τους τελευταίους δύο αιώνες. Μια αναλυτική και εκτενής παρουσίαση των εξελίξεων των τελευταίων χρόνων δίνεται από τους Charpman και Lindzen (1970), ενώ μια εκτενής ανάλυση των ημερήσιων και των ημιημερήσιων θερμοβαρυτικών ηλιακών παλινροιών της ατμόσφαιρας της γης στην περιοχή της Ελλάδας παρουσιάζεται από τον Bartzokas (1989) και Bartzokas et al. (1995).

Οι ατμοσφαιρικές παλίρροιες στην περιοχή της Θεσσαλονίκης είχαν μελετηθεί προηγουμένως αναλύοντας ένα ενδεκαετές δείγμα ωριαίων τιμών (Arabelos et al., 1997). Σε προηγούμενη επίσης δημοσίευση από τους Biagi et al. (2003) επισημάνθηκε η παρουσία παλιρροϊκών αρμονικών στο φασματικό περιεχόμενο τριών LF ραδιοσημάτων, υποδηλώνοντας ότι οι ατμοσφαιρικές παλίρροιες είναι ένας από τους παράγοντες που επηρεάζουν την μετάδοση των LF ραδιοκυμάτων. Επιπλέον, καταγράφηκαν ανώμαλες αυξήσεις στην ένταση των ραδιοσημάτων που μεταδόθηκαν επάνω από το επίκεντρο της σεισμικής ακολουθίας στη Σλοβενία τον τελευταίο μήνα πριν από την έναρξη της ακολουθίας αυτής. Υποστηρίχθηκε ότι προσεισμικές εξάρσεις των ατμοσφαιρικών παλιρροιών οι οποίες παράγονται από τη μείωση της βαρύτητας, που οφείλεται στη διάχυση υγρών στην ευρύτερη περιοχή γύρω από το επίκεντρο, είναι υπεύθυνες για τις εξάρσεις των ραδιοσημάτων. Σε πρόσφατη δημοσίευση, οι Molchanov et al. (2004) παρουσίασαν μια γενική ιδέα των μηχανισμών των προσεισμικών φαινομένων στην ατμόσφαιρα και στην ιονόσφαιρα. Εξήχθη το συμπέρασμα ότι η ατμοσφαιρική διαταραχή της θερμοκρασίας και της πυκνότητας ακολουθεί την προσεισμική απελευθέρωση θερμού νερού/αερίου κοντά στην επιφάνεια του εδάφους. Από την άλλη πλευρά, οι ατμοσφαιρικές παλίρροιες εξαρτώνται από την ατμοσφαιρική θερμοκρασία και πυκνότητα (Charpman and Lindzen, 1970). Έτσι, αν ευσταθεί αυτή η ιδέα, είναι αναμενόμενη μία αλλοίωση των ατμοσφαιρικών παλιρροιών ή τουλάχιστον κάποιων συνιστωσών τους, σε περιοχή αυξημένης σεισμικής δραστηριότητας και κοντά στη χρονική περίοδο που συμβαίνει αυτή η σεισμική δραστηριότητα. Αυτά τα δεδομένα γεννούν την ελπίδα ότι παρατηρήσεις που σχετίζονται με τις ατμοσφαιρικές παλίρροιες είναι δυνατόν πιθανώς να χρησιμοποιηθούν για τη διερεύνηση πρόδρομων φαινομένων σεισμών (Gorbaticov et al., 1999).

Η Θεσσαλονίκη, η οποία βρίσκεται 30 χλμ νοτιοδυτικά της περιοχής των λιμνών Βόλβης και Λαγκαδά η οποία παρουσίασε κατά το παρελθόν έντονη σεισμική δραστηριότητα, βρίσκεται κάτω από την απειλή ενός πιθανά μεγάλου σεισμού. Για το λόγο αυτό, βρίσκεται σε εξέλιξη ένα πρόγραμμα στην περιοχή της Θεσσαλονίκης για τη διερεύνηση μιας πιθανής συσχέτισης των παραμέτρων των ατμοσφαιρικών παλιρροιών με την σεισμική δραστηριότητα. Τα πρώτα αποτελέσματα της έρευνας αυτής (Arabelos et al., 2003, 2004) έδειξαν συσχέτιση της ετήσιας μεταβολής κάποιων ομάδων κυμάτων με τη σεισμική δραστηριότητα γύρω από τη Θεσσαλονίκη. Αυτό εμφανίστηκε εκτυπώνοντας τις μεταβολές του παλιρροϊκού εύρους αυτών των ομάδων κυμάτων στους χρόνους που συνέβησαν μεμονωμένοι σεισμοί γύρω από την περιοχή έρευνας.

Στην παρούσα δημοσίευση διερευνώνται οι μεταβολές των παλιρροϊκών παραμέτρων της βαρομετρικής πίεσης σε σχέση με την σεισμική δραστηριότητα σε μία περιορισμένη περιοχή (μέχρι 40 χλμ) γύρω από τη Θεσσαλονίκη. Σε μία ποσοτική θεώρηση αυτής της σχέσης εκτελέστηκε μια ανάλυση διασυσχέτισης μεταξύ των μεταβολών του εύρους των κύριων παλιρροϊκών ομάδων κυμάτων και των σεισμικών δεικτών.

2. Υλικό παρατήρησης και μοντέλο κανονικού δυναμικού

Στην παρούσα ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν οι ακόλουθες σειρές δεδομένων:

- *Μοντέλο κανονικού δυναμικού*

Από τα υφιστάμενα μοντέλα κανονικού παλιρροϊκού δυναμικού επελέγη αυτό του Tamura (1987) το οποίο περιλαμβάνει 1200 κύματα.

- *Δεδομένα βαρομετρικής πίεσης και θερμοκρασίας από την περιοχή της Θεσσαλονίκης*

Η ατμοσφαιρική πίεση καταγράφηκε με τη βοήθεια ενός μεταλλικού βαρογράφου και διορθώθηκε με τη βοήθεια υδραργυρικού βαρομέτρου που εγκαταστάθηκε στην ίδια θέση με τον βαρογράφο. Η ακρίβεια μέτρησης της πίεσης είναι $\pm 1\text{hPa}$. Η βάση δεδομένων περιλαμβάνει 267.984 ωριαίες τιμές βαρομετρικής πίεσης, οι οποίες καλύπτουν την περίοδο από 1-1-1975 έως 31-12-2005 (11.166 ημέρες συνολικά). Αυτές οι τιμές προέκυψαν από αναλογικές εγγραφές στο Μετεωρολογικό σταθμό του Τμήματος Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης. Τα δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό των ατμοσφαιρικών παλιρροϊκών παραμέτρων.

Η ατμοσφαιρική θερμοκρασία καταγράφηκε με τη βοήθεια ενός διμεταλλικού θερμογράφου και διορθώθηκε με τη βοήθεια υδραργυρικού θερμομέτρου. Η ακρίβεια μέτρησης της θερμοκρασίας είναι $\pm 0.1^\circ\text{C}$. Οι ωριαίες τιμές της θερμοκρασίας, για την ίδια περίοδο μ' αυτή της καταγραφής των δεδομένων της βαρομετρικής πίεσης, χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της συσχέτισης μεταξύ ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας κοντά στην επιφάνεια και βαρομετρικής πίεσης στις παλιρροϊκές συχνότητες.

- *Κατάλογος σεισμών*

Χρησιμοποιήθηκε ο κατάλογος του Γεωδυναμικού Ινστιτούτου/Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, που περιλαμβάνει 43.128 σεισμούς από το 1964 μέχρι σήμερα, οι οποίοι συνέβησαν στην περιοχή που οριοθετείται από τις εξής συντεταγμένες: $33^\circ,47 \leq \varphi \leq 42^\circ,20$ και $16^\circ,26 \leq \lambda \leq 30^\circ,26$. Το μέγεθος αυτών των συμβάντων κυμαίνεται από $M=1,4$ έως $M=7$.

3. Ανάλυση των βαρομετρικών μετρήσεων

Στην εργασία Arabelos et al. (2003, 2004) έγινε προσπάθεια να ανιχνευθεί η συσχέτιση μεταξύ των εξάρσεων του εύρους των βαρομετρικών παλιρροϊκών συνιστωσών και των σεισμών που συνέβησαν κοντά στην περιοχή της Θεσσαλονίκης. Μια τέτοια συσχέτιση μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πρόδρομη σεισμική πληροφορία. Η μέθοδος της παλιρροϊκής ανάλυσης της βαρομετρικής πίεσης που χρησιμοποιήθηκε επέτρεπε τη λεπτομερή εκτίμηση του εύρους και της διαφοράς φάσης των παλιρροϊκών κυμάτων που έχουν περιόδους από ένα έτος έως ένα τέταρτο της ημέρας. Ωστόσο, για την εκτίμηση των παλιρροϊκών παραμέτρων των κυμάτων μακράς περιόδου, όπως είναι τα ετήσια ηλιακά κύματα (S_a), είναι απαραίτητη η ανάλυση μετρήσεων που καλύπτουν περίοδο τουλάχιστον ενός έτους. Από την άλλη πλευρά, η πληροφορία που προκύπτει από την μέθοδο αυτή μπορεί να είναι χρήσιμη αν η συσχέτιση αφορά βραχύτερη περίοδο.

Στις παλιότερες δημοσιεύσεις που προαναφέρθηκαν, οι εκτιμηθείσες ετήσιες τιμές του εύρους των 22 ομάδων κυμάτων, οι οποίες υπολογίστηκαν από την ανάλυση ωριαίων βαρομετρικών μετρήσεων που κάλυπταν περίοδο από το 1975 έως το 2005 (31 χρόνια), εκτυπώθηκαν μαζί με σεισμούς με $M \geq 4$ που συνέβησαν την ίδια περίοδο σε απόσταση μέχρι 200 χλμ από τη Θεσσαλονίκη. Οι εικόνες που προέκυψαν με αυτό τον τρόπο έδειξαν μια σημαντική συσχέτιση στην περίπτωση κάποιων ομάδων όπως στα κύματα S_a και S_{sa} , ενώ σε μερικές άλλες περιπτώσεις η κατάσταση ήταν συγκεχυμένη.

Για να υπολογισθεί ένα μέτρο αυτής της συσχέτισης ήταν απαραίτητο να συγκριθούν οι μεταβολές του εύρους των παλιρροϊκών κυμάτων με ένα δείκτη σεισμικότητας. Αυτό θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί βάσει μιας ποσότητας E , που εκτιμήθηκε από το μέγεθος του σεισμού με την παρακάτω συνάρτηση (Tzanis and Vallianatos, 2003)

$$\log_{10} E = a + bM_1 \quad (3.1)$$

όπου a , b είναι συντελεστές και M_1 είναι το τοπικό μέγεθος του σεισμού. Επιπλέον, οι δείκτες σεισμικότητας πρέπει να αντανακλούν την τοπική μέση (για κάποιο χρονικό διάστημα) σεισμικότητα της εξεταζόμενης περιοχής, εφόσον οι υπολογισθείσες τιμές εύρους των παλιρροϊκών κυμάτων είναι πρακτικά μέσες τιμές. Για τους λόγους αυτούς οι δείκτες σεισμικότητας υπολογίστηκαν βάσει της παρακάτω συνάρτησης

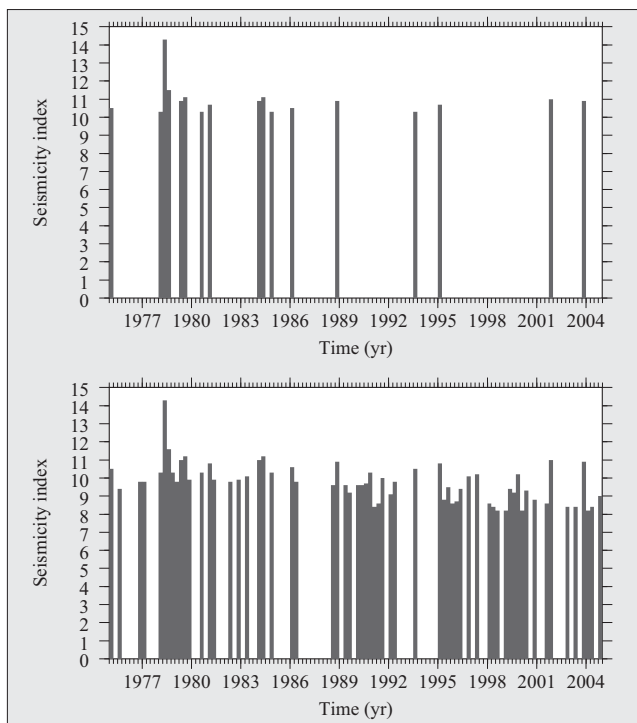
$$K = \sum_{t_1}^{t_2} (\log_{10} E)_{\psi \leq R} \quad (3.2)$$

όπου ψ είναι η απόσταση μεταξύ βαρομετρικού σταθμού και επικέντρου του σεισμού και R είναι η μέγιστη απόσταση για την οποία λήφθηκαν υπόψη οι σεισμοί.

Η εκτίμηση του R βασίστηκε σε αριθμητικά πειράματα όπως θα εκτεθεί παρακάτω. Για τους συντελεστές a και b (3.1) οι τιμές που υιοθετήθηκαν είναι 2,5 και 1,96 αντίστοιχα.

Για να γίνει εκτίμηση των παλιρροϊκών παραμέτρων για περιόδους που εκτείνονται από μισό έτος (Ssa) έως 8 ώρες (M3) και ταυτόχρονα να διατηρηθεί μία λογική ανάλυση, αναλύθηκαν τα βαρομετρικά δεδομένα σε ενότητες, διατηρώντας το ετήσιο μήκος σε κάθε ενότητα και χρησιμοποιώντας μετατόπιση αυτού του παραθύρου με βήμα τριών μηνών από την αρχή ως το τέλος των χρονοσειρών. Ας σημειωθεί στο σημείο αυτό, ότι με αυτού του είδους την ανάλυση προέκυψαν εξομαλυσμένες μεταβολές του εύρους ως προς τις πραγματικές. Αυτό ήταν ένας απαραίτητος συμβιβασμός για την μέθοδο της ανάλυσης που ακολουθήθηκε. Συνεπώς, το άθροισμα της σχέσης (3.2) εκτείνεται για τις αντίστοιχες περιόδους των τριών μηνών.

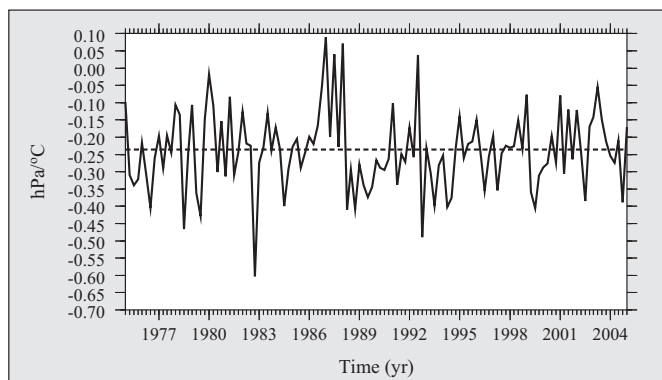
Στην Εικόνα 1 παρουσιάζονται οι τιμές του K με τη μορφή στηλών διάρκειας 3 μηνών για την εξεταζόμενη περιοχή της Θεσσαλονίκης. Οι τιμές αυτές υπολογίστηκαν λαμβάνοντας υπόψη σεισμούς με $M \geq 2$ (κάτω μέρος Εικόνας) και $M \geq 4$ (επάνω



Εικόνα 1. Τριμηνιαίες τιμές του K που υπολογίστηκαν για σεισμούς με απόσταση μέχρι 40 χλμ. από τη Θεσσαλονίκη, λαμβάνοντας υπόψη σεισμούς με $M \geq 2$ (κάτω μέρος εικόνας) ή $M \geq 4$ (επάνω μέρος εικόνας).

μέρος εικόνας). Αριθμητικά πειράματα τα οποία θα περιγραφούν στο κεφάλαιο 4 δείχνουν ότι οι σεισμοί με $M < 4$ δεν συσχετίζονται με μεταβολές των βαρομετρικών παλιρροιών. Η μέγιστη τιμή του K στην Εικόνα 1 οφείλεται στην σεισμική ακολουθία των 21 σεισμικών συμβάντων που έλαβαν χώρα τον Ιούνιο του 1978 στην περιοχή του οικισμού “Στίβος”, 34 χλμ. περίπου ανατολικά της Θεσσαλονίκης. Ο κύριος σεισμός με $M=6.5$, που συνέβη την 20^η Ιουνίου 1978, ανήκει σ’ αυτή την ακολουθία. Οι μικρότερες τιμές του K οφείλονται μάλλον σε μεμονωμένα συμβάντα (1 έως 2 σεισμικά συμβάντα).

Χρησιμοποιώντας τις χρονοσειρές των ωριαίων τιμών της βαρομετρικής πίεσης με ετήσια διάρκεια είναι δυνατό να εκτιμηθούν παλιρροϊκές παράμετροι για περιόδους μισού έτους (Saa) μέχρι και οκτώ ωρών. Για να αποκλεισθεί η περίπτωση κατά την οποία οι βαρομετρικές παλιρροϊκές διαταραχές οφείλονται σε μεταβολές της ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας κοντά στην επιφάνεια της γης, εκτιμήθηκε η συσχέτιση μεταξύ βαρομετρικών παλιρροιών και ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας, χρησιμοποιώντας όμοια βάση δεδομένων ωριαίων τιμών ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε ένα μοντέλο γραμμικής παλινδρόμησης. Στη συνέχεια, το συσχετισμένο μέρος αφαιρέθηκε από την αρχική παρατήρηση. Στην Εικόνα 2 παρουσιάζεται η συσχέτιση των βαρομετρικών μεταβολών με την ατμοσφαιρική θερμοκρασία, που υπολογίστηκε για κάθε μία από τις 121 ομάδες παρατηρήσεων ξεχωριστά. Η ακρίβεια αυτής της εκτίμησης κυμαίνεται από 0.001 έως 0.01 hPa/°C.



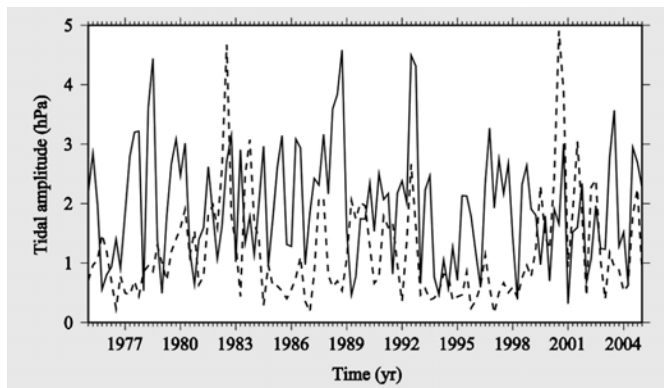
Εικόνα 2. Συσχέτιση μεταξύ των βαρομετρικών μεταβολών και της ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας που υπολογίστηκε ξεχωριστά για κάθε ετήσια ομάδα παρατηρήσεων (συνεχής γραμμή). Η εστιγμένη γραμμή αντιστοιχεί στη συσχέτιση που υπολογίστηκε για τη συνολική περίοδο των 31 ετών.

Οι παλιρροϊκές παράμετροι εκτιμήθηκαν για τις 18 ομάδες παλιρροϊκών κυμάτων και για κάθε μία από τις 121 ομάδες παρατηρήσεων, αλλά μόνο οι παράμετροι επτά ομάδων κυμάτων χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση διασυσχέτισης, που θα περιγρα-

φεί στο επόμενο κεφάλαιο, διότι ο λόγος του σήματος προς τον θόρυβο ήταν πολύ ασθενής. Στον πίνακα 1. παρουσιάζονται η ελάχιστη και η μέγιστη από τις 121 τιμές του λόγου σήματος προς θόρυβο, για αυτές τις επτά ομάδες παλιρροϊκών κυμάτων μόνο, που είναι η βάση της ανάλυσης διασυσχέτισης. Οι τιμές αυτές βασίστηκαν στην ανάλυση με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Στην Εικόνα 3 παρουσιάζονται οι μεταβολές του παλιρροϊκού εύρους των κυμάτων Ssa και Mm.

Πίνακας 1. Ελάχιστες και μέγιστες τιμές του λόγου του σήματος προς το θόρυβο για κάθε ομάδα παλιρροϊκών κυμάτων που εκτιμήθηκε για τις 121 ομάδες παρατηρήσεων με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων.

Ομάδα κυμάτων	Περίοδος (ημέρες)	Ελάχιστο	Μέγιστο
Ssa	182.62	3.98	48.10
Mm	27.55	2.80	40.40
Mf	13.66	2.78	31.60
Mtm	9.13	1.00	25.60
P1	1.00	0.10	10.34
K1	1.00	0.60	11.30
S2	0.5	3.50	8.30



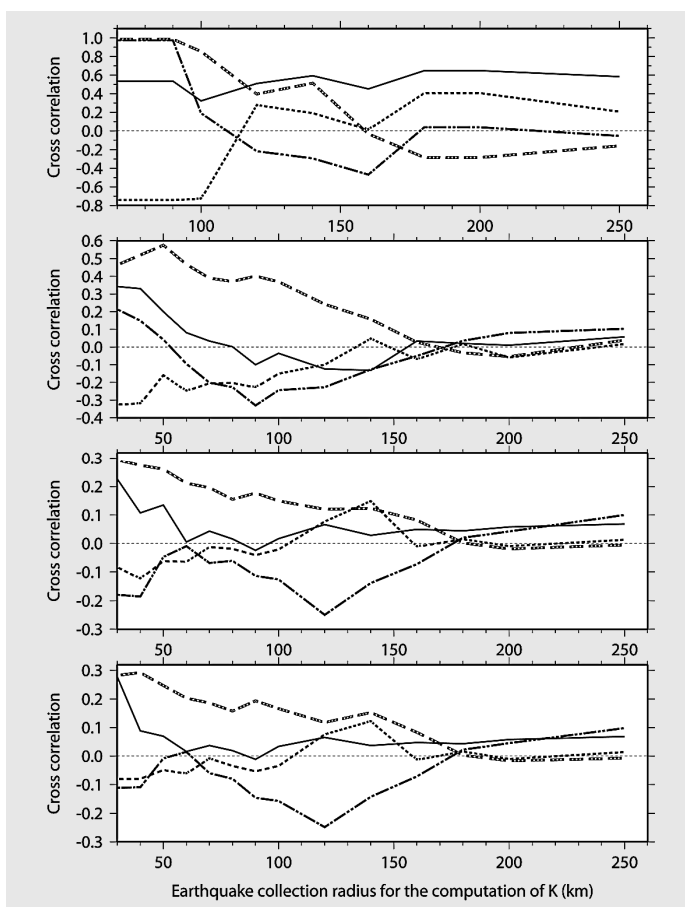
Εικόνα 3. Μεταβολές του εύρους των Ssa (συνεχής γραμμή) και Mm (διακεκομμένη γραμμή) από τις 121 ετήσιες ομάδες των ωριαίων βαρομετρικών παρατηρήσεων σε hPa.

4. Ανάλυση διασυσχέτισης

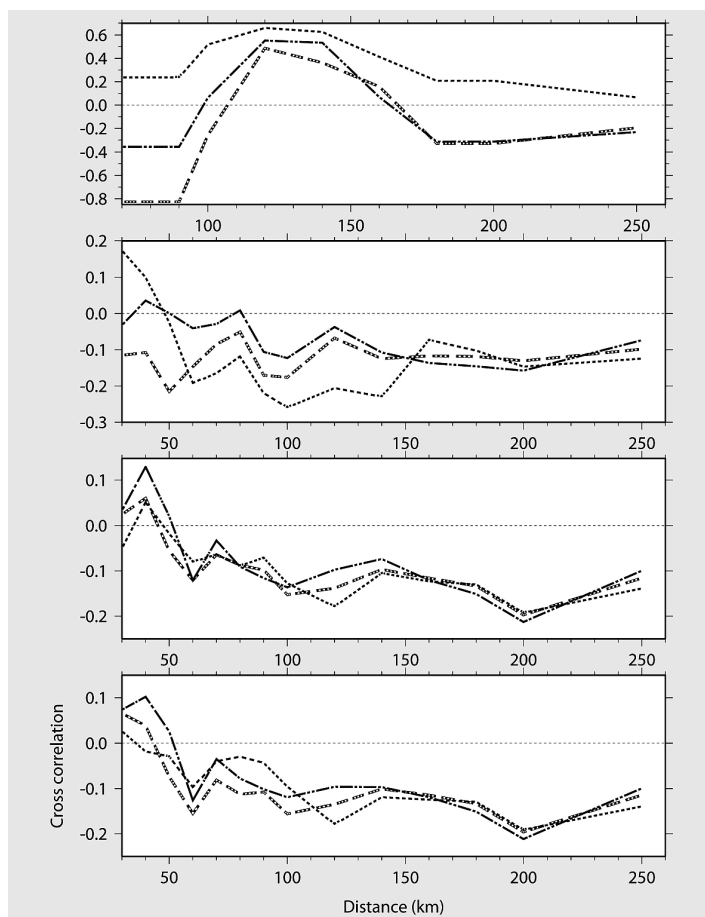
Η ανάλυση διασυσχέτισης μεταξύ του εύρους των παλιρροϊκών κυμάτων που αναφέρθηκαν παραπάνω και των δεικτών σεισμικότητας K, πραγματοποιήθηκε λαμβά-

νοντας υπόψη σεισμούς διαφορετικού μεγέθους και σε διάφορες αποστάσεις από τον σταθμό μέτρησης των βαρομετρικών πιέσεων. Πιο συγκεκριμένα, οι δείκτες σεισμικότητας υπολογίστηκαν λαμβάνοντας υπόψη i) σεισμούς με $M \geq 2$, $M \geq 3$, $M \geq 4$ και $M \geq 5$ και ii) για όλες τις περιπτώσεις της i) συμπεριλαμβανομένων, για τον υπολογισμό του K , των σεισμών με αποστάσεις που κυμαίνονται από 30 έως 250 χλμ από το σταθμό μέτρησης των βαρομετρικών πιέσεων.

Στην Εικόνα 4 παρουσιάζονται οι συντελεστές της διασυσχέτισης μεταξύ του εύρους των κυμάτων μακράς περιόδου S_{sa} , M_m , M_f και M_{tm} και του δείκτη σεισμικότητας K , για όλες τις τιμές του M και για όλες τις αποστάσεις που αναφέρθηκαν



Εικόνα 4. Οι συντελεστές της διασυσχέτισης μεταξύ του εύρους των μακράς περιόδου κυμάτων S_{sa} (εστιγμένη με κενά), M_m (διακεκομμένη με διπλή στίξη), M_f (εστιγμένη) και M_{tm} (συνεχής) και του δείκτη σεισμικότητας K . Από τη βάση προς την κορυφή της εικόνας: το K υπολογίστηκε περιλαμβάνοντας σεισμούς με $M \geq 2$, $M \geq 3$, $M \geq 4$ και $M \geq 5$ αντίστοιχα.



Εικόνα 5. Οι συντελεστές της διασυσχέτισης μεταξύ του εύρους των βραχείας περιόδου κυμάτων P1 (εστιγμένη με κενά), K1 (διακεκομμένη με διπλή στίξη) και S2 (εστιγμένη) και του δείκτη σεισμικότητας K. Από τη βάση προς την κορυφή της εικόνας: το K υπολογίσθηκε περιλαμβάνοντας σεισμούς με $M \geq 2$, $M \geq 3$, $M \geq 4$ και $M \geq 5$ αντίστοιχα.

στην προηγούμενη παράγραφο. Η διασυσχέτιση υπολογίστηκε αγνοώντας τις περιόδους ηρεμίας ($K=0$). Αν αυτές οι περιόδοι περιληφθούν στην ανάλυση οι συντελεστές συσχέτισης που θα προκύψουν θα έχουν αξιοσημείωτα μειωμένες τιμές. Μια εύλογη ερμηνεία αυτού μπορεί να είναι ότι υπάρχουν πολλοί παράγοντες που επηρεάζουν τις μεταβολές της βαρομετρικής πίεσης.

Σημειωτέον ότι για $M \geq 5$ (επάνω διάγραμμα της εικόνας 4) το K υπολογίσθηκε ξεκινώντας από μια ακτίνα συλλογής 70 χλμ., καθώς υπάρχουν πολύ λίγοι σεισμοί σε μικρότερες αποστάσεις από την Θεσσαλονίκη κατά τη διάρκεια όλης της περιόδου

που εξετάζεται. Η κλίμακα των συντελεστών συσχέτισης είναι διαφορετική σε κάθε διάγραμμα. Στην Εικόνα 4 εμφανίζεται ότι προκύπτουν αξιοσημείωτοι συντελεστές συσχέτισης για τιμές του K που υπολογίσθηκαν με σχετικά μικρή ακτίνα συλλογής (μέχρι 50 χλμ.) από τον σταθμό μέτρησης της βαρομετρικής πίεσης. Αυξάνοντας την ακτίνα συλλογής η συσχέτιση γίνεται ασθενέστερη και πρακτικά μηδενίζεται μετά την απόσταση των 150 χλμ. περίπου. Επιπλέον, η συσχέτιση γίνεται ισχυρότερη για K που περιλαμβάνει σεισμούς με $M \geq 4$, παρόλο που προκύπτουν μεγαλύτερες τιμές του K όταν συμπεριλαμβάνονται σεισμοί με $M \geq 3$ και $M \geq 2$. Απ' αυτή την άποψη συμπεραίνεται ότι σεισμοί με $M < 4$ δεν συσχετίζονται με την σεισμικότητα της εξεταζόμενης περιοχής και συνεπώς συμπεριφέρονται ως θόρυβος, μειώνοντας με αυτό τον τρόπο περαιτέρω τη συσχέτιση.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης διασυσχέτισης μεταξύ των τιμών του K και του εύρους των κυμάτων βραχείας περιόδου εμφανίζονται στην Εικόνα 5. Παρουσιάζεται ανιχνεύσιμη συσχέτιση μεταξύ του εύρους των ημερήσιων και ημihμερήσιων κυμάτων και των τιμών του K , όπως εμφανίζεται στην Εικόνα 5, όταν για τον υπολογισμό του K λαμβάνονται υπόψη σεισμοί με $M \geq 5$. Είναι αξιοσημείωτο ότι η ανιχνεύσιμη συσχέτιση προέκυψε για δείκτη σεισμικότητας ο οποίος υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας ακτίνες συλλογής από 100 έως 150 χλμ. Αυτό μπορεί να ερμηνευτεί ως ένας δείκτης όπου τα βραχείας περιόδου κύματα είναι πιο ευαίσθητα από τα κύματα μακράς περιόδου σε σεισμικότητα που προέρχεται από απομακρυσμένες περιοχές.

5. Συμπεράσματα

Η ανάλυση των βαρομετρικών παλινροιών στην περιοχή της Θεσσαλονίκης έδειξε μια καθαρή συσχέτιση μεταξύ των διαταραχών του εύρους ορισμένων ομάδων κυμάτων με την σεισμικότητα της εξεταζόμενης περιοχής, λαμβάνοντας υπόψη στον υπολογισμό του K σεισμούς με $M \geq 4$, σε αποστάσεις 40 έως 50 χλμ. από το σταθμό μέτρησης της βαρομετρικής πίεσης.

Η συσχέτιση είναι ισχυρότερη σε κύματα μακράς περιόδου τα οποία, σύμφωνα με την ανάλυσή μας, παρουσιάζουν μεγαλύτερες τιμές λόγου σήματος προς θόρυβο, απ' αυτές των κυμάτων βραχείας περιόδου. Σ' αυτή την τελευταία περίπτωση η συσχέτιση είναι ασθενέστερη αλλά όχι αμελητέα.

Η συσχέτιση γίνεται ασθενέστερη αυξάνοντας την ακτίνα συλλογής των σεισμών για τον υπολογισμό του δείκτη σεισμικότητας. Απ' την άλλη πλευρά, η συσχέτιση γίνεται ασθενέστερη όταν συμπεριλαμβάνονται στο υπολογισμό του δείκτη σεισμικότητας, σεισμοί μικρού μεγέθους, παρόλο που ο δείκτης σεισμικότητας αυξάνει. Αυτή η συμπεριφορά μας επιτρέπει να προτείνουμε την υπόθεση ότι ισχυροί σεισμοί, ακόμη και μακρινοί, ή ασθενείς σεισμοί πολύ κοντά στην περιοχή μελέτης, δεν συσχετί-

ζονται με τις παλιρροϊκές μεταβολές της βαρομετρικής πίεσης.

Η μελέτη της συσχέτισης μεταξύ της σεισμικότητας και των βαρομετρικών παλιρροϊκών εξάρσεων μπορεί να είναι χρήσιμη ως πρόδρομη εκδήλωση, στην περίπτωση που θα ήταν δυνατό να αναγνωρισθούν παλιρροϊκές βαρομετρικές εξάρσεις χρησιμοποιώντας βραχύτερες χρονοσειρές βαρομετρικών παρατηρήσεων.

Τα αποτελέσματά αυτής της εργασίας είναι δυνατό να θεωρηθούν ότι είναι σύμφωνα ή τουλάχιστον δεν έρχονται σε αντίθεση με την γενική ιδέα του μηχανισμού προσεισμικών φαινομένων στην ατμόσφαιρα και στην ιονόσφαιρα που αναλύθηκε στο πρώτο κεφάλαιο. Σύμφωνα με αυτή την άποψη, πρόδρομα φαινόμενα όπως ατμοσφαιρικές διαταραχές της θερμοκρασίας, της πυκνότητας κ.λπ., προκύπτουν από πιθανή προς τα πάνω μετακίνηση της υγρής ύλης του υποστρώματος, στις περιοχές του φλοιού που χαρακτηρίζονται από χαμηλή αντοχή.

Βιβλιογραφία

1. Arabelos, D., Asteriadis, G., Contadakis, M.E., Spatalas S.D. and Sachsamanoglou, H., 1997. *Atmospheric tides in the area of Thessaloniki*. J. Geodynamics, 23: 65-75.
2. Arabelos, D., Asteriadis, G., Bloutsos, A., Contadakis, M.E., Kaltsikis, Chr. and Spatalas S.D., 2003. *Atmospheric tides in the area of Thessaloniki-North Greece. A twenty-seven years data analysis, From Stars to Earth and Culture*, In honour of the memory of Professor Alexandros Tsioumis. In: A. Dermanis (Editor), Publishing Ziti, Thessaloniki, pp. 201-207.
3. Arabelos, D., Asteriadis, G., Bloutsos, A., Contadakis, M.E. and Spatalas S.D., 2004. *Atmospheric tide disturbances as earthquake precursory phenomena*. Natural Hazard and Earth System Sciences, 4: 1-7.
4. Bartzokas, A., 1989. *Dynamical factors influencing the daily barometric fluctuation in the vicinity of the ground, in the area of Greece*, Ph. D. Dissertation, University of Ioannena, Greece, 208 pp.
5. Bartzokas A., Repapis, C.C. and Metaxas, D.A., 1995. *Temporal variations of atmospheric tides over Athens*, *Meteorol. Atmos. Phys.*, 55: 113-123.
6. Biagi, P.F., Piccolo, R., Capozzi, V., Ermini, A., Martellucci, S. and Ballecci, C., 2003. Exalting in atmospheric tides as earthquake precursor, *Natural Hazard and Earth System Sciences*, 3(3/4): 197-201.
7. Chapman, S. and Lindzen, R.S., 1970. *Atmospheric Tides*, *Dortrecht-Holland*: D. Reidel, 200 pp.
8. Gorbaticov, A.V., Kodama, T., Molchanov, O.A. and Hayakawa, M., 1999. *Long period variations in seismic and electromagnetic measurements, in Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes*, In: M. Hayakawa (Editor), *Terra Sci. Publ. Comp.*, pp. 439-450.

9. Hayakawa, M., O.A. Molchanov, T. Ondoh and E. Kawai., 1996. *The precursory signature effect of the Kobe earthquake in VLF subionospheric signal*. J. Comm. Res. Lab., Tokyo, 43: 169-180.
10. Hayakawa, M.(Ed), 1999. *Atmospheric and Ionospheric Phenomena Associated with Earthquakes*. Terrapub, Tokyo, 996 pp.
11. Hayakawa, M., Molchanov, O.A. (Eds), 2002. *Seismo Electromagnetics, Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling*. Terrapub, Tokyo, 477 pp.
12. Mareev, E.A., Iudin, D.I. and Molchanov, O.A., 2002. *Mosaic source of internal gravity waves associated with seismic activity*, In: Hayakawa M. and Molchanov O. (Editors), *Seismo-Electromagnetics (lithosphere-atmosphere-ionosphere coupling)*, Terrapub, Tokyo, pp. 335-342.
13. Molchanov, O., Schekotov, A., Fedorov, E., Belyaev, G. and Gordeev, E., 2003. *Pre-seismic ULF electromagnetic effect from observation at Kamchatka*. Natural Hazards and Earth System Sciences, 3(3/4): 203-209.
14. Molchanov, O., Fedorov, E., Schekotov, A., Gordeev, E., Chebrov, V., Surkov, V., Rozhnoi, A., Andreevsky, S., Iudin, D., Yunga, S., Lutikov, A., Hayakawa, M., and Biagi, P.F., 2004. *Lithosphere-atmosphere-ionosphere coupling as governing mechanism for preseismic short-term events in atmosphere and ionosphere*, Natural Hazards and Earth System Sciences, 4(5/6): 757-767.
15. Plotkin, V.V., 2003. *GPS detection perturbation before the 13 February 2001, El Salvador earthquake*. Natural Hazard and Earth System Sciences, 3(3/4): 249-253.
16. Rikitake, T. (ed), 1981. *Current Research in Earthquake Prediction*, Vol. I, Developments in Earth and Planetary Sciences, D. Reidel, London.
17. Silina, A.S., Liperovskaya, E.V., Liperovsky, V.A. and Meister, C.V., 2001. *Ionospheric phenomena before strong earthquakes*, Natural Hazard and Earth System Sciences, 1: 113-118.
18. Tamura, Y., 1987. *A harmonic development of the tide generating potential*. Bulletin d'Information Marées Terrestres, 99: 6813-6855.
19. Tzanis, A. and Vallianatos, F., 2003. *Distributed power-law seismicity changes and crustal deformation in the SW Hellenic arc*, Natural Hazard and Earth System Sciences, 3: 179-195.