

## Συσχέτιση Τεκτονικών Δομών και Εντάσεων στον Σεισμό των Κυθήρων (Mw=6.7, 8 Ιανουαρίου 2006)

Correlating the damage pattern and the geological structure.  
Local site effects from the 2006 Mw=6.7 Kythira island  
intermediate depth event, SW Greece.

Ευθύμιος ΛΕΚΚΑΣ<sup>1</sup>, Ιωάννης ΠΑΠΑΝΙΚΟΛΑΟΥ<sup>1,2</sup>, Γεώργιος ΔΑΝΑΜΟΣ<sup>1</sup>

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ :** Στις 8 Ιανουαρίου του 2006 πραγματοποιήθηκε σεισμός Mw=6.7 και εστιακού βάθους 70 km, προερχόμενος από τη ζώνη υποβύθισης του Ελληνικού τόξου με επίκεντρο τη θαλάσσια περιοχή 30 km ανατολικά των Κυθήρων. Ο σεισμός αυτός έγινε ευρύτερα αισθητός, αλλά βλάβες εντοπίστηκαν κατά κύριο λόγο στο χωριό Μητάτα. Παράλληλα, καταγράφηκαν πολλά συνοδά φαινόμενα σε μια ζώνη έκτασης 15 km<sup>2</sup> γύρω από το χωριό, όπως ολισθήσεις γαιών, καταπτώσεις βράχων, κατολισθήσεις και δευτερογενείς ρηγματώσεις. Είναι εντυπωσιακό το γεγονός ότι στο χωριό Ποταμός που απέχει μόλις 35 km από το επίκεντρο καταγράφηκε μακροσεισμική ένταση MM V+, ενώ στα Μητάτα που απέχουν ~40 km η καταγεγραμμένη ένταση ήταν VII+. Μια σειρά από γεωλογικές τομές κατασκευάστηκαν έτσι ώστε διαφανεί ο ρόλος της γεωλογικής δομής στην κατανομή των εντάσεων. Οι τομές αυτές δείχνουν ότι η σημαντική αυτή διαφοροποίηση στην κατανομή των εντάσεων οφείλεται στην ιδιαιτέρως δυσμενή γεωλογικά θέση του χωριού Μητάτα. Η δυσμενή αυτή θέση οφείλεται στο συνδυασμό πολλών παραγόντων που αφορούν: α) το έδαφος θεμελίωσης που αποτελείται από σχετικά πρόσφατα Πλειοκαινικά θαλάσσια ιζήματα, β) την ύπαρξη ενός μεγάλου ρήγματος αποκόλλησης λίγες μόνο εκατοντάδες μέτρα κάτωθι του οικισμού, γ) την εγγύτητά του προς ένα νεοτεκτονικό ρήγμα και δ) στη τοπογραφική θέση του στην κορυφή ενός υβώματος. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι η γεωλογική δομή παίζει σημαντικό ρόλο και στους σεισμούς μεγάλου εστιακού βάθους. Ο οικισμός αυτός έχει παρουσιάσει παρόμοια συμπεριφορά σε ιστορικούς σεισμούς. Προτείνεται να εξεταστεί η πιθανή μετεγκατάστασή του, μέσω της παροχής κινήτρων.

**ABSTRACT :** On January 8, 2006 an Mw=6.7 thrust faulting event occurred on the Hellenic subduction zone ~30 km east of the island of Kythira at 70 km depth. Damages were recorded mainly in the village of Mitata whereas several old stone masonry buildings experienced significant damage, including a few collapses. A number of rockfalls, landslides and fractures affecting an area of about 15 km<sup>2</sup> were observed only in the village of Mitata in compliance with the damage distribution. Even though several villages of the island are equidistant from the epicentre, only the Mitata village was damaged. The Mitata village was

<sup>1</sup> Εργαστήριο Φυσικών Καταστροφών, Τομέας Δυναμικής – Τεκτονικής- Εφαρμοσμένης Γεωλογίας, Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, email: [elekkas@geol.uoa.gr](mailto:elekkas@geol.uoa.gr)

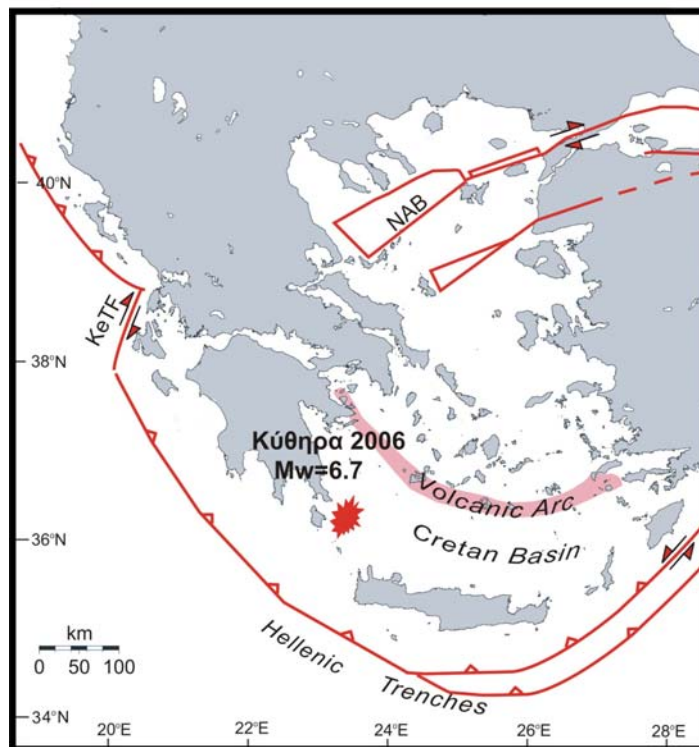
<sup>2</sup> Benfield-UCL Hazard Research Centre, Department of Earth Sciences, University College London, UK, email: [i.papanikolaou@ucl.ac.uk](mailto:i.papanikolaou@ucl.ac.uk)

devastated (Intensity XI) by a similar deep sourced, but stronger event ( $M=7.9$ ) in 1903, exhibiting once again significantly higher damages than the neighbouring villages. A series of geological cross-sections have been constructed, showing that the variation of the damage pattern was due to the highly unfavorable site specific conditions of the Mitata village. In conclusion, it is demonstrated that the geological structure such as the surface geology, the topography, the depth to basement rock and the distance from detachments and neotectonic faults are controlling factors of the ground motion also for the intermediate depth events.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στις 8 Ιανουαρίου του 2006, πραγματοποιήθηκε σεισμός  $M=6.7$  ο οποίος χαρακτηρίστηκε από συμπίεστικό μηχανισμό γένεσης αλλά και σημαντικό ποσοστό οριζόντιας ολίσθησης (πλαγιοανάστροφος) στο ΝΔ τμήμα του Ελληνικού τόξου (Konstantinou et al. 2006). Το επίκεντρο εντοπίστηκε μερικές δεκάδες χιλιόμετρα ( $\sim 30\text{km}$ ) ανατολικά των Κυθήρων σε εστιακό βάθος 70 χιλιομέτρων (USGS). Το γεγονός έγινε αισθητό όχι μόνο στον Ελληνικό χώρο αλλά και στην ευρύτερη περιοχή της Ανατολικής Μεσογείου γενικότερα (από την νότια Ιταλία και τις Δαλματικές ακτές, τη Βουλγαρία, την Τουρκία, την Ιορδανία, το Ισραήλ και την Αίγυπτο). Η εστία του σεισμού εντοπίζεται στο λεγόμενο Ελληνικό Τόξο και την ζώνη υποβύθισης (**Σχήμα 1**). Η αφρικανική πλάκα και τα υπολείμματα του ωκεανού της Τηθύος υποβυθίζονται με ρυθμό της τάξης των 40 χιλιοστών το χρόνο προς τα ΒΒΑ κάτω από την Ευρασιατική πλάκα (McClysky et al. 2000). Οι σεισμοί που προέρχονται από το Ελληνικό τόξο και πιο συγκεκριμένα από την ζώνη υποβύθισης αποτελούν εν δυνάμει καταστροφικές σεισμικές πηγές λόγω των μεγάλων μεγεθών που μπορούν να δώσουν ( $M>7.0$ ). Παράλληλα, η επιρροή τους ξεπερνάει κατά πολύ την επικεντρική περιοχή. Τέλος, όσον αφορά την επιφανειακή δομή η ευρύτερη περιοχή των Κυθήρων χαρακτηρίζεται από εφευκυστικό εντατικό πεδίο (Δανάμος, 1992) που αποτυπώνεται με την παρουσία κανονικών ρηγμάτων διεύθυνσης ΒΒΔ-ΝΝΑ τα οποία θεωρούνται υπεύθυνα για την δημιουργία του υβώματος μεταξύ Πελοποννήσου και Κρήτης (Lyberis et al. 1982).

Υπάρχουν πολλά παραδείγματα επιφανειακών σεισμών τόσο παγκόσμια (π.χ. San Fransisco 1906, Reid (1910), Armenia 1988 Hadjian (1993), Loma Prieta 1989 Borchardt and Glassmoyer (1992), Kobe 1995 Esper and Tachibanac (1998)) όσο και στον Ελληνικό χώρο (π.χ. Perachora 1981 Tilford et al. (1985), Christoulas et al. (1985), Kalamata 1986 Gazetas et al. (1990), Pyrgos 1993 Lekkas (1996), Bouckovalas et al. (1996), Lekkas et al. (2000), Athina 1999 Papanikolaou et al. (1999), Lekkas (2000, 2001)) τα οποία έχουν δείξει ότι η κατανομή και το ύψος των βλαβών μετά από σεισμικά γεγονότα μεταβάλλεται δραματικά μέσα σε μικρές μόνο αποστάσεις λόγω της γεωλογικής δομής. Στην παρούσα εργασία αποδεικνύεται ότι η γεωλογική δομή σε συνδυασμό και με την τοπογραφία, αποτελούν καθοριστικούς παράγοντες που επηρεάζουν την εδαφική κίνηση και σε σεισμικά γεγονότα μεγάλου εστιακού βάθους. Η αναφορά στην γεωλογική δομή δεν περιλαμβάνει μόνο το έδαφος θεμελίωσης αλλά και τις αποστάσεις από μεγάλα ρήγματα τόσο ανενεργά όσο και νεοτεκτονικά. Τα μεγάλα ρήγματα εκτός του ότι οριοθετούν διαφορετικούς γεωλογικούς σχηματισμούς, δημιουργούν ζώνες σημαντικού πάχους με τεκτονικά λατυποπαγή και κατακερματίζουν τα πετρώματα στην επιφάνεια ολίσθησης δημιουργώντας δυσμενείς συνθήκες θεμελίωσης, συνοδεύονται και από πολλά παράλληλα ρήγματα μικρότερου μήκους και αποτελούν προνομιακές διόδους μετάδοσης των σεισμικών κυμάτων.



**Σχήμα 1.** Το επίκεντρο του σεισμού προσδιορίστηκε 30km ανατολικά των Κυθήρων, σε εστιακό βάθος 70km και σχετίζεται με την ζώνη υποβύθισης των υπολειμμάτων του ωκεανού της Τηθύος και της Αφρικανικής πλάκας κάτω από την Ευρασιατική πλάκα.

## ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ- ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΒΛΑΒΩΝ

Στο σεισμό του 2006 δεν καταγράφηκαν τραυματισμοί και οι βλάβες εντοπίστηκαν κατά κύριο λόγο στο χωριό Μητάτα αν και τα περισσότερα χωριά στο νησί ισαπείχαν από το επίκεντρο του σεισμού. Ειδικότερα, είναι χαρακτηριστικό το γεγονός ότι στο χωριό Ποταμός που απέχει μόλις 35 km από το επίκεντρο καταγράφηκε μακροσεισμική ένταση MM V+, ενώ στα Μητάτα που απέχουν ~40 km η καταγεγραμμένη ένταση MM ήταν VII+ (Konstantinou et al. 2006). Στα Μητάτα ένας σημαντικός αριθμός παλιών πετρόχτιστων κτιρίων υπέστησαν σημαντικές βλάβες, συμπεριλαμβανομένων και λίγων καταρρεύσεων (**Σχήμα 2**). Επίσης, η μητροπολιτική εκκλησία στην πλατεία του χωριού υπέστη σημαντικές βλάβες (**Σχήμα 3**). Η εκκλησία δεν υποστηρίζεται από κολώνες με οπλισμένο σκυρόδεμα αλλά είναι απλά κατασκευασμένη από πορώδη ασβεστολιθικά τεμάχια. Οι σημαντικότερες βλάβες παρατηρήθηκαν στα δυο καμπαναριά τα οποία όμως προστεθήκαν μετά την κατασκευή του κυρίως κτίσματος του ναού (**Σχήμα 3**). Παράλληλα τα διαφορετικά ύψη και όγκοι των καμπαναριών σε σχέση με το κυρίως κτίριο οδήγησαν στις επικράτηση διαφορετικών ιδιοσυχνοτήτων κατά την ταλάντωση που οδήγησε στην αποκόλλησή τους από το κυρίως κτίσμα. Στο σημείο αυτό αξίζει να τονιστεί ότι οι ρηγματώσεις στα τοιχώματα των καμπαναριών υποδηλώνουν κίνηση προς τα ΝΔ, μια μάλλον μη αναμενόμενη εικόνα, αν ληφθεί υπ' όψη ότι το επίκεντρο βρισκόταν προς τα ΒΑ. Κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα δεν υπέστησαν καμία βλάβη. Στο σχήμα χαρτογραφήθηκαν σε κλίμακα 1:5000 οι οικίες με σημαντικές βλάβες (**Σχήμα 4**). Στα υπόλοιπα χωριά των Κυθήρων όπως στον Ποταμό, το

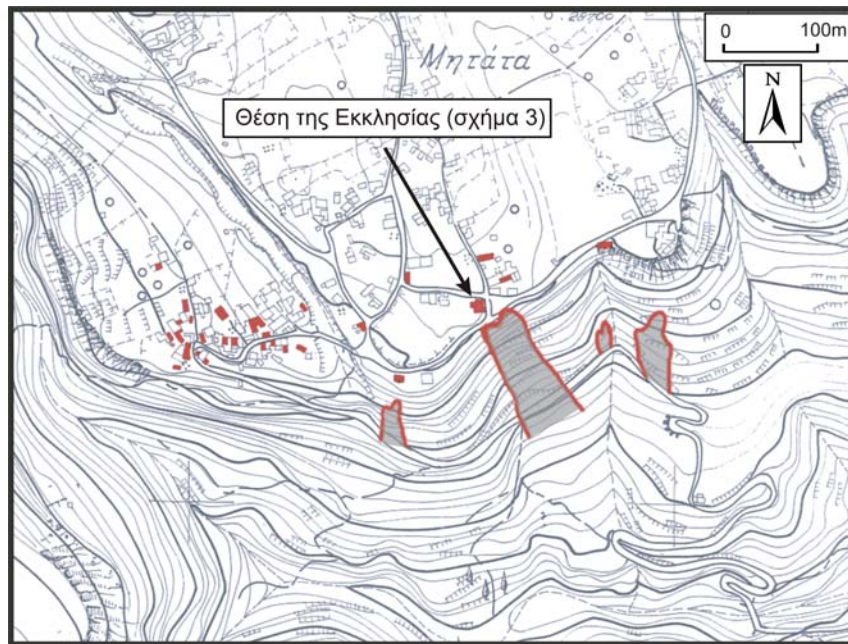
Λιβάδι και το Καψάλι παρατηρήθηκαν μικρές μόνο ρωγμές στην τοιχοποιία και τοίχους αντιστήριξης. Τέλος περιορισμένες βλάβες αναφέρθηκαν σε κάποια παλιά κτίρια κατά μήκος της ακτής της πόλης των Χανίων στην Κρήτη.



**Σχήμα 2.** Άποψη σημαντικών βλαβών και καταρρεύσεων σε παλιά πετρώχιστα κτίρια στο χωριό Μητάτα.



**Σχήμα 3.** Άποψη των βλαβών που υπέστη η μητροπολιτική εκκλησία στην πλατεία του χωριού. Η εκκλησία δεν υποστηρίζεται από κολώνες με οπλισμένο σκυρόδεμα αλλά είναι απλά κατασκευασμένη από πορώδη ασβεστολιθικά τεμάχια. Οι σημαντικότερες βλάβες παρατηρήθηκαν στα δυο καμπαναριά τα οποία όμως προστεθήκαν μετά την κατασκευή του κυρίως κτίσματος του ναού. Τα διαφορετικά ύψη και όγκοι των καμπαναριών σε σχέση με το κυρίως κτίριο οδήγησαν στις επικράτηση διαφορετικών ιδιοσυχνοτήτων κατά την ταλάντωση που οδήγησε στην αποκόλλησή τους από το κυρίως κτίσμα.



**Σχήμα 4.** Χαρτογράφηση σε κλίμακα 1:5000 των κατολισθήσεων (γκρι σκιάσεις) και των βλαβών που προκλήθηκαν σε οικίες (έντονα τετράγωνα) στον οικισμό Μητάτα.

## ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ – ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ

Κατά το σεισμό καταγράφηκαν πολλά συνοδά περιβαλλοντικά φαινόμενα όπως ολισθήσεις γαιών, καταπτώσεις βράχων, κατολισθήσεις και δευτερογενείς ρηγματώσεις στον ασφαλτοτάπητα, τα οποία εντοπίζονται αποκλειστικά σε μια ζώνη έκτασης 15 τετραγωνικών χιλιομέτρων γύρω από το χωριό Μητάτα. Τα περιβαλλοντικά αυτά φαινόμενα είναι σε πλήρη αντιστοιχία με την κατανομή των βλαβών στις οικίες. Οι Paranikolaou et al. (υπό έκδοση) υπολόγισαν μια τιμή μακροσεισμικής έντασης VII-VIII με βάση την καινούργια κλίμακα μέτρησης της μακροσεισμικής έντασης (ESI, 2007, Michetti et al. 2007). Η νέα κλίμακα μέτρησης της έντασης των μακροσεισμικών επιπτώσεων ESI, 2007 (Environmental Seismic Intensity) έχει αναπτυχθεί πρόσφατα από την επιτροπή της Παλαιοσεισμολογίας της INQUA (Παγκόσμια Ένωση του Τεταρτογενούς, Michetti et al. 2004) και σκοπό έχει την αξιολόγηση του μεγέθους και του επικέντρου ενός σεισμικού γεγονότος αποκλειστικά και μόνο από τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκαλούνται (EEE-Earthquake Environmental Effects). Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις ενός σεισμού δεν επηρεάζονται από ανθρώπινους παράγοντες (π.χ. αισθητότητα, καταστροφές σε ανθρωπογενείς κατασκευές) όπως οι παραδοσιακές κλίμακες μακροσεισμικής έντασης, οι καταγραφές των οποίων επηρεάζονται από την οικονομική και πολιτισμική θέση της περιοχής (Serva, 1994). Με βάση την καινούργια κλίμακα έντασης ESI 2007 που αξιολογεί τα περιβαλλοντικά φαινόμενα η επικεντρική ένταση υπολογίζεται ως VII-VIII και είναι σε πλήρη ταύτιση με την παραδοσιακή κλίμακα MM.



**Σχήμα 5.** Άποψη των καταπτώσεων και κατολισθήσεων που επηρέασαν το τοπικό οδικό δίκτυο πέριξ του οικισμού Μητάτα. Το μέγεθός τους ήταν περιορισμένο.

Ένας σημαντικός αριθμός κατολισθήσεων και καταπτώσεων επηρέασαν το τοπικό οδικό δίκτυο Μητάτα – Βιαράδικα, όμως το μέγεθός τους ήταν περιορισμένο (**Σχήμα 5**). Τα φαινόμενα αυτά απεικονίζονται **στο Σχήμα 4**. Η μεγαλύτερη κατολίσθηση μετατόπισε έναν όγκο περίπου 5.000 κυβικών και επηρέασε την πλατεία του χωριού, τμήμα της οποίας αποκολλήθηκε (**Σχήμα 6**). Η κατολισθήσα μάζα αποκολλήθηκε από ύψος 150 μέτρων από το ανώτερο τμήμα της πλαγιάς, η μορφολογική κλίση της οποίας αυξάνει προοδευτικά μέχρι και στο 100% στο ανώτερο τμήμα (**Σχήμα 7**). Η κατολισθήσα μάζα αποτελείται από μαργαϊκούς ασβεστόλιθους, διερρηγμένους ασβεστώδεις ψαμμίτες με κατακόρυφες επιφάνειες ασυνεχειών. Οι σχηματισμοί αυτοί είναι ασύνδετοι και έντονα διεβρωμένοι-εξαλλοιωμένοι. Καταγράφηκε η κατάπτωση βράχων μαζών οι οποίες ολίσθησαν καλύπτοντας μια απόσταση περίπου 100 μέτρων και συσσωρεύτηκαν στη βάση της πλαγιάς και επί του οδικού δικτύου Μητάτα- Βιαράδικα. Παράλληλα, παρατηρήθηκαν δευτερογενείς εδαφικές διαρρήξεις, μήκους μερικών μέτρων σε πεζοδρόμια και στον ασφαλτοτάπητα (**Σχήμα 8**). Στο υπόλοιπο τμήμα του νησιού με εξαίρεση κάποιες περιορισμένες καταπτώσεις βράχων σε πλαγιές κατά μήκος του οδικού δικτύου Λιβάδι – Αγία Ελέσα, Αεροδρομίου – Διακόφτι και Λιβάδι – Καλοκαιρινά – Μυρτίδια, δεν παρατηρήθηκαν σημαντικά δευτερογενή φαινόμενα ούτε ρευστοποιήσεις.



**Σχήμα 6.** Άποψη της μεγαλύτερης καταγεγραμμένης κατολίσθησης που αποκόλλησε τμήμα της πλατείας του χωριού.



**Σχήμα 7.** Άποψη της κατολισθήσας μάζας του σχήματος 6 που αποκολλήθηκε από το ανώτερο τμήμα της πλαγιάς, η μορφολογική κλίση της οποίας αυξάνει προοδευτικά μέχρι και στο 100% στο ανώτερο τμήμα, πριν και μετά το σεισμικό γεγονός του Ιανουαρίου του 2006.



**Σχήμα 8.** Άποψη εδαφικών διαρρήξεων στον ασφαλτοτάπητα του χωριού.

## ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΜΑΚΡΟΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΕΝΤΑΣΕΩΝ ΚΑΙ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΔΟΜΗΣ

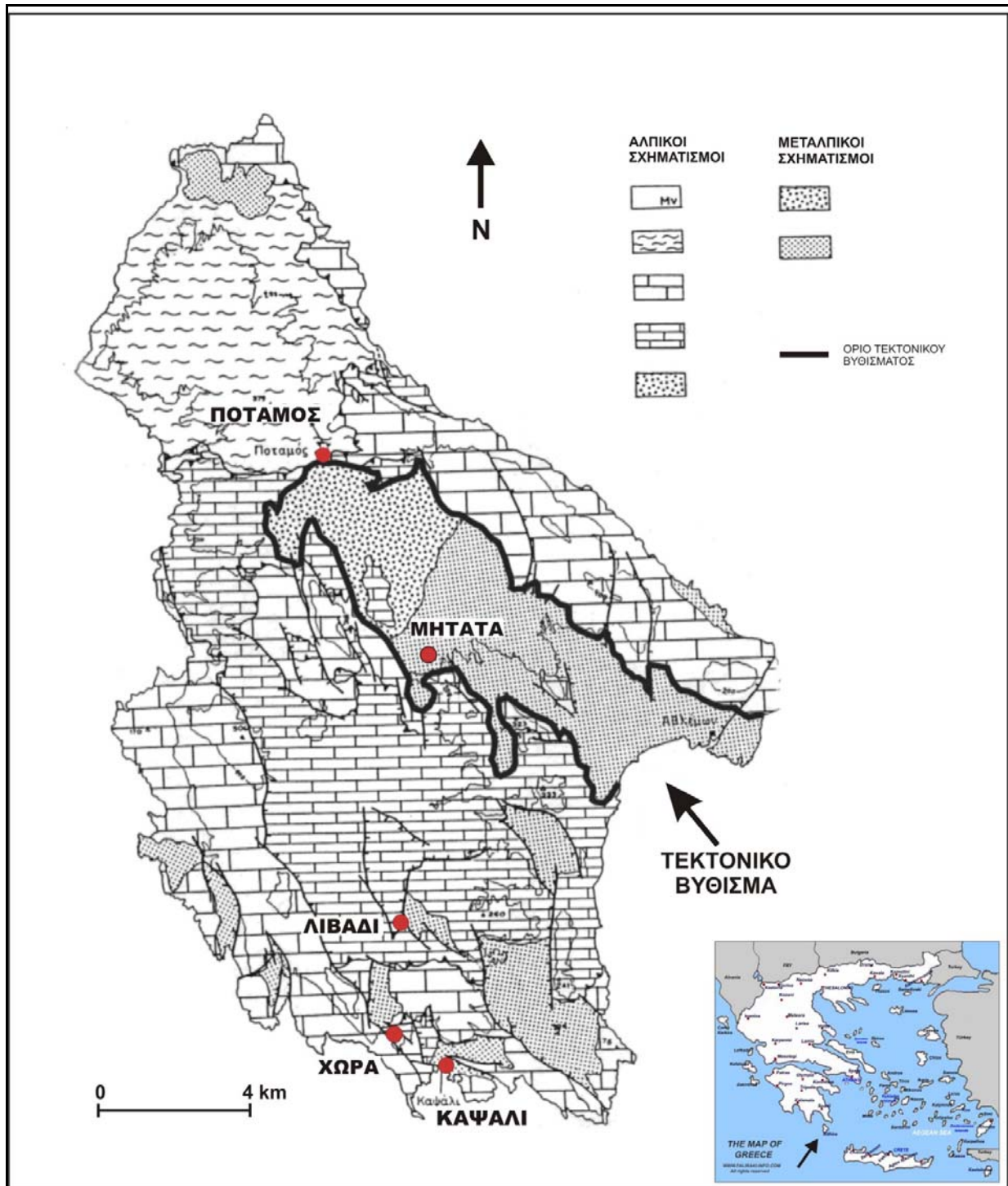
Είναι εντυπωσιακό το γεγονός ότι χωριά που ισαπέχουν από το επίκεντρο του σεισμού και με παρόμοια χαρακτηριστικά κτιρίων, παρουσιάζουν έως και δυο μονάδες διαφορά στην τιμή της μακροσεισμικής έντασης MM. Τα Μητάτα που απέχουν 40 km από το επίκεντρο υπέστησαν βλάβες (Ένταση MM VII-VIII), ενώ στο χωριό Ποταμός που απέχει μόνο 35 km από το επίκεντρο καταγράφηκε μακροσεισμική ένταση MM V-VI. Για να διαφανεί ο ρόλος και η επιρροή της γεωλογικής δομής στην κατανομή των εντάσεων, μελετήθηκε ο γεωλογικός χάρτης (**Σχήμα 9**, **Σχήμα 10**) και κατασκευάστηκαν γεωλογικές τομές διεύθυνσης ΒΑ-ΝΔ οι οποίες διαπερνούν τους δυο αυτούς οικισμούς (**Σχήμα 11**). Οι τομές αυτές δείχνουν τη σημαντική διαφοροποίηση στην γεωλογική δομή των δύο οικισμών και την ιδιαίτερος δυσμενή γεωλογικά θέση του χωριού Μητάτα.

Το χωριό Μητάτα είναι θεμελιωμένο σε μάργες (θαλάσσια ιζήματα) του Πλειοκαίνου, και λίγες μόλις εκατοντάδες μέτρα πάνω από το μεγάλο ρήγμα αποκόλλησης μικρής κλίσης (detachment fault) που διαχωρίζει τα μεταμορφωμένα από τα αμεταμόρφωτα πετρώματα στο νησί των Κυθήρων (Papanikolaou and Danamos, 1991). Η μεγάλη αυτή δομή, διαχωρίζει τα αμεταμόρφωτα πετρώματα από τα μεταμορφωμένα της Ενότητας της Άρνας και ανήκει στο μεγάλο σύστημα του ρήγματος αποκόλλησης της Ανατολικής Πελοποννήσου (Papanikolaou and Royden, 2007). Το μεγάλο αυτό κανονικό ρήγμα μικρής κλίσης – ή ρήγμα αποκόλλησης (detachment fault) έχει διεύθυνση ΒΒΔ-ΝΝΑ και βρίσκεται λίγες εκατοντάδες μέτρα κάτω από το χωριό Μητάτα. Παράλληλα το χωριό Μητάτα βρίσκεται στο κατερχόμενο τέμαχος και σε μικρή απόσταση μερικών εκατοντάδων μέτρων από ένα ενεργό κανονικό ρήγμα. Το νεοτεκτονικό αυτό ρήγμα διεύθυνσης ΒΔ-ΝΑ, οριοθετεί μια ΑνωΜειοκαινική-Πλειοκαινική ιζηματογενή λεκάνη, δημιουργώντας ένα τεκτονικό βύθισμα που αποτελεί και την μεγαλύτερη ιζηματογενή λεκάνη στο νησί (**Σχήμα 9**). Τέλος, η θέση του χωριού στο υψηλότερο σημείο ενός υβώματος υψομετρικής διαφοράς 150 μέτρων με απότομα πρηνή υποδηλώνει και την πιθανή δυσμενή επιρροή της τοπογραφίας στην κατανομή των βλαβών.

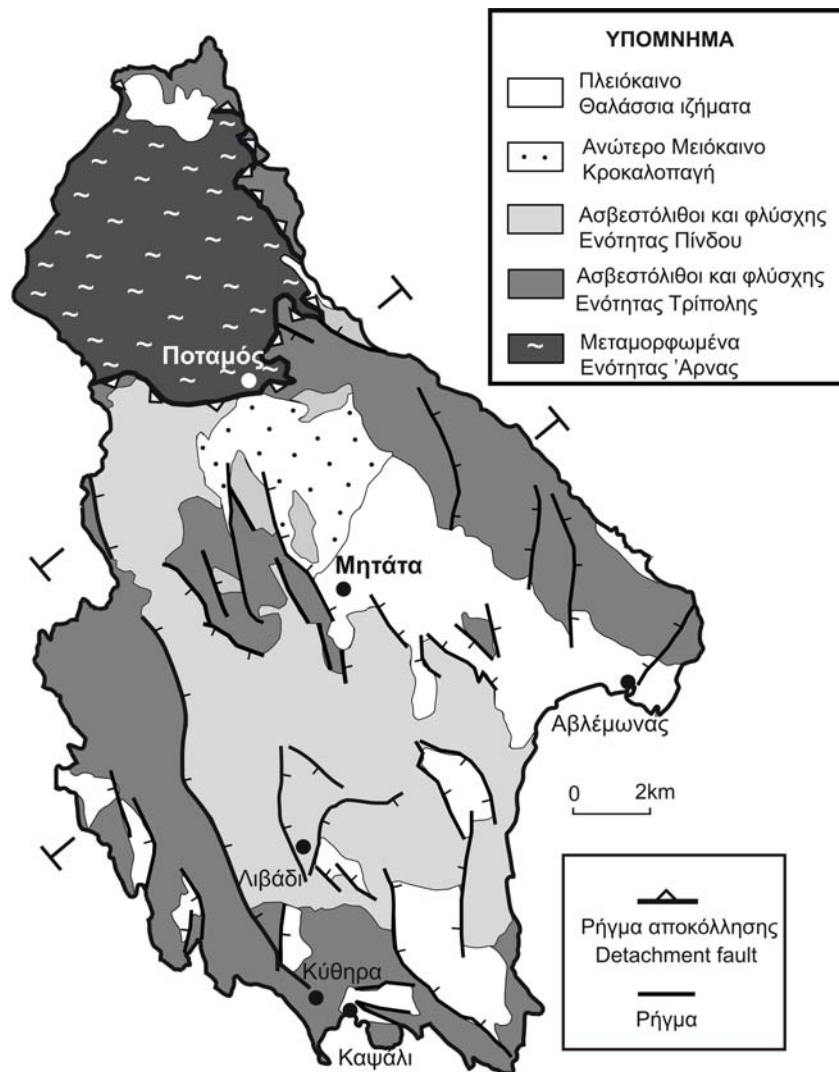
Από την άλλη πλευρά το χωριό Ποταμός είναι θεμελιωμένο σε παλιότερα ηλικιακά και συμπαγή μεταμορφωμένα πετρώματα. Πιο συγκεκριμένα το χωριό Ποταμός είναι θεμελιωμένο σε σχιστόλιθους οι οποίοι κατά θέσεις περιέχουν μεγάλες μάζες γνευσίων υπό μορφή φακών οι οποίοι υπέστησαν μεταμόρφωση υψηλών πιέσεων/χαμηλών θερμοκρασιών (HP-LT) κατά το Ανώτερο Μειόκαινο (~19 εκατομμύρια χρόνια πριν) (Seidel et al., 2006; Xypolias et al. 2006). Παράλληλα το χωριό βρίσκεται μακριά από νεοτεκτονικά ρήγματα και δεν επηρεάζεται από το μεγάλο ρήγμα αποκόλλησης μικρής κλίσης.

Στο σημείο αυτό είναι σημαντικό να τονιστεί ότι οι παραπάνω παράγοντες (έδαφος θεμελίωσης, ρήγματα και τοπογραφία) δρούν αθροιστικά και είναι αλληλοεπιδρώνοντες έτσι ώστε να καθίσταται δυσχερής ο διαχωρισμός της επίδρασης των επιφανειακών από τα βαθύτερους παράγοντες (π.χ. Field et al. 2000). Παρόλα αυτά στην περίπτωση των Μητάτων το χωριό αν και έχει θεμελιωθεί σε σαφώς δυσμενέστερο έδαφος θεμελίωσης σε σχέση με τον Ποταμό, εντούτοις αποτελείται από σχετικά συμπαγοποιημένα ιζήματα του Πλειοκαίνου ηλικίας 2 έως 5 εκατομμυρίων ετών, τα οποία δεν χαρακτηρίζονται ως υψηλού ρίσκου. Επίσης γειτονικά χωριά όπως ο Αβλέμωνας που έχουν θεμελιωθεί στο μεγαλύτερο τμήμα

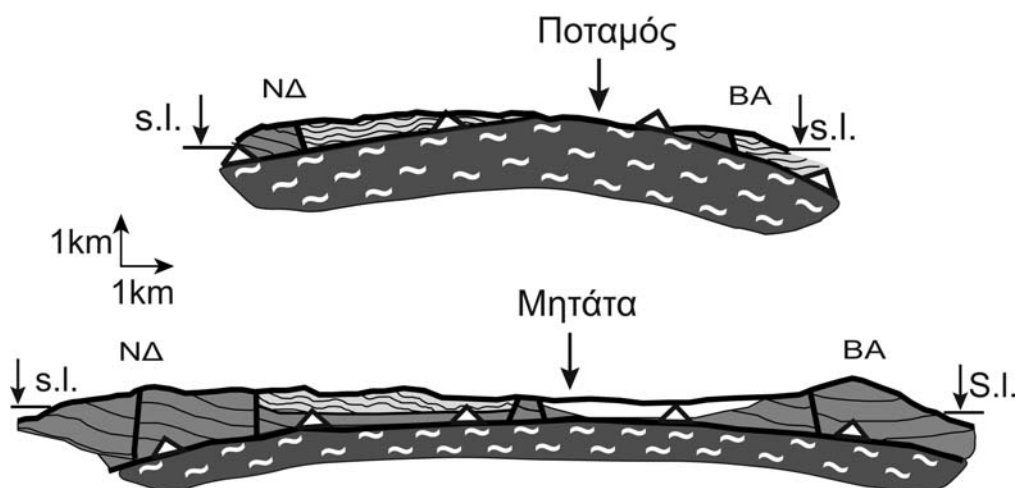
τους στον ίδιο σχηματισμό με αυτόν των Μητάτων δεν παρουσίασαν βλάβες. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι η γεωλογική δομή όπως αυτή εκφράζεται από την ύπαρξη του μεγάλου ρήγματος αποκόλλησης και του νεοτεκτονικού ρήγματος αποτελούν και τους καθοριστικότερους παράγοντες που επέδρασαν στην διαφοροποίηση των βλαβών.



**Σχήμα 9.** Απλοποιημένος γεωλογικός χάρτης της νήσου των Κυθήρων (Δανάμος 1992). Διακρίνεται το τεκτονικό βύθισμα το νότιο τμήμα του οποίου οριοθετείται από νεοτεκτονικό αυτό ρήγμα διεύθυνσης ΒΔ-ΝΑ που βρίσκεται σε απόσταση λίγων εκατοντάδων μέτρων από το χωριό Μητάτα.



**Σχήμα 10.** Απλοποιημένος γεωλογικός χάρτης της νήσου των Κυθήρων (Δανάμος 1992). Στο χάρτη διακρίνονται τα ίχνη των δύο γεωλογικών τομών που παρουσιάζονται στο σχήμα 11.



**Σχήμα 11.** Γεωλογικές τομές διεύθυνσης ΒΑ-ΝΔ με βάση το σχήμα 10, οι οποίες διαπερνούν τους οικισμούς Ποταμός και Μητάτα.

## ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Ο οικιστικός ιστός στα συγκεκριμένα χωριά (Μητάτα και Ποταμός) χαρακτηρίζεται από μια ομοιομορφία τόσο ως προς τους τύπους των κτιρίων όσο και προς την ποιότητα κατασκευής των. Παράλληλα, ο εστιακός χώρος ήταν σε μεγάλη απόσταση (τόσο ως προς τη θέση του επικέντρου όσο κυρίως ως προς το εστιακό βάθος) σε σχέση με την πολύ πιο κοντινή απόσταση μεταξύ των χωριών. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι τα χαρακτηριστικά της σεισμικής πηγής τόσο ως προς το μηχανισμό γένεσης όσο και η απόσταση από τα χωριά είναι περίπου η ίδια. Ως εκ τούτου εξαιρώντας τα κτίρια και τα χαρακτηριστικά της σεισμικής πηγής τα οποία είχαν παρόμοια επίδραση γίνεται φανερό ότι ο κύριος παράγοντας που διαφοροποιήθηκε σε πολύ σημαντικό βαθμό και μπορεί πράγματι να δικαιολογήσει την μεγάλη ανισοκατανομή στις βλάβες των δύο αυτών γειτονικών χωριών είναι η γεωλογική δομή.

Ο σεισμός των Κυθήρων υποδεικνύει ότι η γεωλογική δομή επηρεάζει την εδαφική κίνηση και σε σεισμικά γεγονότα μεγάλου εστιακού βάθους. Οι σεισμοί μεγάλου εστιακού βάθους δεν δραστηριοποιούν τις επιφανειακές δομές. Παρόλα αυτά αν και τόσο το ρήγμα αποκόλλησης όσο και το νεοτεκτονικό δεν δραστηριοποιήθηκαν, αποτέλεσαν προνομιακές διόδους εξάπλωσης των σεισμικών κυμάτων και επέδρασαν δραστικά στην κατανομή των εντάσεων. Ο ρόλος των μεγάλων ρηγμάτων αποκόλλησης αν και ανενεργών στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι καθοριστικός και πολυδιάστατος. Οι Paranikolaou και Paranikolaou (2007) έδειξαν ότι ένα παρόμοιο μεγάλο ρήγμα αποκόλλησης που διαπερνάει την Αττική καθορίζει όχι μόνο τη γεωμετρία, την ένταση της τεκτονικής παραμόρφωσης και τους ρυθμούς ολίσθησης των ρηγμάτων αλλά ακόμα και την σεισμικότητα. Είναι χαρακτηριστικό ότι το ίχνος του ρήγματος αποκόλλησης στη Αττική συμπίπτει με το όριο που διαχωρίζει τη ζώνη χαμηλής από τη ζώνη της ενδιάμεσης σεισμικότητας στον Εθνικό Αντισεισμικό Κανονισμό (ΕΑΚ 2003). Με λίγα λόγια εκατέρωθεν της δομής αυτής έχει καταγραφεί σημαντική διαφορά στην ιστορική και ενόργανη σεισμικότητα. Παράλληλα οι Paranikolaou et al. (1999) έδειξαν την επιρροή του συγκεκριμένου ρήγματος αποκόλλησης στην κατανομή των ζημιών του σεισμού της Αθήνας.

Παράλληλα, η τοπογραφία αποτελεί έναν επιπλέον παράγοντα που επηρεάζει την κατανομή των εντάσεων (π.χ. Stamatopoulos et al. 2007) όπως υποδείχθηκε και στους σεισμούς του 1995 στο Αίγιο (Athanasopoulos et al. 1999) και του 1999 στην Πάρνηθα (Lekkas, 2001; Assimaki et al. 2005), προκαλώντας υψηλότερες τιμές έντασης σε περιοχές με έντονες μορφολογικές μεταβολές, όπως η κορυφή των λόφων (όπου έχει θεμελιωθεί το χωριό Μητάτα). Όλοι οι παράγοντες που αναφέρθηκαν ανωτέρω (έδαφος θεμελίωσης, ρήγμα αποκόλλησης, νεοτεκτονικό ρήγμα, τοπογραφία) είναι αλληλοεπηρεαζόμενοι και αλληλεπιδρούν με αποτέλεσμα να καθίσταται πολύ δύσκολος ο διαχωρισμός της επίδρασης του ενός από τον άλλο.

Με βάση τα ιστορικά δεδομένα, το χωριό Μητάτα καταστράφηκε ολοσχερώς (ένταση XI) από ένα σεισμικό γεγονός ενδιαμέσου βάθους αλλά πολύ υψηλότερου μεγέθους  $M=7.9$  το 1903, παρουσιάζοντας επίσης πολύ υψηλότερες βλάβες από τα γειτονικά χωριά (Parazachos and Parazachou 1997). Η εκκλησία και το σχολείο κατέρρευσαν, αν και ήταν καινούργια κτίρια

ενώ αναφέρθηκαν και πολλές εδαφικές διαρρήξεις μερικές από τις οποίες είχαν μήκος που έφταναν τα 200 μέτρα και πλάτος το 1 εκατοστό (Parazachos and Parazachou 1997). Το 1903 στο χωριό παρατηρήθηκαν ρωγμές μήκους εκατοντάδων μέτρων, πλάτους 1 εκατοστού και διεύθυνσης ΒΔ-ΝΑ. Το σχολείο και η εκκλησία αν και καινούργιες κατασκευές καταστράφηκαν. Επίσης το 1750 σεισμός ο οποίος εκτιμάται στα  $M=7.2$  επέφερε μεγάλες ζημιές στο νησί (ένταση IX), προκαλώντας το θάνατο σε 2000 περίπου ανθρώπους. Δεν υπάρχουν δεδομένα για το εστιακό βάθος του συγκεκριμένου σεισμού, γεγονός που υποδηλώνει ότι μπορεί να ήταν και επιφανειακός και να οφείλεται σε κάποιο από τα ενεργά κανονικά ρήγματα διεύθυνσης ΒΒΔ-ΝΝΑ που περιβάλλουν το νησί (Lyberis et al. 1982). Το γεγονός του 1903 σε συνδυασμό και με τα φαινόμενα που καταγράφηκαν στον πρόσφατο σεισμό του 2006 υποδηλώνουν τις δυσμενείς γεωλογικές συνθήκες και την ακαταλληλότητα του χωριού ως προς τη δόμηση.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία καταγράφηκαν τόσο οι βλάβες που προκλήθηκαν από το σεισμό των Κυθήρων όσο και τα συνοδά περιβαλλοντικά φαινόμενα. Μέσω της παράθεσης των γεωλογικών δεδομένων και τομών υποδεικνύονται οι λόγοι για τους οποίους καταγράφηκαν σημαντικά υψηλότερες τιμές μακροσεισμικής έντασης στο χωριό Μητάτα σε σχέση με τα γειτονικά χωριά όπως το χωριό Ποταμός τα οποία αν και χαρακτηρίζονται από παρόμοιους τύπους και ποιότητα κατασκευής κτιρίων, δεν υπέστησαν βλάβες. Συμπερασματικά αυτή η μεγάλη διαφορά στις κατανομές των βλαβών μεταξύ των γειτονικών χωριών Μητάτα και Ποταμού οφείλεται: α) στο δυσμενέστερο εδάφος θεμελίωσης στο χωριό Μητάτα, β) στην επαφή του χωριού με το ίχνος ενός νεοτεκτονικού ρήγματος που οριοθετεί την Πλειοκαινική λεκάνη ιζηματογένεσης, γ) στην παρουσία ενός μεγάλου κανονικού ρήγματος αποκόλλησης μικρής κλίσης που υπόκεινται λίγων εκατοντάδων μέτρων του χωριού, δ) στην τοπογραφία. Το γεγονός της δυσμενούς γεωλογικά θέσης σε συνδυασμό με το ότι ο οικισμός αυτός έχει παρουσιάσει παρόμοια συμπεριφορά σε ιστορικούς σεισμούς, υποδηλώνει ότι ενδεχομένως πρέπει να εξεταστεί η πιθανή μετεγκατάστασή του, μέσω της παροχής κινήτρων.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Athanasopoulos, G.A., Pelekis, P.C. and Leonidou E.A. (1999). Effects of surface topography on seismic ground response in the Egion (Greece) 15 June 1995 earthquake, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 18, 135-149.
- Assimaki, D., Kausel E. and Gazetas, G. (2005). Soil – Dependent Topographic effects: A case study from the 1999 Athens Earthquake. *Earthquake Spectra* 21, 929-966.
- Bouckovalas, G., Anagnostopoulos, A., Kapenis, A., & Karantoni, T. (1996). Analysis of soil effects and distribution of damage from the Pyrgos 1993 (Greece) earthquake. *Geotechnical and Geological Engineering* 14, 111-128.
- Borcherdt, R.D., and Glassmoyer, G., 1992. On the characteristics of local geology and their influence on ground motions generated by the Loma Prieta earthquake in the San Francisco Bay region, California. *Bulletin of the Seismological Society of America* 82, 603-641.
- Christoulas, S.G., Tsiambaos, G.K., & Sabatakakis, N.S. (1985). Engineering geological conditions and the effects of the 1981 earthquake in Athens, Greece. *Engineering Geology* 22, 141-155.

- Danamos, G. (1992). Contribution to the Geology and Hydrogeology of the island of Kythira. Unpublished Ph.D Thesis, University of Athens, 355p (in Greek).
- EAK (2003). Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός. ΦΕΚ 781. ΥΠΕΧΩΔΕ.
- Gazetas, G., Dakoulas, P., and Papageorgiou, A. (1990). Local-soil and source mechanism effects in the 1986 Kalamata (Greece) earthquake. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 19, p. 431-456.
- Esper, P. and Tachibanak, E. (1998). The lesson of Kobe earthquake. In *Geohazards and Engineering Geology. Engineering Geology Special Publications No 14*, Geological Society London.
- Hadjian, A.H. (1993). The Spitak, Armenia earthquake of 7 December 1988- Why so much destruction. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 12, 1-24.
- Konstantinou, K.I., Kalogeras, I.S., Melis, N.S., Kourouzidis, M.C. & Stavrakakis, G.N. (2006). The 8 January 2006 Earthquake (Mw 6.7) offshore Kythira island, Southern Greece: Seismological, strong motion and macroseismic observations of an intermediate-depth event. *Seismological Research Letters* 77, 544-553.
- Lekkas, E. (1996). Pyrgos earthquake damages (based on E.M.S.-1992) in relation with geological and geotechnical conditions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 15, 61-68.
- Lekkas, E., Fountoulis, I., & Papanikolaou, D. (2000). Intensity distribution and Neotectonic macrostructure Pyrgos Earthquake data (26 March 1993, Greece). *Natural Hazards* 21, 19-33.
- Lekkas, E. (2000). New data for seismic hazard analysis. *Risk Analysis*, Ed. C.A. Brebbia Wit Press, Vol. 3, 245-255.
- Lekkas, E. (2001). The Athens earthquake (7 September 1999): intensity distribution and controlling factors. *Engineering Geology* 59, 297-311.
- Lyberis, N., Angelier, J., Barrier, E., and Lallemand, S. (1982). Active deformation of a segment of arc: The strait of Kythira, Hellenic arc, Greece. *Journal of Structural Geology* 4, 299-311.
- McClusky S., Balassanian, S., Barka, A., Demir, C., Ergintav, S., Georgiev, I., Gurkan, O., Hamburger, M., Hurst, K., Kahle, H., Kastens, K., Kekelidze, G., King, R., Kotzev, V., Lenk, O., Mahmoud, S., Mishin, A., Nadariya, M., Ouzounis, A., Paradissis, D., Peter, Y., Prilepin, M., Reilinger, R., Sanli, I., Seeger, H., Tealeb, A., Toksoz, M.N., Veis, G. (2000). Global Positioning System constraints on plate kinematics and dynamics in the Eastern Mediterranean and Caucasus. *Journal of Geophysical Research* 105, 5695-5719.
- Michetti, A.M., Esposito, E., Gurbinar, A., Mohammadioun, B., Mohammadioun, J., Porfido, S., Rogozhin, E., Serva, L., Tatevossian, R., Vittori, E., Audemard, F., Commerci, V., Marco, S., McCalpin, J., & Morner, N.A. (2004). The INQUA scale: An innovative approach for assessing earthquake intensities based on seismically-induced ground effects in natural environment. *Special paper Memorie Descrittive della Carta Geologica D' Italia LXVII*, pp.118 Roma.
- Michetti, A.M., Esposito, E., Guerrieri, L., Porfido, S., Serva, L., Tatevossian, R., Vittori, E., Audemard, F., Azuma, T., Claque, J., Commerci, V., Gurbinar, A., McCalpin, J., Mohammadioun, B., Corner, N.A., Ota, Y., and Roghozin, E. (2007). Intensità scale ESI 2007. In Guerrieri L. and Vittori, E. (Eds): *Mem. Descr. Carta Geol. d' Italia 74*, Servizio Geologico d' Italia-Dipartimento Difesa del Suolo, APAT, Rome Italy.
- Papanikolaou, D. and Danamos, G. (1991). The role of the geotectonic location of Kythira and Cyclades in the geodynamic evolution of the Hellenic Arc. *Bulletin of the Geological Society of Greece* 25, 65-79.
- Papanikolaou, D., Lekkas, E., Sideris, C., Fountoulis, I., Danamos, G., Kranis, C., Lozios, S., Antoniou, I., Vassilakis, E., Vasilopoulou S., Nomikou, P., Papanikolaou, I., Skourtsos, E., and K. Soukis, (1999). Geology and tectonics of Western Attica in relation to the 7-9-99 earthquake. *Newsletter of E.C.P.F.E., Council of Europe*, Issue No 3, 30-34.
- Papanikolaou, D., and Royden, L. (2007). Disruption of the Hellenic Arc: Late Miocene extensional detachment faults and steep Pliocene-Quaternary normal faults – or - What happened to Corinth?. *Tectonics* 26, TC5003 doi:10.1029/2006TC002007.

- Papanikolaou, D. and Papanikolaou, I. (2007). Geological, geomorphological and tectonic structure of NE Attica and seismic hazard implications for the northern edge of the Athens Plain. *Bulletin of the Geological Society of Greece* 40, 425-438.
- Papanikolaou, I.D., Papanikolaou, D.I. and Lekkas, E.L. (in press). Advances and limitations of the environmental seismic intensity scale (ESI 2007) regarding near-field and far-field effects from recent earthquakes in Greece. Implications for the seismic hazard assessment. Special Publication of the Geological Society of London.
- Papazachos, B.P. & Papazachou, C.B. (1997). The earthquakes of Greece. Ziti Editions, 304pp, Thessaloniki.
- Reid, H.F., 1910. The mechanics of the earthquake, The California earthquake of April 18, 1906 Report of the state earthquake investigation commission vol.2, Carnegie Institute, Washington D.C. Publication No. 87, 192pp.
- Seidel, M., Zacher, W., Schwarz, W., Jaeckel, P. and Reischmann, T. (2006). A late Carboniferous age of the gneiss of Potamos (Kythira Island, Greece) and new considerations on geodynamic interpretations of the Western Hellenides. *N. Jb. Geol. Palaont. Abh.*, 241, 325-244.
- Serva, L. (1994). Ground effects in the intensity scales. *Terra Nova* 6, 414-416.
- Stamatopoulos, C.A., Bassanou, M., Brennan, A.J. and Madabhushi G. (2007). Mitigation of the seismic motion near the edge of cliff-type topographies. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 27, 1082-1100.
- Tilford, N.R., Chandra, U., Amick, D.C., Moran, R., & Snider, F. (1985). Attenuation of the intensities and effect of local site conditions on observed intensities during the Corinth, Greece, Earthquake of 24 and 25 February and 4 March 1981. *Bulletin of the Seismological Society of America* 75, 923-937.
- Xypolias, P., Dorr, W., and Zulauf, G. 2006. Late Carboniferous plutonism within the pre-Alpine basement of the External Hellenides (Kythira, Greece): Evidence from U-Pb zircon dating. *Journal of the Geological Society, London* 163, 539-547.