

## Ο ΣΕΙΣΜΟΣ ΤΟΥ 365 Μ.Χ. ΑΠΟ ΤΟ ΘΡΥΛΟ ΣΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ\*

Α.Γ. ΔΡΑΚΟΣ<sup>1</sup>, Σ.Κ. ΣΤΕΙΡΟΣ<sup>1</sup>

### ΣΥΝΟΨΗ

Ο σεισμός της 21<sup>ης</sup> Ιουλίου του 365 μ.Χ. ήταν ένα γεγονός που συνεπήρε πολλούς αρχαίους συγγραφείς για 1000 και πλέον χρόνια, λόγω του μεγάλου μεγέθους του και των τεράστιων καταστροφών που προκάλεσε στην ευρύτερη περιοχή της Ανατολικής Μεσογείου, αλλά κυρίως λόγω ενός γιγαντιαίου τσουνάμι που προκάλεσε. Παρόλ' αυτά, δεν έχει γίνει μέχρι σήμερα λεπτομερής μελέτη και υπολογισμός των παραμέτρων του σεισμικού ρήγματος που προκάλεσε το σεισμό αυτό - αντίθετα, αποτέλεσε ένα θρύλο και σημείο διαμάχης ανάμεσα στους ιστορικούς. Συσχέτιση ιστορικών και αρχαιολογικών στοιχείων επέτρεψαν να προσδιοριστεί η πλειόσειστη περιοχή του σεισμού, η οποία εκτεινόταν από την δυτική Κύπρο μέχρι τις ακτές της Λιβύης, ενώ αντιστροφή των μέχρι 9m ανυψώσεων της Δυτικής Κρήτης που αναμφίβολα συνδέονται με το σεισμό αυτό με βάση την ελαστική ανάλυση και λογισμικό που χρησιμοποιείται σε γεωδαιτικά στοιχεία επέτρεψε να υπολογιστούν παράμετροι του σεισμικού ρήγματος. Ο σεισμός του 365 μ.Χ. πιθανότατα προκλήθηκε από τη δράση ενός ανάστροφου ρήγματος ΝΔ της Κρήτης, με μήκος μεγαλύτερο των 100km, και είχε εκτιμώμενο μέγεθος 8.5-8.7.

### ABSTRACT

A major earthquake shook the entire East Mediterranean region on July 21<sup>st</sup> AD 365; numerous cities were completely ruined or seriously damaged, while a tsunami that followed destroyed the Nile Delta. This disaster impressed ancient writers for more than 1000 years and it turned to a legend.

Despite the fact that the AD 365 earthquake is probably the greatest one that took place in the East Mediterranean region in the historic period, it has not been studied in detail. The main reason is that the historical data are poor, ambiguous and contradictory, and do not permit any secure seismological conclusions. Yet, many workers have concluded that this earthquake was associated with a fault along the Hellenic Arc, SW of Crete, in agreement with geomorphological, biological and radiometric data indicating that the western part of the island was uplifted by up to 9m by an earthquake in the 4<sup>th</sup> century AD. New archaeological data permit to shed more light to this earthquake and to identify its meizoseismal area, extending from western Cyprus to the Libyan coasts. Furthermore, an elastic dislocation analysis of the earthquake uplift, deduced from coastal data, permits to conclude that the causative fault was an east-west striking inverse fault at least 100km long, southwest of Crete, associated with an earthquake of magnitude of the order of  $M=8.5-8.7$ .

**ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ:** Ανατολική Μεσόγειος, ανυψωμένες ακτές, σεισμός του 365 μ.Χ., τσουνάμι, αντιστροφή επιφανειακών παραμορφώσεων σε ελαστικό ημιχώρο, προσομοίωση ρήγματος.

**KEY WORDS:** Eastern Mediterranean, uplifted coasts, AD 365 earthquake, tsunami, elastic dislocation analysis, fault modeling.

### 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Μπορεί η Ανατολική Μεσόγειος να είναι μια περιοχή όπου συχνά εκδηλώνονται μεγάλοι σεισμοί, όμως σε όλη την ιστορική περίοδο μόνο ένας από αυτούς κατάφερε να γίνει θρύλος σε βαθμό τέτοιο που ακόμη και τα γενέσια του σεισμού αυτού γιορτάζονταν κάθε χρόνο για αιώνες (Guidoboni et al., 1994). Πρόκειται για το σεισμό της 21<sup>ης</sup> Ιουλίου του 365 μ.Χ., ένα σεισμό που συνεπήρε τους αρχαίους συγγραφείς για τουλάχιστον 1000 χρόνια, όχι τόσο για τα καταστρεπτικά του αποτελέσματα σε πόλεις και κτίρια σε όλη σχεδόν την Ανατολική Μεσόγειο, αλλά κυρίως για το τσουνάμι που προκάλεσε.

Όμως, ο σεισμός αυτός συνέβη σε μια περίοδο πολιτικής και πολιτισμικής παρακμής της Ρωμαϊκής αυτοκρατορίας και θρησκευτικών αναστατώσεων, και γι' αυτό παρουσιάστηκε όχι ως ιστορικό γεγονός, όπως θα συνέβαινε σε προωμότερες περιόδους, αλλά ως επιχείρημα κατά ή υπέρ της νέας Χριστιανικής θρησκείας αγνώντας ή παραποιώντας τα ιστορικά γεγονότα. Για παράδειγμα, ο Λιβάνιος και ο Σωζόμενος, δύο βασικές

\* THE AD 365 EARTHQUAKE. FROM LEGEND TO MODELING.

1. Εργαστήριο Γεωδαισίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, 26500 Πάτρα.

πηγές για τη σεισμική ιστορία της Ανατολικής Μεσογείου περί το 360 μ.Χ., εμφανίζουν το σεισμό του 365 είτε ως έκφραση λύπης είτε ως οργή του Θεού για το χαμό του αυτοκράτορα Ιουλιανού, του γνωστού ως Παραβάτη, που προσπάθησε να αναβιώσει την αρχαία θρησκεία. Συνεπώς, ακολουθώντας τον μεν Λιβάνιο ο σεισμός πρέπει να χρονολογηθεί μετά το θάνατό του Ιουλιανού το 363 μ.Χ., είτε ακολουθώντας αντίστοιχα το Σωζόμενο πριν το 363 μ.Χ. Αντίστοιχα, μιά πληροφορία για ένα θαύμα του Αγίου Παρίωνα που φέρεται να σήκωσε τα χέρια του και να σταμάτησε το τσουνάμι πριν χτυπήσει μιά πόλη στην Αδριατική, λαμβάνεται συνήθως ως απόδειξη ότι το τσουνάμι είχε σημαντική ένταση στην Αδριατική (Jacques and Bousquet, 1984). Ομως, η πληροφορία για το θαύμα αυτό δεν έχει προφανώς θετική σεισμολογική σημασία όπως εάν τυχόν αναφερόταν ότι η συγκεκριμένη πόλη είχε καταστραφεί από τα κύματα (Stiros, 2001).

Γι' αυτό, παρόλο που ο σεισμός αυτός ή αποτελέσματά του αναφέρονται σε περισσότερα από 40 αρχαία κείμενα (Guidoboni et al., 1994; Jacques and Bousquet, 1984), οι διαθέσιμες ιστορικές πληροφορίες είναι ασαφείς και αντιφατικές και η σεισμολογική πληροφορία αβέβαιη: το ίδιο γεγονός χρονολογείται από διάφορους αρχαίους συγγραφείς σε διαφορετικές περιόδους με απόκλιση από ένα μήνα έως και δεκάδες χρόνια δίνοντας την εντύπωση πολλαπλών σεισμών που κατέστρεψαν πόλεις από το Γιβραλτάρ μέχρι το Ισραήλ (Στείρος et al., 2001).

Για το λόγο αυτό, ο σεισμός του 365 αποτέλεσε αντικείμενο διαμάχης μεταξύ των νεώτερων και σύγχρονων ιστορικών για πάνω από 200 χρόνια, μια διαμάχη που δυστυχώς δεν κατέληξε σε ασφαλή και αξιόπιστα αποτελέσματα, με βάση μόνο τα ιστορικά στοιχεία. Για παράδειγμα ακόμη και στην πιο λεπτομερή μελέτη ιστορικής σεισμικότητας (Guidoboni et al., 1994) τα καταστροφικά του αποτελέσματα του σεισμού αυτού έχουν αποδοθεί σε περίπου 10 διαφορετικούς σεισμούς που συνέβησαν μεταξύ 361 και 450 μ.Χ (Stiros, 2001)!

Τα τελευταία χρόνια όμως, νέα στοιχεία έχουν γίνει διαθέσιμα και επιτρέπουν την ανασύνθεση του παζλ του σεισμού αυτού. Πρώτον, γεωλογικά στοιχεία που περιγράφουν την ανύψωση μέχρι και 9 μ. του δυτικού τμήματος της Κρήτης κατά την κρίσιμη περίοδο (Pirazzoli et al., 1992). Δεύτερον, αρχαιολογικά στοιχεία που επιτρέπουν να χρονολογηθούν οι καταστροφές πόλεων και κτισμάτων σε ένα στενό χρονικό πλαίσιο έτσι ώστε να γίνει συσχετισή τους με το σεισμό του 365 μ.Χ.

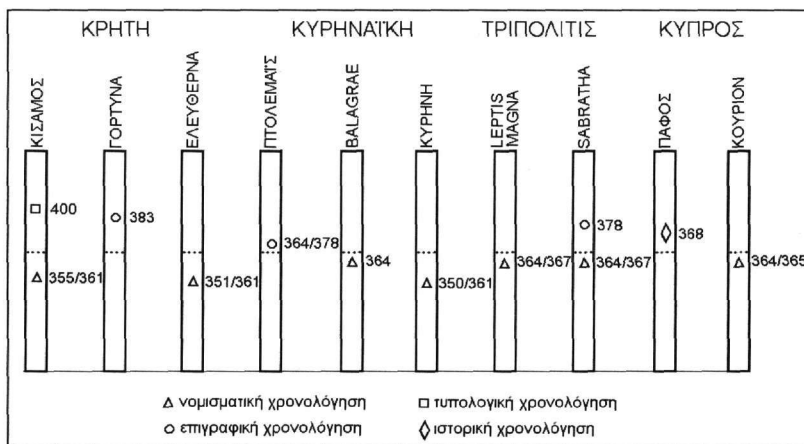
Παρόλ' αυτά, τα γεωλογικά και αρχαιολογικά στοιχεία από μόνα τους δεν μπορούν να δώσουν πληροφορίες για το μηχανισμό του σεισμού του 365. Για το λόγο αυτό γίνεται μια προσπάθεια επεξεργασίας τους με τη μέθοδο και το λογισμικό που συνήθως εφαρμόζεται στην αντιστροφή γεωδαιτικών στοιχείων που περιγράφουν εδαφικές παραμορφώσεις στην πλειόσειστη περιοχή ορημάτων (Stiros and Drakos, 2000). Με τον τρόπο αυτό και από τις σεισμική ανύψωση των ακτών της Κρήτης μπορεί να εκτιμηθούν παράμετροι του σεισμικού ρήγματος του 365 μ.Χ.

## 2. ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΑ ΚΑΙ ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Πρόσφατες ανασκαφές στη Δυτική Κρήτη (Κίσαμο, Ελεύθερνα, κλπ) έχουν φέρει στο φως αρχαίες πόλεις που ισοπεδώθηκαν από σεισμό το δεύτερο μισό του 4<sup>ου</sup> αιώνα, όπως αποδεικνύουν χαρακτηριστικές καταρρευσείς κτιρίων που έχουν καταπλακώσει τους κατοίκους τους. Νομίσματα που βρέθηκαν κάτω από τις πεσμένες στέγες, ακόμη και σε τσέπες θυμάτων, προσδιορίζουν ότι το γεγονός συνέβη λίγο μετά την κοπή των νομισμάτων, δηλαδή γύρω στο 365 (Stiros and Parageorgiou, in press; Stiros, 2001; Στείρος et al., 2001). Πρόβλημα χρονολόγησης σεισμικής καταστροφής υπήρχε για χρόνια στη Γόρτυνα, τη Ρωμαϊκή πρωτεύουσα της Κρήτης, στην οποία ιστορικές πηγές (Μαλαλάς) ήθελαν ένας σεισμός επί αυτοκράτορος Θεοδοσίου να έχει καταστρέψει τα Λουτρά που είχε κτίσει ο Ιούλιος Καίσαρ. Ενώ δεν διευκρινίζεται ποιός είναι ο Θεοδόσιος, ο Α' (379-395) ή ο Β' (408-450), η αρχαιολογική σκαπάνη έφερε στο φως εκτεταμένες σεισμικές καταστροφές του 4ου αιώνα, οι οποίες από επιγραφή χρονολογούνται πριν το 378. Μάλιστα, τα αναφερόμενα Λουτρά αποδείχτηκε ότι είχαν από παλιότερα καταστραφεί και στη θέση τους είχε χτιστεί το Διοικητήριο της πόλης. Συνεπώς, και της Γόρτυνος η καταστροφή πρέπει να ενταχθεί στην "καταστροφή των 100 πόλεων της Κρήτης" που αναφέρονται ακριβέστερες πηγές.

Αντίστοιχη με της Κρήτης εικόνα υπάρχει στην Κύπρο, κυρίως στο Κούριο, όπου ο συνδυασμός νομισματικών και ιστορικών στοιχείων προσδιορίζει ότι η σεισμική καταστροφή της Δυτικής Κύπρου, που οδήγησε και στην μεταφορά της πρωτεύουσάς της στο Ανατολική τμήμα του Νησιού, στη Σαλαμίνα έγινε μεταξύ του τέλους του 364 και του Σεπτεμβρίου του 365 μ.Χ (όπως υποδεικνύουν τα νομίσματα) και του 368 (όπως δείχνουν τα ιστορικά στοιχεία).

Όσον αφορά τη Λιβύη, υπήρχε για χρόνια διαμάχη εάν η Τριπολίτιδα και η Κυρηναϊκή είχαν θιγεί από σεισμό περί το 365, όπως υποστήριζε ο Di Vita (1995) ή όχι, όπως υποστήριζε βασισμένος σε δύο κείμενα που περιγράφουν τη θρησκευτική ιστορία της Βόρειας Αφρικής ο Leppeley (1984). Τα αρχαιολογικά στοιχεία που δείχνουν μιά εικόνα σεισμικής καταστροφής ίδια με αυτή της Κρήτης, καθώς και ιστορικά κείμενα που παρουν-



Σχήμα 1: Συσχέτιση στρωμάτων καταστροφής σε πόλεις της Ανατολικής Μεσογείου κατά τον 4<sup>ο</sup> αιώνα μ.Χ.

Πηγή: Stiros (2001), Στείρος et al. (2001).

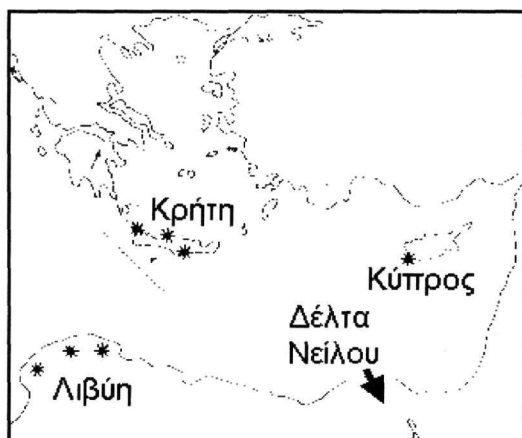
Figure 1: Correlation of the destroyed layers of cities in the Eastern Mediterranean on the AD 4<sup>th</sup> century. Source: Stiros (2001), Στείρος et al. (2001).

σίασαν οι Guidoboni et al. (1994) και αναφέρουν σαφώς σεισμό κατά την κρίσιμη περίοδο, οδηγούν στο συμπέρασμα ότι και τα παράλια της Λιβύης δοκιμάστηκαν σκληρά περί το 365 από μεγάλο σεισμό.

Οι πληροφορίες για άλλες περιοχές, πχ. ηπειρωτική Ελλάδα, Ισραήλ, Σικελία είναι ακόμη πιο ασαφείς, και ενώ φαίνεται ότι οι περιοχές αυτές, ιδιαίτερα η Πελοπόννησος επηρεάστηκαν σε κάποιο βαθμό από το σεισμό αυτό, το μέγεθος των καταστροφών θα ήταν περιορισμένο. Ειδικά για το Αιγαίο, φαίνεται ότι ο σεισμός μάλλον δεν απετέλεσε σημαντικό πρόβλημα, ενώ από τον ιστορικό Ζώσιμο (5.6.2) προσδιορίζεται σαφώς ότι η Αθήνα δεν υπέστη καμία σημαντική βλάβη. Τέλος, ο ρήτορας Λιβάνιος περιλαμβάνει και τη Μέση Ανατολή στις περιοχές που δοκιμάστηκαν από το σεισμό της περιόδου εκείνης, αλλά προφανώς ρητορικά αναμινγύει το σεισμό του 365 με το γνωστό σεισμό της 18-19 Μαΐου 363 της Παλαιστίνης (Guidoboni et al., 1994).

Η σύνοψη των αποτελεσμάτων αυτών στο Σχήμα 1 καθιστά σαφές ότι σε ένα χρονικό διάστημα λίγων το πολύ ετών σημαντικοί σεισμοί προκάλεσαν καταστροφές χωρίς προηγούμενο στην Ανατολική Μεσόγειο.

Το βασικό ερώτημα που τίθεται επομένως είναι αν οι σεισμικές καταστροφές αυτές (κυρίως Κρήτης, Κύπρου και Λιβύης), καθώς και το τσουνάμι του Δέλτα του Νείλου (Σχ.2) μπορούν να αποδοθούν σε ένα και το αυτό γεγονός, ή συνιστούν αποτελέσματα διαφορετικών σεισμών.



Σχήμα 2: Σεισμικές καταστροφές σε Κρήτη, Λιβύη, Κύπρο, και τσουνάμι του Δέλτα του Νείλου στο τέλος του 4<sup>ου</sup> αιώνα μ.Χ. (Stiros and Papageorgiou, in press).

Figure 2: Seismic catastrophe in Crete, Libya, Cyprus and the tsunami of Nile Delta in the end of the 4<sup>th</sup> AD century (Stiros and Papageorgiou, in press).

Ασφαλώς η απάντηση στο ερώτημα αυτό δεν είναι εύκολη. Ομως, πιστεύουμε ότι παρότι η περίπτωση πολλαπλών σεισμικών γεγονότων σε σύντομο χρονικό διάστημα, ένδειξη για την οποία παρέχουν γεωλογικά και ιστορικά στοιχεία (Pirazzoli et al., 1996; Stiros, 2001) ή γεγονότων μιας ενιαίας σεισμικής ακολουθίας δεν μπορεί να αποκλειστεί, τα υπάρχοντα ιστορικά και αρχαιολογικά στοιχεία επιτρέπουν μιά καταφατική απάντηση, όπως αναλύεται και σε επόμενη παράγραφο. Οι λόγοι είναι δύο:

**Πρώτον**, οι αρχαίες πηγές, παρά τα σφάλματα στη χρονολόγηση του σεισμού, κυρίως από μεταγενέστερους ιστορικούς, μιλούν σαφώς για ένα και μοναδικό σεισμό που συγκλόνισε όλο τον κόσμο ("tergaemotu per totum orbem facto, Migne, PL 27, 694), και του οποίου η ημερομηνία είναι γνωστή τόσο από σχεδόν σύγχρονα κείμενα, όσο και από τον εορτασμό των γενεσίων του γεγονότος επί τουλάχιστον δύο αιώνες.

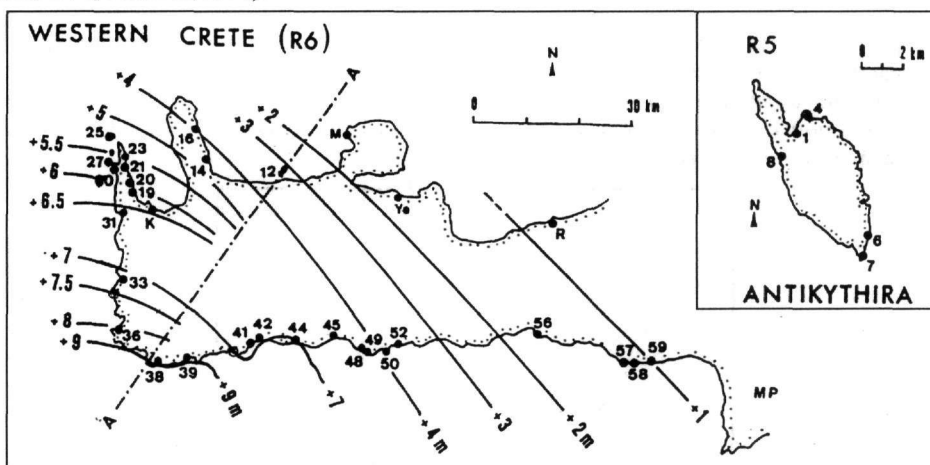
**Δεύτερον**, σαφώς ο σεισμός της Κρήτης συνδέεται σαφώς με το τσουνάμι, και κατά πάσα πιθανότητα με μόνιμες μεταβολές ακτών, όπως την απόσυρση της θάλασσας που παρατηρείται στην Κρήτη (Hist. Eccles. 4,3, Migne PG 67, 468).

### 3. ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Λεπτομερείς μορφολογικές, βιολογικές, ιζηματολογικές αναλύσεις καθώς και πλήθος ραδιοχρονολογήσεων, έχουν οδηγήσει στο συμπέρασμα πως στο τέλος του 4<sup>ου</sup> αιώνα μ.Χ. (370±52) εκδηλώθηκε μια ανύψωση των ακτών του δυτικού τμήματος της Κρήτης που φτάνει τα 9m στο νοτιοδυτικό τμήμα του νησιού (Σχ.3, Thommeret et al., 1981; Pirazzoli et al., 1982; Kelletat, 1991; Stiros, 1996).

Η ανύψωση αυτή αναμφίβολα συνδέεται με σεισμό μεγάλου μεγέθους, δεδομένου ότι:

- (1) Η ανύψωση σύμφωνα με ραδιομετρικά στοιχεία συνέβη σε μικρό σχετικά χρονικό διάστημα (100-200 το πολύ χρόνια), εκτείνεται σε συγκεκριμένο χώρο (Δυτική Κρήτη και Αντικύθηρα, σε μήκος περίπου 100km) και έχει μεταβλητό εύρος, 0-9m (Thommeret et al., 1981; Pirazzoli et al., 1982, Σχ.3). Αν ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι η δυτική Κρήτη δεν επηρεάζεται από ισοστατικά φαινόμενα τέτοιας κλίμακας και ηφαιστειακά φαινόμενα, η ανύψωση αυτή πρέπει ασφαλώς να αποδοθεί σε σεισμικό γεγονός.
- (2) Απολιθώματα ευαίσθητων θαλάσσιων μικροοργανισμών που ζούσαν κοντά στη στάθμη της θάλασσας λίγο πριν το 365 (Βρυόζωα κλπ), βρέθηκαν αρκετά μέτρα πάνω από την επιφάνεια του νερού, χωρίς ίχνη διάβρωσης της παλαιοραιοζώνης (Thommeret et al., 1981). Το φαινόμενο αυτό μπορεί να ερμηνευθεί μόνο με την υπόθεση ενός σεισμού που προκάλεσε μεγάλου εύρους απότομη ανύψωση των ακτών (Laborel and Laborel, 1994; Pirazzoli, 1996).



Σχήμα 3: Ανυψωμένες ακτές της δυτικής Κρήτης και των Αντικυθήρων κατά τους Pirazzoli et al. (1982).  
Figure 3: Uplifted coasts of the western Crete and of Antikythira (Pirazzoli et al., 1982).

### 4. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΟΥ ΡΗΓΜΑΤΟΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗ ΓΕΩΛΑΙΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η μέθοδος που εφαρμόστηκε για την επεξεργασία των στοιχείων είναι η "Αντιστροφική Γεωδαιτικών Στοιχείων". Η μέθοδος βασίζεται στη θεωρία του "Ελαστικού Ημιχώρου" και υπολογίζει τις μετακινήσεις που δημιουργούνται στην επιφάνεια του εδάφους από τη δράση ενός ρήγματος με συγκεκριμένες παραμέτρους (μήκος, πλάτος, κλίση, διεύθυνση, ολισθήση). Μπορούν να προσομοιωθούν όλα τα είδη ρηγμάτων που συναντώνται στη φύση δηλαδή κανονικά, ανάστροφα και ρήγματα διάτμησης με την κατάλληλη εισαγωγή παραμέτρων (Okada, 1985).

Για να βρεθούν οι παράμετροι του ρήγματος που έχει προκαλέσει τις γνωστές μετακινήσεις της επιφάνειας του εδάφους, δοκιμάζονται διάφορα μοντέλα ρηγμάτων και οι μετακινήσεις που προκύπτουν συγκρίνονται με τις πραγματικές μετακινήσεις. Όταν θεωρητικά υπολογισμένες και πραγματικές μετακινήσεις συμπίπτουν, τότε το προσομοιωμένο ρήγμα θεωρείται ότι ταυτίζεται με αυτό που προκάλεσε τον εξεταζόμενο σεισμό. Η λύση συνήθως δεν είναι μοναδική, αλλά επιλέγεται αυτή που είναι συμβατή με τη μορφολογία και την τεκτονική κάθε περιοχής. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να υπολογιστούν ο μηχανισμός γένεσης σεισμών και οι παράμετροι σεισμικών ρηγμάτων σε περιπτώσεις για τις οποίες τα σεισμολογικά δεδομένα είναι ασαφή, ανεπαρκή ή και ανύπαρκτα.

Η προσομοίωση του ρήγματος του 365 βασίστηκε στις εξής υποθέσεις:

1. Οι ανυψώσεις ακτών Κρήτης και Αντικυθήρων που εκτιμήθηκαν από τους Thommeret et al. (1981) και Pirazzoli et al. (1982) θεωρούνται ότι εκφράζουν σε γενικές γραμμές τη σεισμική ανύψωση του 365. Η υπόθεση αυτή δικαιολογείται από το γεγονός ότι δεν έχει αναφερθεί καμία σημαντική μεταβολή ακτών στη Δυτική Κρήτη μετά τον 4ο αιώνα (Stiros, 1996). Θεωρήθηκε ότι η Γαύδος δεν υπέστη ανύψωση ή βύθιση κατά το σεισμό του 365. Το σημείο αυτό εξετάζεται και σε επόμενη παράγραφο. Αυτά τα στοιχεία αποτελούν και τα μοναδικά δεδομένα επιφανειακής παραμόρφωσης που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση.
2. Η σεισμική ανύψωση συνδέεται με μεγάλης κλίμακας ανάστροφο ρήγμα ΝΔ της Κρήτης, κατά μήκος του Ελληνικού τόξου. Τέτοια ρήγματα δεν εμφανίζονται μεν στην επιφάνεια, όπου επικρατούν οι εφελκυστικές δομές, οι οποίες όμως αποτελούν επιδερμικές δομές. Η υπόθεση αυτή είναι αφ' ενός συμβατή με σεισμοτεκτονικά στοιχεία (Taymaz et al., 1990), αφ' ετέρου δε με εκτιμήσεις έγκυρων ερευνητών ότι ο σεισμός του 365 ήταν πιθανότατα ένας σεισμός μέσου βάθους, με μέγεθος  $M > 8.0$  στην περιοχή της Κρήτης (Ambraseys et al., 1994; Papazachos and Papazachou, 1997).
3. Τέλος, δεν επιχειρήθηκε τα προσομοιούμενα ρήγματα να αποτελούν μίμηση των ρηγμάτων που προκύπτουν από μηχανισμούς γένεσης σεισμών γιατί αυτοί οι μηχανισμοί έχουν ποικίλους αφ' ενός μηχανισμούς (Taymaz et al., 1990), ενώ δεν θεωρείται αναγκαίο να μοιάζουν οι μηχανισμοί μικρών και μεγάλων σεισμών. Ειδικότερα στη Δυτική Κρήτη, οι μελέτες ανύψωσης ακτών έχουν οδηγήσει στο ασφαλές συμπέρασμα ότι πριν το 365 η περιοχή επί 2500 περίπου χρόνια υπόκειτο σε τακτικές σεισμικές βυθίσεις μικρού εύρους (Thommeret et al., 1981; Pirazzoli et al., 1982) που υποδηλώνουν δράση διαφορετικών ρηγμάτων. Στην περίπτωση του σεισμού του 365 μ.Χ. δοκιμάστηκαν διάφορα μοντέλα ανάστροφων ρηγμάτων και οι θεωρητικές μετακινήσεις που αυτά προκαλούν συγκρίθηκαν με τις πραγματικές μετακινήσεις. Εφαρμόστηκε λογισμικό που χρησιμοποιεί την θεωρία "Ελαστικού Ημχώρου", το RINGCHN (Feigl and Dupre, 1999). Δύο από τα μοντέλα που δοκιμάστηκαν προσεγγίζουν ικανοποιητικά τα γεωλογικά στοιχεία. Οι παράμετροι των δύο αυτών ρηγμάτων φαίνονται στον Πίνακα 1.

**Πίνακας 1: Παράμετροι των δυο ρηγμάτων τα οποία προσεγγίζουν τις παρατηρημένες ανυψώσεις των ακτών.**  
**Table 1: Fault parameters of the two models found to match the observed data.**

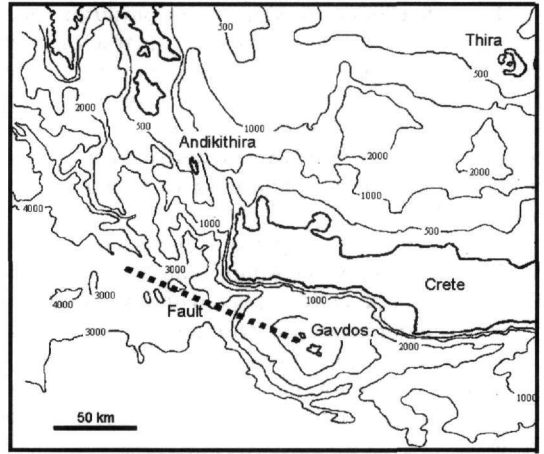
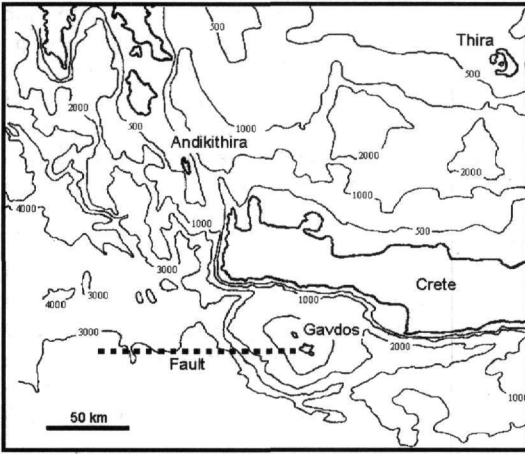
Μοντέλο	Διεύθυνση (°)	Κλίση (°)	Βάθος (km)	Μήκος (km)	Πλάτος (km)	Ολίσθηση (m)	Σεισμική ροπή $M_0$ (dyne·cm)	Ισοδύναμος σεισμός ( $M_w$ )
#1	271	45	100	120	135	20	$9,72 \cdot 10^{28}$	8,7
#2	292,5	40	70	105	100	16	$5,04 \cdot 10^{28}$	8,5

Για τον υπολογισμό της σεισμικής ροπής  $M_0$  και του μεγέθους  $M_w$  του ισοδύναμου σεισμού χρησιμοποιήθηκαν οι ακόλουθοι τύποι (Παπαζάχος, 1997):

- Σεισμική ροπή  $M_0 = \mu \cdot A \cdot u$  όπου  $\mu = 3 \cdot 10^{11}$  dyne·cm (μέτρο διάτμησης πετρωμάτων),  $A$  επιφάνεια σεισμικού ρήγματος και  $u$  σεισμική ολίσθηση.
- Μέγεθος  $M_w$  ισοδύναμου σεισμού  $M_w = 0,6666 \cdot (\log M_0 - 16)$ .

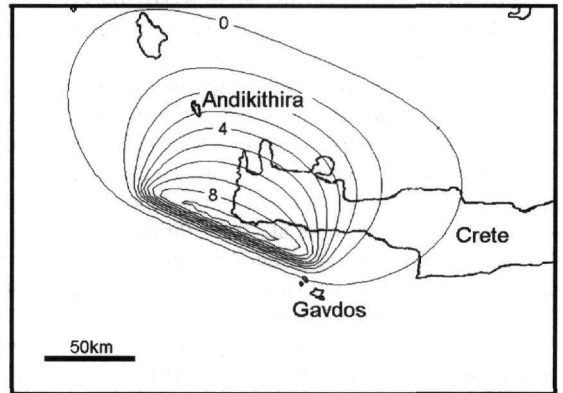
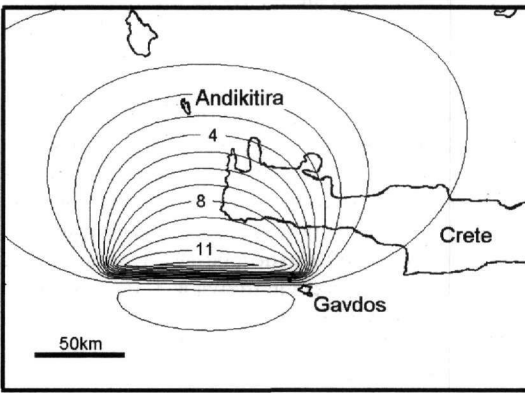
Στα σχήματα 4α και 4β φαίνονται τα επιφανειακά ίχνη των ρηγμάτων των μοντέλων #1 και #2, εάν οι θεωρητικές μετακινήσεις που προκαλούν φαίνονται στα σχήματα 5α και 5β. Τέλος, στα σχήματα 6α και 6β φαίνεται η προσαρμογή των μοντέλων στις διαθέσιμες παρατηρήσεις (ανύψωση Κρήτης και Αντικυθήρων κατά Thommeret et al. (1981) και Pirazzoli et al. (1982).

Όπως φαίνεται στο Σχ.4, το ίχνος του ρήγματος βρίσκεται νοτιοδυτικά της Κρήτης και ξεκινά λίγα χιλιόμετρα δυτικά της Γαύδος λόγω της δέσμευσης που αναφέρθηκε παραπάνω (υπόθεση μηδενικών σεισμικών παραμορφώσεων στο νησί αυτό). Στην περίπτωση του μοντέλου #1 συσχετίζεται με την ισοβαθή καμπύλη των 3000 m νοτιοδυτικά της Κρήτης.



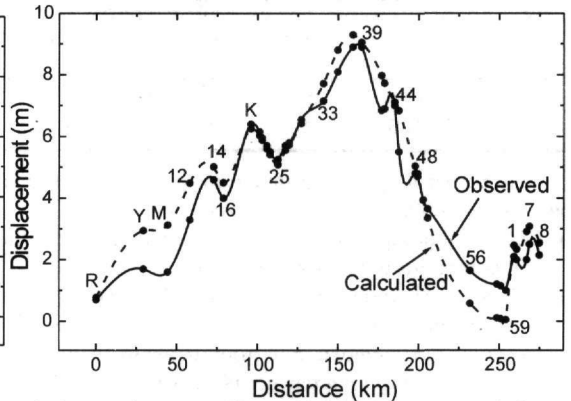
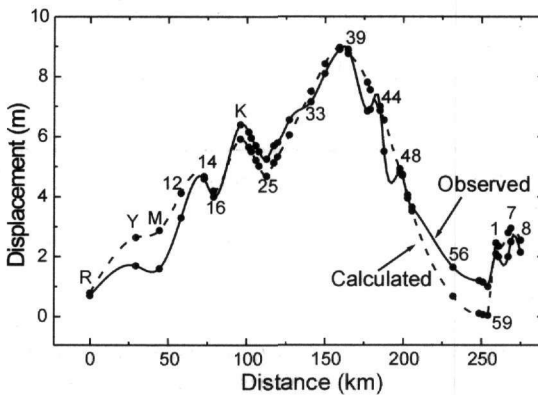
Σχήμα 4: Επιφανειακό ίχνος του ρήγματος του μοντέλου#1(α) και #2(β) (εστισμένη γραμμή) και ισοβαθείς καμπύλες ανά 1000m.

Figure 4: Surface trace of the fault of model#1 and #2(b) (dotted line) and 1000m bathymetric contours.



Σχήμα 5: Θεωρητικές μετακινήσεις που προκαλεί η δράση του ρήγματος του μοντέλου#1(α) και #2(β) (σε μέτρα).

Figure 5: Calculated displacements (m) due to the fault of model#1(a) and #2(b).



Σχήμα 6: Πραγματικές (συνεχής γραμμή) και θεωρητικές (εστισμένη γραμμή) μετακινήσεις που προκαλεί το ρήγμα του μοντέλου#1(α) και #2(β).

Figure 6: Observed (solid line) and calculated (dotted line) displacements due to the fault of model#1(a) and #2(b).

## 5. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Μόνο τα μοντέλα #1 και #2 που αναλύθηκαν στην προηγούμενη ενότητα δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα αφού θεωρητικές και πραγματικές τιμές των μετακινήσεων συσχετίζονται σε μεγάλο βαθμό (Σχ.6). Ειδικότερα, τα αποτελέσματα από την προσομοίωση ανάστροφων ρηγμάτων με συνιστώσα διάτμησης (strike-slip), δεν έδωσαν ικανοποιητικά αποτελέσματα αφού οι αποκλίσεις που παρατηρήθηκαν σε σημεία του ανατολικού άκρου της ανύψωσης ήταν μεγάλες.

Και τα δύο μοντέλα #1 και #2 ικανοποιούν τους βασικούς περιορισμούς που τίθενται από τη μορφή και το μέγεθος της ανύψωσης και οι διευθύνσεις των προσομοιωμένων ρηγμάτων έρχονται σε συμφωνία με τις διευθύνσεις που έχουν τα ρήγματα του ελληνικού τόξου στη περιοχή ΝΔ της Κρήτης (Taymaz et. al., 1990) και μηχανισμούς σεισμών (Papazachos and Papazachou, 1997) αλλά και τη μορφή του υποθαλάσσιου αναγλύφου, και μόνο σχετικά μικρές αποκλίσεις (0,75-1m) παρατηρούνται στο ανατολικό άκρο της ανύψωσης (Σχ.6).

Οι αποκλίσεις αυτές θα μπορούσαν εύκολα να εξαλειφθούν με μία κατάλληλη επιλογή συστήματος ρηγμάτων (πχ. σύστημα δύο ρηγμάτων με διαφορετικές κλίσεις ή δύο κλιμακωτών ρηγμάτων), ή επιλογή ρήγματος που θα προκαλούσε κάποια σημαντική μεταβολή ακτών στη Γαύδο. Όμως, τα υπάρχοντα τεκτονικά και σεισμολογικά στοιχεία δεν επιτρέπουν να προχωρήσει κανείς σε τόσο λεπτομερείς υποθέσεις (για παράδειγμα, δεν μπορεί ακόμη να αποκλειστεί η περίπτωση μερικές από τις τιμές ανύψωσης που εκτιμήθηκαν να εκφράζουν το συσσωρευτικό αποτέλεσμα του σεισμού του 365 και νεώτερων γεγονότων), οι οποίες άλλωστε μικρή σημασία θα είχαν. Εξ άλλου, έρευνες που εκτελούνται αυτό τον καιρό στην περιοχή έρευνας αναμένεται να δώσουν απάντηση στο ερώτημα αν όντως οι ακτές της Γαύδου έχουν ή όχι υποστεί ανύψωση λόγω του σεισμού του 365, και ακόμη και να βελτιώσουν την ακρίβεια των δεδομένων στο ανατολικό άκρο της περιοχής ανύψωσης της Κρήτης.

Σε κάθε περίπτωση, τα δύο επιλεγμένα ρήγματα ερμηνεύουν ικανοποιητικά τη σεισμική ανύψωση της Δυτικής Κρήτης και το μέγεθος του σεισμού που προκάλεσε καταστροφές σε κλίμακα Ανατολικής Μεσογείου. Πάντως, παρά το γεγονός ότι τα δύο μοντέλα δεν διαφέρουν σημαντικά, το ρήγμα το οποίο κρίνεται ως πιθανότερο να προκάλεσε το σεισμό του 365 είναι το ρήγμα του μοντέλου #1 αφού αυτό συσχετίζεται σε μεγάλο βαθμό με τη μορφολογία του πυθμένα της θάλασσας στην περιοχή (ειδικά με την ισοβαθή καμπύλη των 3000m ΝΔ της Κρήτης, Σχ.4).

## 6. ΕΝΑΣ ΣΕΙΣΜΟΣ ΑΣΥΝΗΘΙΣΤΑ ΜΕΓΑΛΟΥ ΜΕΓΕΘΟΥΣ

Από την ανάλυση των γεωλογικών και αρχαιολογικών στοιχείων και από την επεξεργασία των στοιχείων που περιγράφουν την ανύψωση των ακτών της Κρήτης με τη μέθοδο της ελαστικής ανάλυσης προκύπτει ότι ο σεισμός της 21<sup>ης</sup> Ιουλίου του 365 συνδέθηκε πιθανότατα με ένα ανάστροφο ρήγμα διεύθυνσης Α-Δ και μήκους 120km, ΝΔ της Κρήτης. Η σεισμική ροπή του ρήγματος, για σεισμική ολίσθηση 20m είναι  $M_0 = 9.72 \cdot 10^{28}$  dyne·cm που ισοδυναμεί με σεισμό μεγέθους  $M = 8.7$ .

Ένα τέτοιο μέγεθος, πολύ μεγαλύτερο από αυτό των γνωστών σεισμών του ελληνικού τόξου και της Ανατολικής Μεσογείου μπορεί να δώσει σαφή απάντηση στο ερώτημα για ποιο λόγο ο σεισμός του 365 έγινε θρύλος και γιατί οι αρχαίοι συγγραφείς ασχολήθηκαν τόσο πολύ μαζί του και για τόσο μεγάλο χρονικό διάστημα. Το ασυνήθιστα μεγάλο μέγεθος του σεισμού μπορεί, εξ άλλου, να ερμηνεύσει και την έκταση της πλειόσειστης ζώνης του σεισμού αυτού, όπως συνάγεται από τα αρχαία κείμενα. Η πλειόσειστη αυτή ζώνη εμφανιζόταν από τις αρχαίες πηγές ιδιαίτερα πεπλατυσμένη, με προτιμησιακή κατεύθυνση των σεισμικών κυμάτων κατά μήκος του άξονα της Ανατολικής Μεσογείου-σεισμικές καταστροφές σε Κύπρο και Λιβύη, και αντίθετα απόσβεση των σεισμικών κυμάτων στο εσωτερικό του Αιγαίου. Ο τύπος (pattern) αυτός διάδοσης των σεισμικών κυμάτων φαίνεται να είναι χαρακτηριστικός των μεγάλων σεισμών του ελληνικού τόξου, όπως προκύπτει από τις ισόσειστες σχετικά πρόσφατων μεγάλων σεισμών ( $M_s$  7.0-7.5) της περιοχής. Χαρακτηριστικά, όλοι αυτοί οι σεισμοί στο ελληνικό τόξο δείχνουν μια κατευθυντικότητα των σεισμικών κυμάτων προς της ακτές της Ανατολικής Μεσογείου και έντονη απόσβεση προς την κυρίως Ελλάδα και το Αιγαίο (Sieberg, 1932; Papazachos and Papazachou, 1997). Το συμπέρασμα αυτό επιβεβαιώνει την άποψη που εκφράστηκε προηγουμένως με βάση αρχαιολογικά στοιχεία για ένα μεγάλο σεισμό που ευθύνεται για τις καταστροφές σε Κρήτη, Κύπρο και Λιβύη, και προφανώς και στη ΝΔ Πελοπόννησο.

Όσον αφορά δε το τσουνάμι, αυτό φαίνεται ότι προκλήθηκε είτε από το υποθαλάσσιο ρήγμα, είτε πίο πιθανά από υποθαλάσσια κατολίσθηση που προκάλεσε ο μεγάλος σεισμός. Εάν το τσουνάμι αυτό μάλιστα κατευθύνθηκε και προς τη Σικελία ή την Αδριατική, όπως ασαφείς ιστορικές πληροφορίες υποδηλώνουν, τα αποτελέσματά του θα ήταν πίο σημαντικά στις περιοχές αυτές από αυτά του ίδιου του σεισμού.

Πρέπει πάντως να τονιστεί ότι οι διαστάσεις του ρήγματος καθώς και η γεωμετρική ροπή και το μέγεθος

του σεισμού αποτελούν ελάχιστες εκτιμήσεις, διότι οι υπολογισμοί βασίζονται στις γνωστές ανυψώσεις μόνο της Κρήτης και των Αντικυθήρων και αγνοήθηκαν άλλες πιθανές τεκτονικές παραμορφώσεις (πχ. Γαύδου ή και υποθαλάσσιες). Για το λόγο αυτό άλλωστε εμφανίζεται το ρήγμα να έχει μήκος πολύ μικρότερο από αυτό που εκτίμησαν άλλοι ερευνητές με βάση στατιστικά στοιχεία (πχ. 240km, Papazachos, 1996).

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Σχόλια του κ. Β. Παπαζάχου συνέβαλαν στην τελική διαμόρφωση του κειμένου.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- AMBRASEYS, N., MELVILLE, C. AND ADAMS, R. 1994. The seismicity of Egypt, Arabia and the Red Sea. *Cambridge University Press*.
- DIVITA, A., 1995. Archaeologists and earthquakes: the case of 365 A.D. *Annali di Geofisica*, 38, 971-976.
- FEIGL, K., DUPRE, E., 1999. RINGCHN: a program to calculate displacement components from dislocations on an elastic half-space with applications for modeling geodetic measurements of crustal deformation. *Computers and Geosciences*, 25, 695-704.
- GUIDOBONI, E., COMASTRI, A. AND TRAINA, G., 1994. *Catalogue of ancient earthquakes in the Mediterranean area up to 10<sup>th</sup> century*. Istituto Nazionale di Geofisica, Roma, 504 pp.
- JACQUES, F., BOUSQUET, B., 1984. Le cataclysme du 21 Juillet 365: Phenomene regional ou catastrophe cosmique In: *Tremblements de terre: Histoire et archeologie*. IVemes rencontres internationales d'archeologie et d'histoire d'Antibes. Association pour la promotion et la diffusion des connaissances archeologiques, Valbonne, 183-198.
- KELLETAT, D., 1991. The 1550 BP tectonic event in the Eastern Mediterranean as a basis for assessing the intensity of shore processes. *Z. Geomorph. N. F., Suppl.-Bd.*, 81, 181-194.
- LABOREL, J. AND LABOREL-DEGUEN, F., 1994. Biological indicators of Holocene sea-level variations and of co-seismic displacement in the Mediterranean area. *J. Coast. Res.*, 10, 395-415.
- OKADA, Y., 1985. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half space. *Bull. Seism. Soc. America*, 75, 1135-1154.
- ΠΑΠΑΖΑΧΟΣ, Β., 1997. *Εισαγωγή στη σεισμολογία*. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
- PAPAZACHOS, B.C., 1996. Large seismic faults in the Hellenic arc. *Annali di Geofisica*, 39, 891-903.
- PAPAZACHOS, B. AND PAPAACHOU, C., 1997. *The earthquakes of Greece*. Zitis, Thessaloniki, 304 pp.
- PIRAZZOLI, P., J. THOMMERET, Y. THOMMERET, J. LABOREL AND MONTAGIONNI, L., 1982. Crustal block movements from Holocene shorelines: Crete and Antikythira (Greece), *Tectonophysics*, 68, 27-43.
- PIRAZZOLI, P., AUSSEIL-BADIE, J., GIRESE, P., HADJIDAKI, E. AND ARNOLD, M., 1992. Historical environmental changes at Phalasarna harbor, west Crete. *Geoarchaeology*, 7, 371-392.
- PIRAZZOLI, P., LABOREL, J., STIROS, S., 1996. Earthquake clustering in the Eastern Mediterranean during historical times. *J. Geophys. Res.*, 101, 6083-6097.
- SIEBERG A., 1932. Erdbebengeographie. In: B. Gutenberg (ed.), *Handbuch der Geophysik*. Berlin, 4, 3, pp. 687-1005
- STIROS, S., 1996. Late Holocene relative sea-level changes in SW Crete: evidence of an unusual earthquake cycle. *Annali di Geofisica*, 39, 677-687.
- STIROS, S., 2001. The AD 365 Crete earthquake and possible seismic clustering during the 4-6<sup>th</sup> centuries AD in the Eastern Mediterranean: a review of historical and archaeological data. *J. Structural Geol.*, 23, 545-562.
- STIROS, S., PAPAGEORGIOU, S., 2001. Seismicity of Western Crete and the destruction of the town of Kisamos at AD 365: Archaeological evidence. *J. Seismology*. (in press)
- STIROS, S., DRAKOS, A., 2000. Geodetic constraints on the fault pattern of the 1978 Thessaloniki (Northern Greece) earthquake ( $M_s = 6.4$ ). *Geophys. J. Int.*, 143, 679-689.
- ΣΤΕΙΡΟΣ, Σ., ΠΑΠΑΓΕΩΡΓΙΟΥ, Σ., ΜΑΡΚΟΥΛΑΚΗΣ, Σ., 2001. Καταστροφή των Κρητικών πόλεων το 365 μ.Χ. Πρακτικά Συνεδρίου: Creta romana e protobizantina (υπό δημοσίευση).
- TAYMAZ, T., JACKSON, J. AND WESTAWAY, R., 1990. Earthquake mechanisms in the Hellenic Trench near Crete. *Geophys. J. Int.*, 102, 695-731.
- THOMMERET, Y., Y. THOMMERET, J. LABOREL, L. MONTAGGIONI AND P. PIRAZZOLI, 1981. Late Holocene shoreline changes and seismotectonic displacements in western Crete (Greece). *Z. Geomorph. Suppl.* 40, 127-149.