



Συμπόσιο

Τεκτονικής Γεωλογίας

Προς Τιμήν του
Ομότιμου Καθηγητή

Ηλία Μαριολάκου

Αθήνα, 7 Δεκεμβρίου 2007

**Τεύχος
Περίληψεων**

Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος
Πανεπιστημιούπολη, Ζωγράφου
Αίθουσα Ι. Δρακόπουλου (Αμφ. Σεισμολογίας)
Έναρξη: 09:00 - Λήξη: 20:00

Symposium on
Tectonic Geology

In Honour of
Professor Emeritus

Ilias Mariolakos

Athens, December 7th, 2007

Επιτροπή Τεκτονικής Γεωλογίας Ε.Γ.Ε.



Ο ΡΟΛΟΣ ΤΩΝ ΤΕΚΤΟΝΙΚΩΝ ΔΟΜΩΝ ΣΤΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΤΩΝ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΕΝΤΑΣΕΩΝ. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΑΠΟ ΠΑΓΚΟΣΜΙΑΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ ΣΕΙΣΜΟΥΣ

ΕΥΘΥΜΙΟΣ Λ. ΛΕΚΚΑΣ

Καθηγητής Δυναμικής Τεκτονικής Εφαρμοσμένης Γεωλογίας

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Έχει διαπιστωθεί ότι σε πρόσφατους μεγάλους σεισμούς μία σειρά από παράγοντες, όπως το άνω τέμαχος ενός ρήγματος, η κατευθυντικότητα της διάρρηξης στον εστιακό χώρο, η επιφανειακή εμφάνιση του ρήγματος, τα όρια των τεκτονικών τάφρων και των ιζηματογενών λεκανών, οι τεκτονικές δομές που συνοδεύουν τα ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης, κ.α. παίζουν καθοριστικό ρόλο στην ενίσχυση του επιπέδου των εντάσεων καθώς επίσης και στην έντονη διαφοροποίησή τους.

Για κάθε μία περίπτωση δίνονται αντιπροσωπευτικά παραδείγματα σεισμών που εκδηλώθηκαν σε διάφορες περιοχές της γης, προκαλώντας μεγάλες καταστροφές με έντονη και ιδιόμορφη γεωγραφική ανάπτυξη, ανατρέποντας τις έως τώρα κλασσικές προσεγγίσεις με βάση τις οποίες υπολογιζόταν το επίπεδο των εδαφικών κινήσεων και η διασπορά τους.

I. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τις τελευταίες δεκαετίες έγιναν ουσιαστικές πρόοδοι στην κατανόηση, της κατανομής της σεισμικής ενέργειας στο χώρο και της διανομής των σεισμικών εντάσεων στην επιφάνεια της γης. Ειδικότερα, έχει γίνει σημαντική πρόοδος στον καθορισμό της εκλούμενης σεισμικής ενέργειας, στην εκτίμηση της απόσβεσης των κυμάτων και στον υπολογισμό της σεισμικής απόκρισης των πετρωμάτων και των εδαφών.

Παρά όμως το γεγονός ότι έχουν γίνει σημαντικοί πρόοδοι στην εκτίμηση των ανωτέρω, εντούτοις έχει διαπιστωθεί ότι μία σειρά από ιδιαίτερα φαινόμενα τα οποία έχουν παρατηρηθεί σε πρόσφατους μεγάλους καταστροφικούς σεισμούς, όπως το άνω τέμαχος ενός ρήγματος, η κατευθυντικότητα της διάρρηξης, οι ισχυρές εδαφικές κινήσεις σε ιζηματογενείς λεκάνες και τα όρια τεκτονικών βυθισμάτων, οι τεκτονικές δομές κατά μήκος ρηγμάτων οριζόντιας ολίσθησης, οι ρηξιγενείς πτυχοσιγενείς δομές, κ.α., αυξάνουν το επίπεδο αβεβαιότητας και διαφοροποιούν σημαντικά τις εμφανιζόμενες εντάσεις. Έτσι κρίνεται σκόπιμο να ενσωματώνονται τα ανωτέρω φαινόμενα στην εκτίμηση των εδαφικών κινήσεων και γενικότερα στην εκτίμηση του σεισμικού κινδύνου.

Στη συνέχεια αναφέρονται χαρακτηριστικές περιπτώσεις μεγάλων σεισμικών γεγονότων στα οποία οι ανωτέρω δομές και φαινόμενα παίζουν ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στη διασπορά των εντάσεων στην επιφάνεια.

II. ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΑΝΩ ΤΕΜΑΧΟΥΣ ΡΗΓΜΑΤΟΣ (HANGING WALL)

Το άνω τέμαχος ενός κανονικού ρήγματος είναι το τέμαχος που κινείται καθοδικά σε σχέση με την ρηξιγενή επιφάνεια και υπέρκειται, ενώ το άνω τέμαχος ενός ανάστροφου ρήγματος είναι αυτό που κινείται ανοδικά και επίσης υπέρκειται σε σχέση με την ρηξιγενή επιφάνεια.

Έχει διαπιστωθεί ότι στο άνω τέμαχος οι σεισμικές εντάσεις που αναπτύσσονται είναι κατά τεκμήριο μεγαλύτερες από το άλλο τέμαχος με την προϋπόθεση βέβαια ότι δεν διαφοροποιούνται σημαντικά οι γεωλογικές, τεκτονικές και γεωτεχνικές συνθήκες οι οποίες μπορούν να επηρεάσουν επιπρόσθετα την διανομή των εντάσεων (**ABRAHAMSON & SOMERVILLE 1997, LEKKAS 2000a**).

Το πλέον αντιπροσωπευτικό παράδειγμα ενίσχυσης των εντάσεων στο άνω τέμαχος ενός ρήγματος είναι αυτό του σεισμού της Taiwan που εκδηλώθηκε στις 21 Σεπτεμβρίου 1999 και είχε μέγεθος $M_w=7.5$. Το εστιακό βάθος ήταν 10-12 km, το συνολικό μήκος του ρήγματος ήταν 70 km (**Εικ. 1**), το πλάτος της ρηξιγενούς επιφάνειας υπολογίστηκε σε 30 km και η μέγιστη μετάθεση των εκατέρωθεν τεμαχών έφθασε τα 9 μέτρα (**LEKKAS, 2000b**).

Υπολογίζεται ότι 25.000 κατασκευές κατέρρευσαν, 50.000 έπαθαν σημαντικές βλάβες ενώ σημειώθηκαν 2.500 θάνατοι και 11.000 τραυματισμοί. Ο σεισμός εντάσσεται γεωδυναμικά στα πλαίσια της σύγκλισης των πλακών των Φιλιππίνων και της Ευρασίας που υφίσταται στην περιοχή με μέση παραμόρφωση 7 cm/year σε διεύθυνση περίπου A-Δ.

Με βάση τα ενόργανα δεδομένα από ένα πυκνό δίκτυο 400 σταθμών που ήταν εγκατεστημένοι στην ευρύτερη περιοχή του ανάστροφου ρήγματος Chelongpu γενικής διεύθυνσης B-N που ενεργοποιήθηκε, διαπιστώθηκε ότι στο ανατολικό πάνω τέμαχος που ανυψώθηκε και επιπτεύθηκε παρατηρήθηκαν σημαντικά μεγαλύτερες επιταχύνσεις από ότι στο κατώτερο δυτικό τέμαχος (**Εικ. 1, 2**). Τις ενόργανες καταγραφές επιβεβαίωσαν και οι καταστροφές που εκδηλώθηκαν και οι οποίες στο ανατολικό επιπτευμένο τέμαχος ήταν τουλάχιστον ανώτερες κατά δύο βαθμούς της E.M.S.₁₉₉₈ (**LEKKAS, 2000b**).

Σε γενικές γραμμές και με βάση τα ενόργανα και μακροσκοπικά δεδομένα υφίστατο μία ταχεία απόσβεση των εντάσεων στα δυτικά δηλαδή στο κατερχόμενο τέμαχος ενώ στα ανατολικά στο ανερχόμενο τέμαχος του ανάστροφου ρήγματος οι εντάσεις ήταν σαφώς υψηλότερες.

Ένα άλλο τυπικό παράδειγμα της επίδρασης άνω τεμάχους ρήγματος στην κατανομή των ζημιών και των εντάσεων αποτελεί ο σεισμός της 26^{ης} Ιανουαρίου 2001 στο Gujarat της δυτικής Ινδίας $M_s=7.7$ και με εστιακό βάθος 20 περίπου χιλιομέτρων (**Εικ. 3**).

Ο σεισμός αυτός εντάσσεται στα πλαίσια της ενεργού συμπίεσης που υφίσταται η Ινδία κατά την προώθησή της προς το Βορρά και της υπερσύγκρουσης που λαμβάνει χώρα στην περιοχή των Ιμαλαίων με τη λιθοσφαιρική πλάκα της Ευρασίας. Ειδικότερα πρόκειται για ένα γεγονός το οποίο έγινε όχι στα όρια των δύο λιθοσφαιρικών πλακών δηλαδή της Ινδίας και της Ευρασίας αλλά μέσα στην ίδια την Ινδική πλάκα σε μία περιοχή στην οποία και στο πρόσφατο παρελθόν εκδηλώθηκαν σημαντικές σεισμικές δονήσεις με μέγεθος πάνω από $M_s=7R$.

Η ρηξιγενής ζώνη Kachchh που ενεργοποιήθηκε είχε γενική διεύθυνση A-Δ και ένα συνολικό μήκος της τάξεως των 100 km. Η μεγαλύτερη εκ των διαρρήξεων είχε μήκος της τάξεως των 3 km και το μέγιστο κατακόρυφο άλμα που μετρήθηκε ανέρχεται σε 1 περίπου μέτρο. Εκτός από την κατακόρυφη κίνηση εντοπίστηκε και συμμετοχή μικρής οριζόντιας δεξιόστροφης συνιστώσας της τάξεως των 20 cm περίπου (**LOZIOS et al 2002, ΛΕΚΚΑΣ κ.α. 2001**).

Όπως διαπιστώθηκε οι καταστροφές ήταν περισσότερο ανεπτυγμένες στο κινούμενο – ανερχόμενο τέμαχος του ρήγματος δηλαδή το νότιο. Σε γενικές γραμμές οι εντάσεις (E.M.S.₁₉₉₈) ήταν τουλάχιστον δύο βαθμούς μεγαλύτερες στο νότιο τέμαχος από ότι στο βόρειο (**Εικ. 4**).

Ειδικότερα η περιοχή στην οποία εμφανίστηκαν μεγάλες εντάσεις είχε μεγάλη ανάπτυξη με διαστάσεις 150x70 περίπου km και είναι από τις μεγαλύτερες που έχουν καταγραφεί σε σύγχρονα γεγονότα σε παγκόσμιο επίπεδο. Οι μεγαλύτερες ζημιές και γενικότερα οι υψηλότερες τιμές εντάσεων παρουσίαζαν

μία επιμήκη διάταξη με γενική διεύθυνση Α-Δ που συνέπιπτε με αυτήν του σεισμογόνου ρήγματος και αναπτύσσοντο κυρίως στο ανερχόμενο τέμαχος του ανάστροφου ρήγματος.

III. Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΟΡΙΩΝ ΤΕΚΤΟΝΙΚΟΥ ΒΥΘΙΣΜΑΤΟΣ

Στις 8 Ιανουαρίου 2006 ισχυρός σεισμός με μέγεθος $M_w=6.9$ έπληξε την περιοχή των Κυθήρων και της δυτικής Κρήτης και έγινε αισθητός όχι μόνο σε ολόκληρο τον Ελλαδικό χώρο αλλά και σε εννέα χώρες της ανατολικής Μεσογείου. Το επίκεντρο του σεισμού τοποθετήθηκε στο θαλάσσιο χώρο, ανατολικά της νήσου των Κυθήρων και το εστιακό βάθος ήταν στα 70 km. Δεν αναφέρθηκαν θύματα, παρά μόνο ζημιές σε σπίτια και έργα υποδομής στην περιοχή των Κυθήρων, των Αντικυθήρων και της πόλης των Χανίων στη Κρήτη.

Ο κύριος σεισμός και οι μετασεισμοί οφείλονται στη διαφορική μετατόπιση τεμαχών σε εγκάρσια προς το Ελληνικό τόξο δομή, γεγονός το οποίο υποδεικνύεται από τον μηχανισμό γένεσης που έδειξε ένα επίπεδο θραύσης διεύθυνσης ΒΑ-ΝΔ.

Η τεκτονική αλπική δομή των Κυθήρων, προήλθε από την υπέρθεση συνολικά τριών αλπικών τεκτονικών καλυμμάτων, ενός κατώτερου σχετικά αυτόχθονου από μεταμορφωμένα πετρώματα και δύο ανώτερων ιζηματογενών (**ΔΑΝΑΜΟΣ, 1992**). Στη συνέχεια μία νεώτερη μεταλπική φάση, έδωσε ένα πυκνό δίκτυο κανονικών ρηγμάτων με επικρατούσα διεύθυνση ΒΒΔ-ΝΝΑ. Τα ρήγματα αυτά έχουν κατατεμαχίσει τα δύο ανώτερα τεκτονικά καλύμματα, τα ρηξιτεμάχη των οποίων ολισθαίνουν πάνω στο μεταμορφωμένο υπόβαθρο και διαμορφώνουν με τις επιμέρους κινήσεις τους εναλλαγές ρηξιγενών κεράτων και τάφρων (**ΠΑΠΑΝΙΚΟΛΑΟΥ & ΔΑΝΑΜΟΣ, 1991**). Μέσα σε αυτές τις λεκάνες, με κυρίαρχη αυτή που απαντά στο κεντρικό τμήμα και έχει διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ, έχουν αποτεθεί στην μεταλπική περίοδο αρχικά ποταμοχερσαία και στη συνέχεια θαλάσσια μεταλπικά ιζήματα (**Εικ. 5**).

Παρά το μεγάλο μέγεθος του σεισμού, δεν ενεργοποιήθηκε ωστόσο καμία από τις ρηξιγενείς επιφάνειες των περιθωριακών ρηγμάτων των μεταλπικών λεκανών, αν και τις περισσότερες φορές πρόκειται για μεγάλες μεταλπικές δομές με εμφανές μέτωπο και κατοπτρικές επιφάνειες. Στην περιοχή του χωριού Μητάτα αυτές οι ρηξιγενείς επιφάνειες έδρασαν ως επιφάνειες ανάκλασης των σεισμικών κυμάτων στα όρια της κύριας μεταλπικής λεκάνης, γεγονός που ερμηνεύει και τον εντοπισμό των μεγαλύτερων ζημιών στο χωριό Μητάτα (**LEKKAS & DANAMOS, 2006**).

Ειδικότερα οι μεγαλύτερες ζημιές που προκλήθηκαν εντοπίζονται αυστηρά στο χωριό Μητάτα (**Εικ. 6**). Ζημιές υπέστησαν τα κτίσματα που έχουν οικοδομηθεί με λιθορριπή καθώς επίσης και ο ναός στην κεντρική πλατεία του χωριού, ο οποίος έχει κτισθεί από πωρόλιθους που έχουν συνδεθεί μεταξύ τους με απλό ασβεστοκονίαμα. Ολοσχερείς καταρρεύσεις υπέστησαν τμήματα παλαιών οικιών, τα οποία ήταν χτισμένα με απλή λιθορριπή. Επίσης κατέρρευσαν και μαντρότοιχοι οικιών από απλή λιθορριπή, χωρίς συνδετικό κονίαμα μεταξύ των λίθων. Πρόσθετα στην ίδια περιοχή εκδηλώθηκαν σημαντικές κατολισθήσεις οι οποίες κατέστρεψαν τμήμα του οδικού δικτύου. Σε αντίθεση θα πρέπει να σημειωθεί ότι σε όλο τον υπόλοιπο χώρο του νησιού οι ζημιές ήταν εξαιρετικά περιορισμένες και οι όποιες ζημιές αναπτύχθηκαν ήταν σποραδικές και μόνο σε παλαιές κατασκευές.

Συμπερασματικά οι μεγάλες εντάσεις που παρατηρήθηκαν στην συγκεκριμένη περιοχή του χωριού Μητάτα μπορούν να αποδοθούν σε φαινόμενα ενίσχυσης κατά μήκος των ορίων του τεκτονικού βυθίσματος.

IV. ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Η εκδήλωση των φαινομένων κατευθυντικότητας που έχουν ως αποτέλεσμα την προτιμητέα ανάπτυξη υψηλών εντάσεων προς μία συγκεκριμένη φορά της διεύθυνσης του σεισμικού ρήγματος ήταν από καιρό γνωστή χωρίς όμως να έχει διερευνηθεί πλήρως και να αποδειχθεί.

Ο σεισμός του Kobe της Ιαπωνίας αποτέλεσε την αρχή της διερεύνησης ορισμένων κρίσιμων παραμέτρων του φαινομένου. Ειδικότερα ο σεισμός της 17^{ης} Ιανουαρίου 1995 μεγέθους $M_s=7.1R$, γνωστός και ως σεισμός του Hanshin ή Hyogo-ken Nanbu είχε τεράστιες συνέπειες. Σύμφωνα με τα επίσημα δεδομένα, περισσότεροι από 5.300 άνθρωποι έχασαν τη ζωή τους, 30.000 τραυματίστηκαν και 300.000 έμειναν άστεγοι. Επιπρόσθετα, περισσότερα από 110.000 κτίρια κατέρρευσαν, το άμεσο οικονομικό κόστος έφτασε τα 7 τρισ. Γιεν, με τις μακροπρόθεσμες επιπτώσεις να είναι ακόμα μεγαλύτερες λόγω της καταστροφής σημαντικών βιομηχανικών μονάδων, έργων υποδομής και γραμμών ζωής.

Η κατανομή των μετασεισμών ήταν εντυπωσιακά γραμμική, με διεύθυνση BA-ND και διέσχιζε τη νήσο Awaji, τα στενά Akashi και την πόλη του Kobe στην κεντρική Ιαπωνία. Η χωρική κατανομή των επικέντρων καθόριζε εντυπωσιακά το ίχνος της ενεργοποιημένης σεισμικής ζώνης Nojima, η οποία οριοθετεί πρόσθετα και το νεοτεκτονικό βύθισμα του Kobe (**Εικ. 7**).

Η ανάλυση του εστιακού μηχανισμού του σεισμού έδειξε ότι ενεργοποιήθηκε ρήγμα διεύθυνσης BA-ND με κλίση 77° , και διαστάσεις επιφάνειας $40 \times 10 \text{ km}^2$. Η πτώση της τάσης ήταν 100 – 200 bar, η σχετική μετατόπιση ήταν 2.1 m, η οριζόντια ολίσθηση των 1.7 m και η κατακόρυφη 1.3m, ενώ η διάρκεια της κύριας θραύσης ήταν 11 δευτερόλεπτα. Σύμφωνα με τους **SATO et al, (1996)** η κύρια δόνηση περιλάμβανε 3 υπο-γεγονότα με βάση την εφαρμογή της μεθόδου αναστροφής της πηγής και με τη χρήση τηλεσεισμικών χωρικών κυμάτων. Δηλαδή η κύρια δόνηση μπορεί να διαιρεθεί σε 3 μερικές θραύσεις με μεγέθη M_w 6.8, 6.3 και 6.4. Η πρώτη θραύση ($M_w=6.8$) εντοπίστηκε κάτω από το βορειοανατολικό άκρο του Awajishima. Η δεύτερη ($M_w=6.3$) εντοπίστηκε 9 km βορειοανατολικά της πρώτης στο δίαυλο Akashi, και η τρίτη ($M_w=6.4$) εντοπίστηκε άλλα 4 km προς τα βορειοανατολικά, κάτω από την πόλη του Kobe (**Εικ. 8**). Συνολικά παρατηρήθηκε μετανάστευση των θραύσεων από τα νοτιοδυτικά προς τα βορειοανατολικά σε μία απόσταση 13 km, σε συνολικό χρόνο 11 δευτερόλεπτα (**LEKKAS & KRANIS, 1997**).

Η καταγραφή των ζημιών έδειξε ότι οι βλάβες είχαν γραμμική ανάπτυξη κατά μήκος μιας γενικής διεύθυνσης BA-ND για μία απόσταση περίπου 30 km, που συνέπιπτε με το ίχνος του ρήγματος που ενεργοποιήθηκε. Η γραμμική κατανομή παρατηρείται τόσο στο αστικό συγκρότημα του Kobe όσο και στο γειτονικό νησί Awaji, προς τα ND, ενώ υπήρχε σημαντική διαφοροποίηση στις εντάσεις που εμφανίστηκαν σε κάθε περιοχή.

Με βάση τα δεδομένα καταγραφών των ζημιών (**LEKKAS et al 1996α, LEKKAS et al 1996β, LEKKAS & KRANIS 1997**) οι μέγιστες εντάσεις μέσα στο αστικό σύμπλεγμα τοπικά έφτασαν τους $XI_{E.M.S.-1992}$, ενώ σε περιβάλλουσες περιοχές η ένταση ήταν $X_{E.M.S.-1992}$. Οι ισόσειστες των $X_{E.M.S.-1992}$ βαθμών αναπτύχθηκαν γραμμικά για τουλάχιστον 20 km σε μήκος και 1-2 km σε πλάτος. Οι μικρότερες ισόσειστες ($VII, IX_{E.M.S.-1992}$) περιέβαλαν αντίστοιχα τις μεγαλύτερες. Στο Awajishima η μέγιστη ένταση ήταν $VIII_{E.M.S.-1992}$ και η αντίστοιχη καμπύλη ήταν επίσης επιμηκυμένη, με μήκος περίπου 5 km και πλάτος λιγότερο από 1 km (**Εικ. 9, 10**).

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι τα γεωλογικά και γεωτεχνικά χαρακτηριστικά των σχηματισμών θεμελιώσεων στις ζώνες μέγιστης έντασης του Kobe και του Awajishima ήταν σχεδόν ταυτόσημα ενώ οι καταστροφές που προκλήθηκαν από τα γεωδυναμικά φαινόμενα (ρευστοποιήσεις, κατολισθήσεις, κλπ), καθώς επίσης και οι καταστροφές από τις πυρκαγιές που δεν λήφθηκαν υπόψη στον υπολογισμό των εντάσεων.

Η μετανάστευση της διάρρηξης κατά τη διάρκεια της κύριας δόνησης από τα ΝΔ προς τα ΒΑ προκάλεσε το φαινόμενο Doppler-Fissau, με μετάθεση του φάσματος, με υψηλότερες συχνότητες προς τα ΒΑ και χαμηλότερες προς τα ΝΔ. Την ίδια στιγμή, οι περίοδοι των κυμάτων ήταν μικρότερες προς τα βορειοανατολικά και μεγαλύτερες προς τα νοτιοδυτικά. Πρόσθετα ένας παλμός μεγάλης επιτάχυνσης αναπτύχθηκε προς τα ΒΑ κατά την πορεία της θραύσης, ενώ δεν συνέβη το ίδιο προς την αντίθετη φορά.

Στα ανωτέρω μπορούν να αποδοθούν άμεσα στις βλάβες, που έχουν περιγραφεί. Η μεγάλη επιτάχυνση προς το βορειοανατολικό τμήμα του ενεργοποιημένου ρήγματος, οδήγησε στην ενίσχυση των βλαβών κατά μήκος του ρήγματος και κυρίως στο βορειοανατολικό τμήμα στην πόλη του Kobe όπου οι εντάσεις ήταν κατά 3 βαθμούς E.M.S.₁₉₉₂ μεγαλύτερες.

Τέλος θα πρέπει να τονιστεί η εντυπωσιακή ανάπτυξη των βλαβών σε όλες ανεξαιρέτως τις κατασκευές και η συμπαρομαρτούμενη εκδήλωση των μέγιστων εντάσεων κατά μήκος του σεισμικού ρήγματος Nojima, γεγονός το οποίο αποδεικνύει την καθοριστική επίδραση του ίχνους της ρηξιγενούς επιφάνειας στην εκδήλωση των καταστροφών (**Εικ. 7**).

VI. ΙΔΙΟΜΟΡΦΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΡΗΓΜΑΤΩΝ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ

Στις 17 Αυγούστου 1999 σεισμός εκδηλώθηκε στη βορειοδυτική Τουρκία κατά μήκος εμφάνισης της ρηξιγενούς ζώνης της Βόρειας Ανατολίας (NAFZ) (**SENGOR 1979, BARKA 1992**). Το επίκεντρο εντοπίστηκε στις νοτιοδυτικές και παρυφές της πόλης Izmit το μέγεθος ήταν $M_w=7.4$, και το εστιακό βάθος υπολογίστηκε σε $h=17$ km. Η δόνηση προκάλεσε εκτεταμένες βλάβες και απώλειες στην περιοχή που περιλάμβανε τις πόλεις Adapazari, Izmit, Golcuk και Yalova, κατά μήκος διεύθυνσης Α-Δ. Ο κύριος όγκος των βλαβών αναπτύχθηκε σε μία ζώνη διαστάσεων μήκους 140 km και πλάτους 15 km (**Εικ. 11**). Επιπλέον οι βλάβες ήταν σημαντικές και στην ευρύτερη περιοχή, περιλαμβάνοντας την Κωνσταντινούπολη και τις πόλεις Bursa, Eskisehir, Duzce, Bolu και άλλες.

Υπολογίστηκε ότι 17.500 άνθρωποι σκοτώθηκαν, 50.000 τραυματίστηκαν και 600.000 έμειναν άστεγοι. Επιπλέον, 2.600 κτίρια κατέρρευσαν ολικά ή μερικά και 20.000 ακόμα υπέστησαν σημαντικές βλάβες. Ο σεισμός επίσης προκάλεσε τεράστιες ζημιές σε μεγάλες βιομηχανικές εγκαταστάσεις και δημόσια έργα, όπως σε εθνικούς δρόμους, γέφυρες, σιδηροδρομικές γραμμές, κλπ (**LEKKAS, 2002**).

Τρεις μήνες μετά, στις 12 Νοέμβριου 1999, στην περιοχή εκδηλώθηκε και δεύτερη δόνηση. Το μέγεθός της ήταν $M_w=7.1$ και το επίκεντρο εντοπίστηκε περίπου 70 km ανατολικά. Η δόνηση προκάλεσε σημαντικές καταστροφές στις πόλεις Duzce, Bolu, Kaynasli, Hendek, Golyaka, Adapazari, οι οποίες βρίσκονται κατά μήκος της διεύθυνσης Α-Δ σε μία ζώνη μήκους 80 km και πλάτους 10 km (**Εικ. 11**).

Το δεύτερο επεισόδιο προκάλεσε το θάνατο σε 1.100 ανθρώπους, ενώ άλλοι 10.000 τραυματίστηκαν. Επιπλέον 1500 κτίρια κατέρρευσαν ολικά ή μερικά και περισσότερα από 8.000 υπέστησαν σημαντικές βλάβες.

Όπως διαπιστώθηκε οι τεκτονικές δομές που εκδηλώθηκαν και σχετίζονται με ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης (**AUDIN & NUR 1982, HARDING 1985**) έπαιξαν καθοριστικό ρόλο στην ανάπτυξη των εντάσεων και στην διαφοροποίηση από θέση σε θέση.

Ειδικότερα η έρευνα υπαίθρου έδειξε ότι η σεισμική θραύση κατά μήκος της NAFZ είχε ορατό μήκος 100 km, διεύθυνση Α-Δ και η δεξιόστροφη μετατόπιση έφτασε τα 5 m (**Εικ. 12**). Και στις δύο προαναφερθείσες περιπτώσεις, ο χαρακτήρας οριζόντιας ολίσθησης του ρήγματος τεκμηριώθηκε όχι μόνο από τα ενόργανα δεδομένα αλλά και από τη μετατόπιση πολλών γραμμικών χαρακτηριστικών όπως σειρές δέντρων, φράκτες, δρόμοι, πεζοδρόμια, κλπ.

Η καταγραφή των καταστροφών και η εκτίμηση των εντάσεων έγιναν σύμφωνα με τις κλίμακες E.M.S.₁₉₉₂ και ενημερωμένη κλίμακα E.M.S.₁₉₉₈. Σύμφωνα με τα δεδομένα, οι εντάσεις ξεπέρασαν τους XI_{E.M.S.-1998} και σε μερικές περιπτώσεις πλησίασαν το XII_{E.M.S.-1998} σε πολλές αστικές περιοχές. Εντάσεις X_{E.M.S.-1998} έπληξαν εκτεταμένες περιοχές, ενώ σε πολύ μεγαλύτερες περιοχές εκδηλώθηκαν εντάσεις IX και IIIIV. Αυτό ήταν το κατώτερο όριο της εκτίμησης των εντάσεων, καθώς χαμηλότερες εντάσεις σημειώθηκαν σε εκτεταμένες περιοχές και ο όγκος των δεδομένων ήταν υπερβολικά μεγάλος (LEKKAS, 2002).

Όλες οι ισόσειστες αλλά κυρίως αυτές με $I_{E.M.S.-98} \geq X$, αναπτύχθηκαν σε διεύθυνση A-Δ που συμπίπτει με τη διεύθυνση του ρήγματος. Οι ισόσειστες ακολούθησαν και διευρύνοντο στις χαρακτηριστικές δομές οριζόντιας ολίσθησης όπως οι μικρο- και μακρο- pull apart basins, flower structures, κλπ (LEKKAS, 2003). Αντιθέτως, όπου η θραύση ήταν γραμμική, χωρίς τις συνοδές δομές, οι ισόσειστες καμπύλες αναπτύχθηκαν σε μία επιμήκη ζώνη διεύθυνσης A-Δ με σημαντικά μικρότερο πλάτος.

Ειδικότερα όλες οι κατασκευές κατά μήκος της σεισμικής διάρρηξης ανεξαρτήτως του τύπου κατασκευής κατέρρευσαν ή έπαθαν δομικές μη επισκευάσιμες βλάβες. Εκατέρωθεν του ρήγματος και σε απόσταση έως 50 μέτρα περίπου οι κατασκευές κατέρρευσαν παράλληλα προς τη διεύθυνση ρήγματος ακολουθώντας την οριζόντια μετατόπιση των εκατέρωθεν τεμαχίων δηλαδή προς την Ανατολή ή την Δύση (Εικ. 13).

Πρόσθετα οι καταστροφές ήταν πολύ μεγάλες στις περιοχές ανάπτυξης των μικρο- μακρο- λεκανών pull apart basin. Στην παράκτια μάλιστα περιοχή του Golcuk λόγω της καθολικής κίνησης ενός μεγάλου ρηξιτεμάχους ολόκληρα οικοδομικά τετράγωνα βυθίστηκαν έως και 4 m κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας (Εικ. 14, 15).

Εντυπωσιακή ήταν και η ανάπτυξη μεγάλων εντάσεων σε περιοχές που εμφανίστηκαν φαινόμενα flower structure. Οι κατασκευές βυθίστηκαν στην κυριολεξία μέσα στο έδαφος εξ αιτίας της διέλευσης πολλαπλών θραύσεων από την βάση θεμελίωσής τους ενισχύοντας έτσι τις εμφανιζόμενες εντάσεις (Εικ. 15).

Επιπλέον, η κατανομή των εντάσεων εξαρτάτο άμεσα από τα συνακόλουθα γεωδυναμικά φαινόμενα όπως ρευστοποιήσεις, ανυψώσεις, βυθίσεις, καθιζήσεις, πλευρικές εκτάσεις, κ.α.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι καταγραφείσες εντάσεις κατανέμονταν εξίσου και στα δύο ρηξιτεμάχη ως αποτέλεσμα της κυριαρχούσας οριζόντιας κίνησης. Αντιθέτως, οι εντάσεις όπως αναφέρθηκε διέφεραν σημαντικά στα δύο εκατέρωθεν τεμάχη ανάστροφου ή κανονικού ρήγματος (άνω και κάτω τεμάχους).

V. ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΠΤΥΧΟΣΙΓΕΝΟΥΣ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ

Την 8^η Οκτωβρίου 2005 και 8:50 τοπική ώρα σεισμός $M_s=7.6R$ εκδηλώθηκε στο βόρειο Πακιστάν. Το επίκεντρο εντοπίστηκε 90 χλμ βόρεια του Ισλαμαμπάντ, πρωτεύουσας του Πακιστάν και σε βάθος 25 χλμ, προερχόμενο από ένα επωθητικό ρήγμα διεύθυνσης ΒΔ-ΝΑ και κλίσης 37° προς τα ΒΑ. Η μέση ολίσθηση στην επιφάνεια του ρήγματος κυμαινόταν από 1,4 έως 2 μέτρα ενώ τα επίκεντρα της μετασεισμικής ακολουθίας αναπτύχθηκαν βορειοανατολικά της σεισμικής ζώνης Indus – Kohistan (IKSZ).

Ο σεισμός εκτός από το βόρειο Πακιστάν, έγινε πολύ αισθητός στη βόρεια Ινδία και στο βορειοανατολικό Αφγανιστάν, προκαλώντας απώλειες χιλιάδων ανθρώπων και εκτεταμένες καταστροφές σε πολυάριθμα οικιστικά κέντρα και στις υποδομές.

Η σεισμική διάρρηξη εμφανίστηκε κατά μήκος του νοτιοδυτικού σκέλους του αντικλίνου Muzaffarabad, όπου τα ανθρακικά πετρώματα του Καμβρίου έχουν επωθηθεί σε κλαστικές σειρές του Τριαδικού. Κατά μήκος των επωθήσεων στην επιφάνεια μετά τον σεισμό παρατηρήθηκαν δομές πτυχωσιγενούς ολίσθησης (**Εικ. 17**) εντός των αλλουβιακών ριπιδίων και των ποτάμιων αναβαθμίδων που συνοδεύτηκαν από εφελκυστικές ρωγμές στα κορυφαία τμήματα αυτών (**LEKKAS & SKOURTSOS 2005, SKOURTSOS & LEKKAS 2007**).

Από τη κατανομή των βλαβών φαίνεται ότι το μεγαλύτερο ποσοστό των καταστροφών σε μακροκλίμακα κατανέμεται κατά μήκος μίας ΒΔ-ΝΑ διεύθυνσης, που άρχιζε από το Uri στα σύνορα Ινδίας – Πακιστάν και έφτανε μέχρι το ανατολικό τμήμα της Σεισμικής Ζώνης Ινδού- Κοχιστάν, όπου και ταυτίζετο με τα επίκεντρα της μετασεισμικής ακολουθίας. Οι επιφανειακές διαρρήξεις παρατηρήθηκαν σε μήκος 35-40 km, ανάμεσα στις πόλεις Balakot και Muzaffarabad που κατανέμονται σε μία ζώνη αρκετών δεκάδων μέτρων.

Ιδιαίτερες βλάβες παρατηρήθηκαν σε δομές πτυχωσιγενούς ολίσθησης (flexural-slip folding) στα αλλουβιακά ριπίδια και στις ποτάμιες αναβαθμίδες, που κάλυπταν ασύμφωνα το Αλπικό υπόβαθρο. Η συχνή παρουσία εφελκυστικών ρωγμών, οι περισσότερες από τις οποίες είχαν δημιουργηθεί στη κορυφαία περιοχή των δομών πτυχωσιγενούς ολίσθησης (**Εικ. 17**) συντέλεσαν καθοριστικά στην εκδήλωση των βλαβών και των εντάσεων σε συγκεκριμένες περιοχές. Βέβαια τεράστιες ήταν οι ζημιές οι οποίες οφείλοντο σε συνοδά γεωδυναμικά φαινόμενα και ειδικότερα στις κατολίσθησεις οι οποίες εξαφάνισαν ολόκληρους οικιστικούς χώρους.

VII. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι διαφοροποιήσεις των σεισμικών εντάσεων σε μακροκλίμακα και μικροκλίμακα αποδίδονται μέχρι πρότινος στην ανομοιογενή μακροκατανομή της σεισμικής ενέργειας λόγω μηχανισμού γένεσης των σεισμών, στη διαμόρφωση των σεισμικών κυμάτων από τους γεωλογικούς σχηματισμούς από τις εδαφικές συνθήκες και από τα συνοδά γεωδυναμικά φαινόμενα (ρευστοποίηση, κατολίσθηση, πλευρικές εκτάσεις, κ.α.).

Όπως όμως διαφάνηκε, οι εντάσεις πρόσθετα μπορούν να ενισχυθούν και να διαφοροποιηθούν σημαντικά όταν ιδιαίτερες τεκτονικές δομές ή φαινόμενα εμφανιστούν που συνδέονται με την ρηξιγενή επιφάνεια. Οι εντάσεις όπως παρουσιάστηκε μπορούν να αυξηθούν και κατά II βαθμούς της E.M.S.₁₉₉₈. Ενώ πρόσθετα μπορεί να διαφοροποιηθεί και το είδος των βλαβών στις κατασκευές.

Εκείνο το οποίο έχει ιδιαίτερη σημασία είναι το γεγονός ότι στις περισσότερες των περιπτώσεων είναι εξαιρετικά δύσκολο να ανιχνευτούν όλα αυτά τα φαινόμενα πριν την εκδήλωση του σεισμού και των βλαβών με αποτέλεσμα το επίπεδο αβεβαιότητας να παραμένει υψηλό.

VIII. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

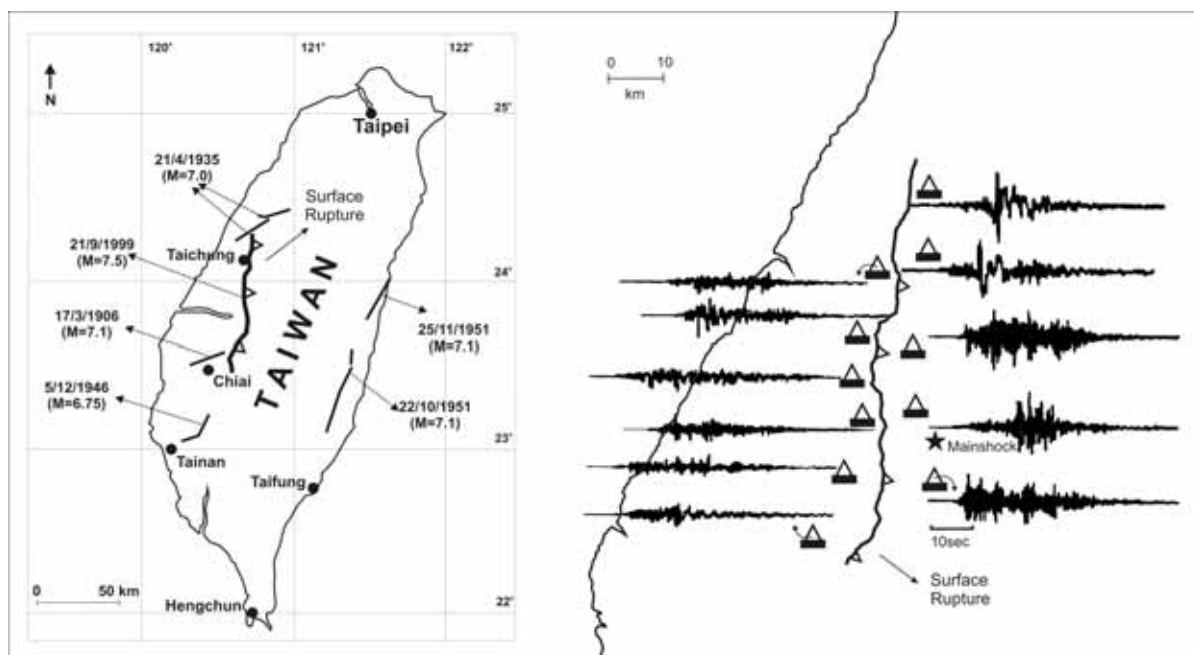
ABRAHAMSON, N.A. & SOMERVILLE, P.G., (1997). - Effects of the hanging wall and foot wall on ground motions recorded during the Northridge Earthquake. Bull. Seism. Soc. Am., 86, S93-S99.

AYDIN, A. & NUR, A., (1982). - Evolution of pull-apart basins and their scale independence, Tectonics, 1, 91-105.

BARKA, A., (1992). - The North Anatolian Fault Zone. Annales Tectonicae, 6, 164-195.

ΔΑΝΑΜΟΣ, Γ., (1992). - Συμβολή στη γεωλογία και υδρογεωλογία της νήσου των Κυθήρων, Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Γεωλογίας, Αθήνα, 335σ.

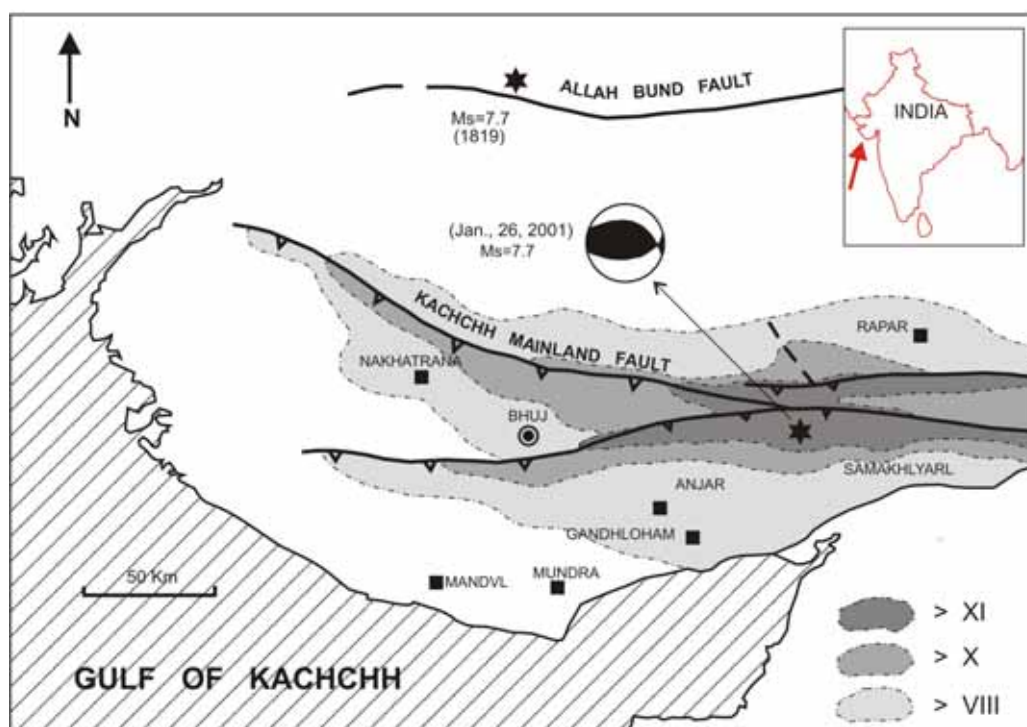
- HARDING, T.P., (1985).** - Seismic characteristics and identification of negative flower structures, positive flower structures and positive structural inversion. Bull. Am. Ass. Petrol. Geol., 69, 582-600.
- LEKKAS, E., (2000a).** - New data for seismic hazard analysis. Risk Analysis, Ed. C.A. Brebbia, Wit Press, Vol. 3, 245-255.
- LEKKAS, E., (2000b).** - Analysis of damage parameters of the Chi-Chi Taiwan earthquake. Risk Analysis, Ed. C.A. Brebbia, Wit Press, Vol. 3, 419-432
- LEKKAS, E., (2002).** - Intensities distribution and parameters controlling their geographic differentiation during the earthquakes of Izmit and Düzce (Turkey 1999). Geologica Balcanica, 32.2-4, 199-208.
- LEKKAS, E., (2003).** - The role of transcurrent fault structures in damage typology during the Izmit and Düzce earthquakes (Turkey, 1999). Advances in Earthquake Engineering, Earthquake Resistant Engineering Structures, Eds. G. Latini, C.A. Brebbia, Wit Press, Vol. 13, 345-357.
- LEKKAS, E. & KRANIS, H., (1997).** - The Doppler-Fizeau effect on the damage distribution during the Kobe earthquake (Japan). Advances in Earthquake Engineering, Earthquake Resistant Engineering Structures, Eds. G.D. Manolis, D.E. Beskos, C.A. Brebbia, Computational Mechanics Publications, Vol. 2, 57-66.
- LEKKAS, E. & DANAMOS, G., (2006)** - Preliminary Observations of the January 8, 2006 Kythira Island (South Western Greece) Earthquake (Mw 6.9). Newsletter EERI (Earthquake Engineering Research Institute), http://www.eeri.org/lfe/greece_kythira_island.html.
- LEKKAS, E., KRANIS, H., LEOUNAKIS, M. & STYLIANOS, P., (1996a).** - Investigation on the unequal distribution of damage during the Hanshin earthquake (Kobe, Japan). VI Spanish Congress and International Conference on Environmental Geology and Land-use Planning "Natural Hazards, Land-Use Planning and Environment", Eds. J. Chacon & C. Irigaray, Granada, 471-478.
- LEKKAS, E., KRANIS, H., STYLIANOS, P. & LEOUNAKIS, M., (1996b).** - Brittle tectonics: a factor in the intensity distribution of the Hanshin earthquake. 11th World Conference on Earthquake Engineering (WCEE), Publ. Elsevier Science Ltd., Paper No 143, Acapulco.
- ΛΕΚΚΑΣ, Ε., ΛΟΖΙΟΣ, Σ. & ΔΑΝΑΜΟΣ, Γ., (2001).** - Παράγοντες που επέδρασαν στον τύπο, στην ένταση και στην κατανομή των ζημιών στο σεισμό του Gujarat, Ινδία. 2ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής & Τεχνικής Σεισμολογίας, ΤΕΕ, Θεσσαλονίκη, Τομ. Α, 215-223.
- LEKKAS, E., SKOURTSOS, E., (2005).** - Αποστολή στο Πακιστάν. Ο σεισμός 7.6R της 8ης Οκτωβρίου 2005. Ημερίδα Αποστολή στο Πακιστάν – Σεισμός 7,6R 8 Οκτωβρίου 2005. Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος, Εργαστήριο Πρόληψης και Διαχείρισης Φυσικών Καταστροφών, Αθήνα, 21σ.
- LOZIOS, S., LEKKAS, E. & DANAMOS, G., (2002).** - The recent seismic activity in Gujarat region (Western India). Risk Analysis, Ed. C.A. Brebbia, Wit Press, Vol. 5, 597-606.
- ΠΑΠΑΝΙΚΟΛΑΟΥ, Δ. & ΔΑΝΑΜΟΣ, Γ., (1991).** - Αντιστοίχιση της γεωτεκτονικής θέσης των Κυθήρων και των Κυκλάδων στη γεωδυναμική εξέλιξη του Ελληνικού τόξου. 5ο Επιστημονικό Συνέδριο της Ελλην. Γεωλ. Εταιρείας, Δελτίο Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας, Θεσσαλονίκη, Τομ. XXV/1, 65-79.
- SATO, T., KIYONO, J. AND TOKI, K., (1996).** - Strong ground motion during the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake, Chapter 2, Advances in Earthquake Engineering. The Kobe Earthquake: Geodynamical Aspects, ed C.A. Brebbia, Wessex Inst. Of Technology, Southampton, UK, 17-38.
- SENGOR, A., (1979).** - The North Anatolian transform fault: its age, offset and tectonic significance. J. Geol. Soc. Lond. 128, 594-604.
- SKOURTSOS, E., & LEKKAS, E., (2007)** - The Tectonic Setting of the October 8th 2005 Earthquake in Kashmir, North Pakistan. 11th International Congress of the Geol. Soc. Greece, Bull. Geol. Soc. Greece Vol. XXX/1, Athens, 463-474.



Εικ. 1 Επιφανειακή εμφάνιση του ανάστροφου ρήγματος που έδωσε το σεισμό της 21^{ης} Σεπτεμβρίου 1999 στην κεντρική Ταϊβαν και οι επιταχύνσεις που καταγράφηκαν (Weather Bureau, Taiwan) και στα δύο τεμάχη εκατέρωθεν του σεισμικού ρήγματος. Διακρίνονται οι σαφώς υψηλότερες τιμές στο ανερχόμενο ανατολικό τέμαχος.



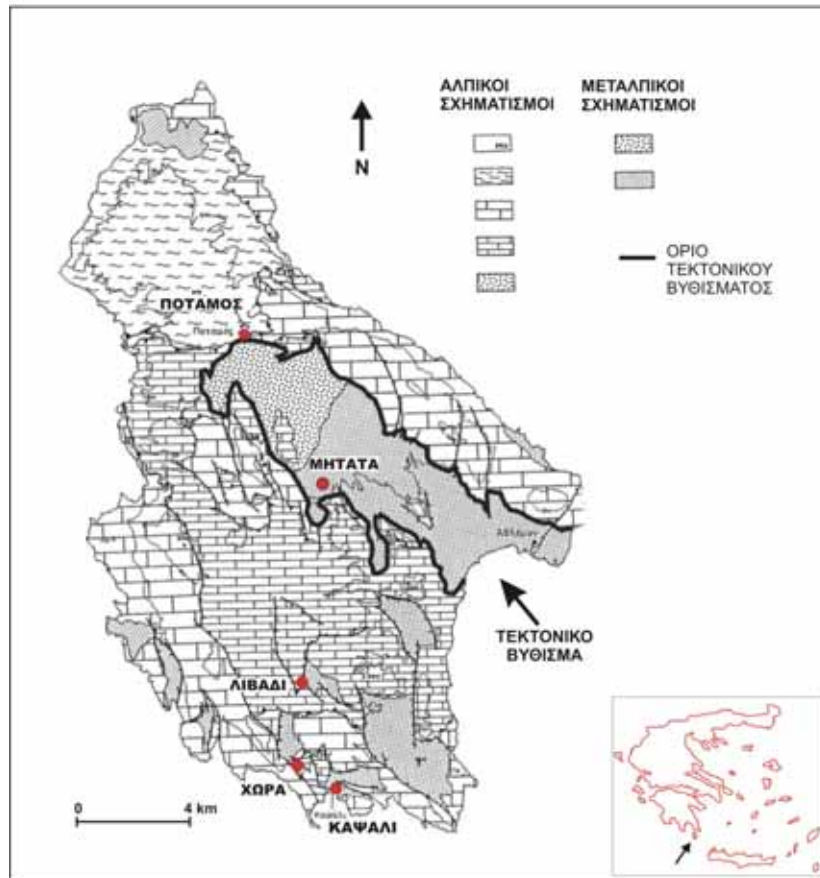
Εικ. 2 Καταστροφή άκαμπτου φράγματος και γέφυρας (πάνω) και παραμόρφωση χώρου άθλησης (κάτω) από τη διέλευση του σεισμικού ρήγματος κατά το σεισμό της 21^{ης} Σεπτεμβρίου 1999 στην Taiwan.



Εικ. 3 Η διανομή των εντάσεων (E.M.S.-1998) στην πληγείσα περιοχή της δυτικής Ινδίας με τις μεγαλύτερες τιμές να εμφανίζονται στα ανερχόμενα τεμάχια των ανάστροφων ρηγμάτων που ενεργοποιήθηκαν κατά το σεισμό της 26^{ης} Ιανουαρίου 2001 (ΛΕΚΚΑΣ κ.α. 2001, LOZIOS et al 2002).



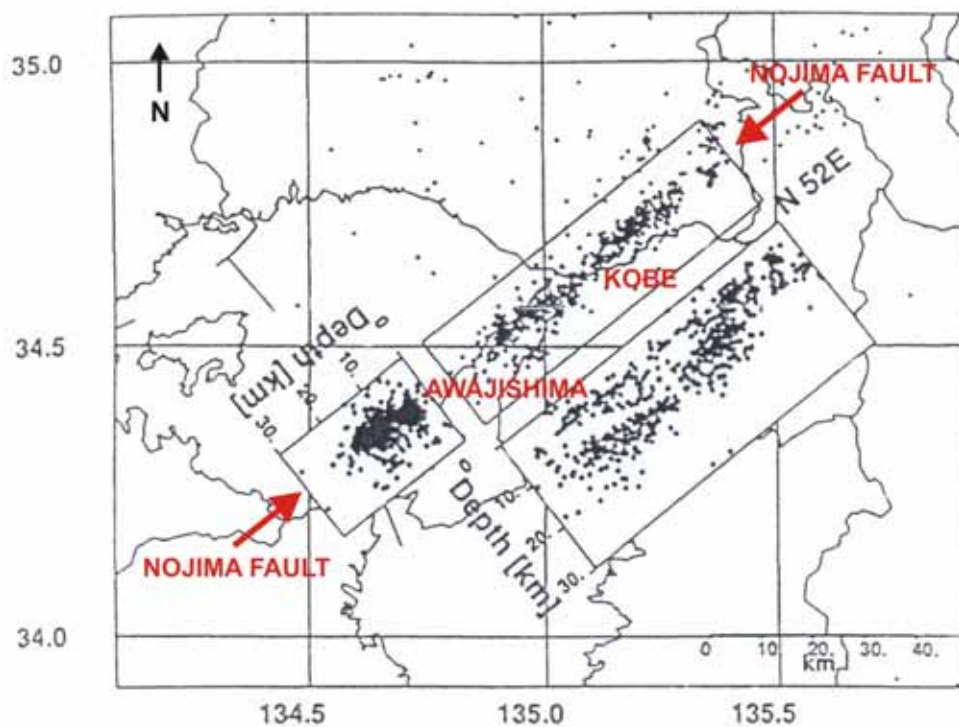
Εικ. 4 Απόψεις καταστροφών που έφτασαν τους XI_{E.M.S.-1998} στο ανερχόμενο τέμαχος του ανάστροφου ρήγματος Kachchh που ενεργοποιήθηκε κατά τον σεισμό της 26^{ης} Ιανουαρίου 2001.



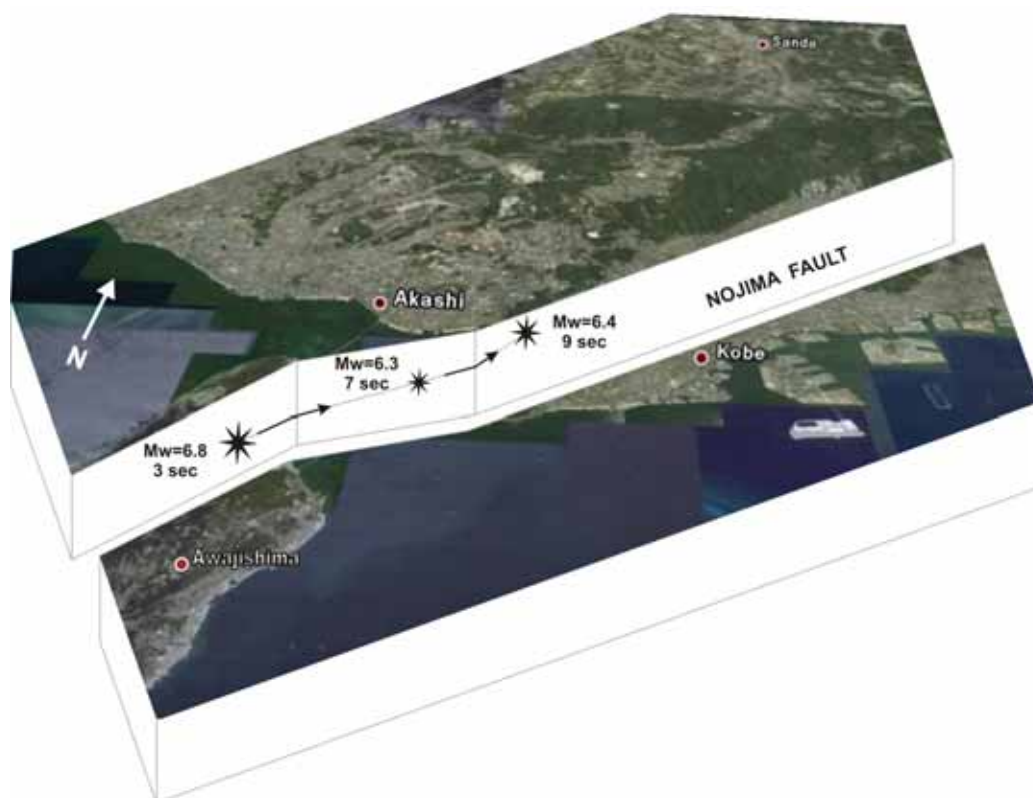
Εικ. 5 Το τεκτονικό βύθισμα στην κεντρική περιοχή των Κυθήρων με γενική διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ (ΠΑΠΑΝΙΚΟΛΑΟΥ & ΔΑΝΑΜΟΣ, 1991). Στα όρια του τεκτονικού βυθίσματος στο χωριό Μητάτα παρατηρήθηκαν οι μεγαλύτερες τιμές εντάσεων (ΛΕΚΚΑΣ & ΔΑΝΑΜΟΣ, 2006).



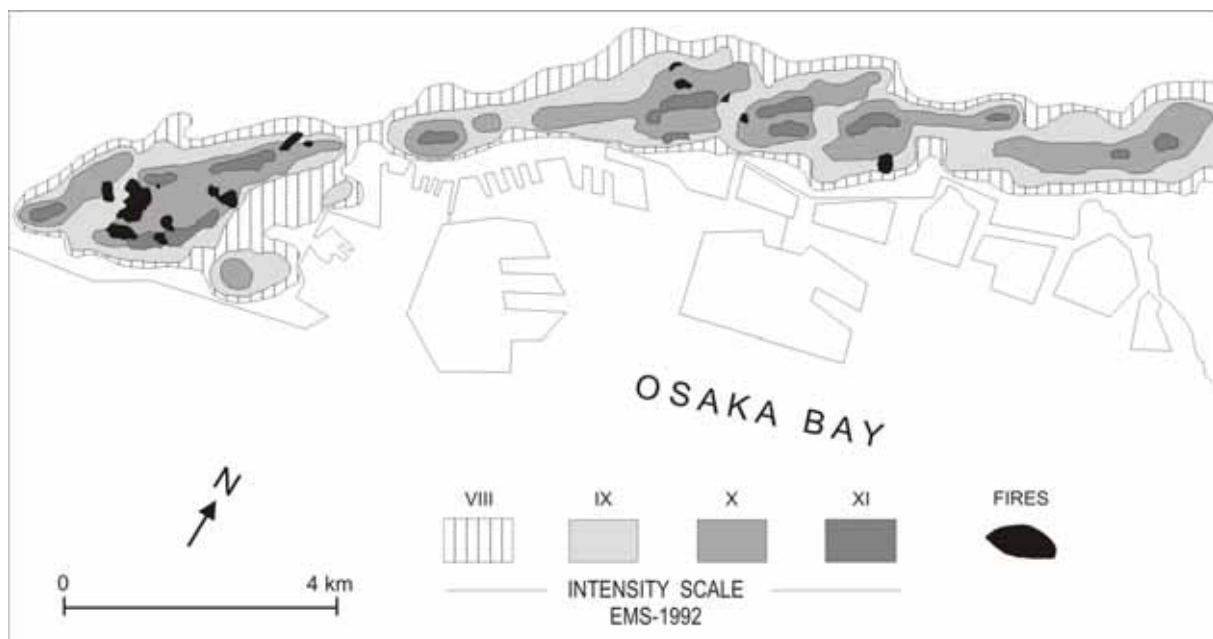
Εικ. 6 Απόψεις καταστροφών που εκδηλωθήκαν στο χωριό Μητάτα κατά το σεισμό της 8^{ης} Ιανουαρίου 2006.



Εικ. 7 Η εντυπωσιακή γραμμική διάταξη των epicέντρων των μετασεισμών κατά μήκος του ρήγματος Nojima που ενεργοποιήθηκε κατά το σεισμό του Hanshin, της 17^{ης} Ιανουαρίου 1995 (SATO et al, 1996).



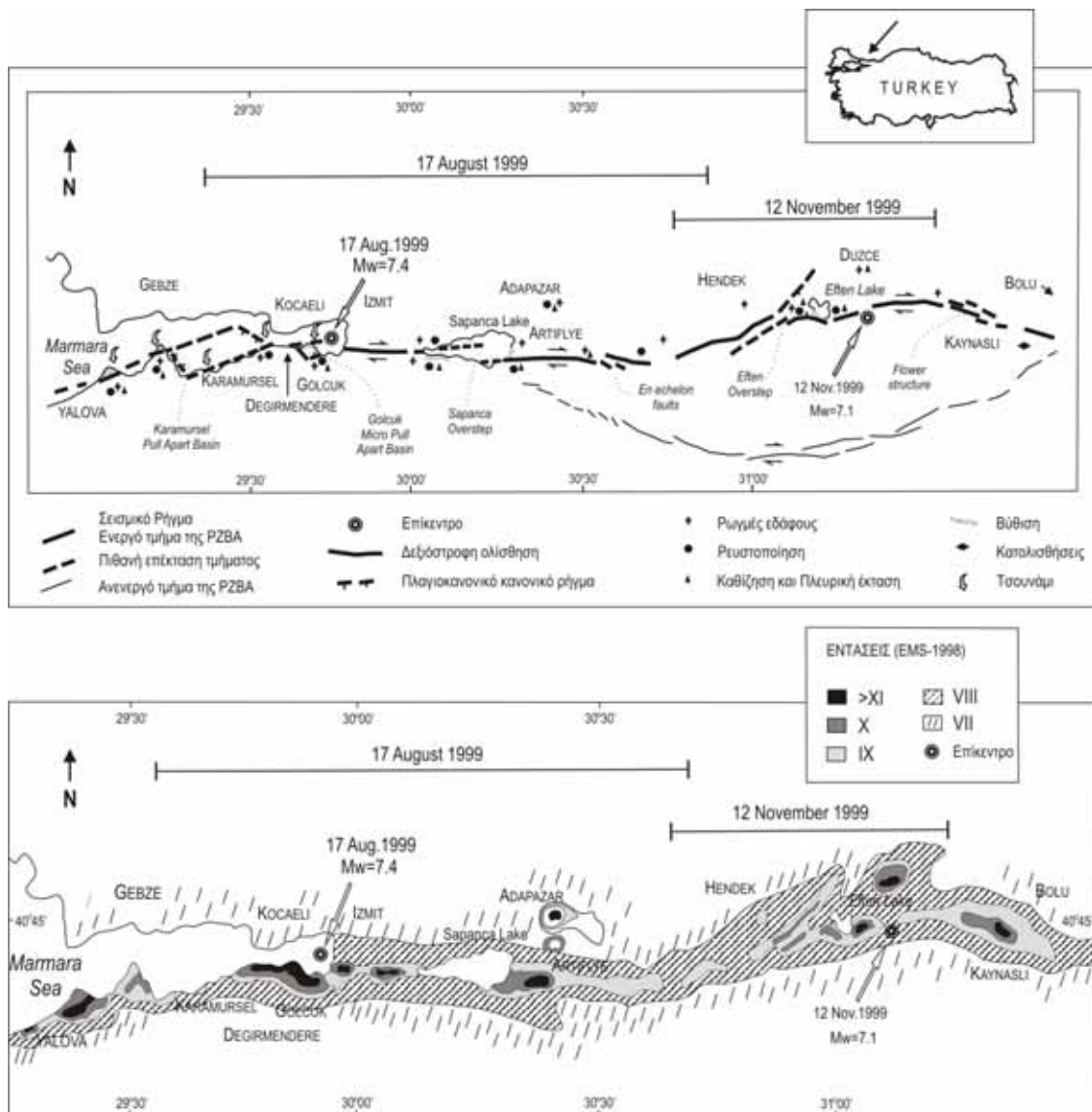
Εικ. 8 Τρισδιάστατη απεικόνιση των διαδοχικών υπογεγονότων που συνθέτουν τον κύριο σεισμό $M_s=7.1$ R της 17ης Ιανουαρίου 1995 και της κατευθυντικότητας της θραύσης από το Awajishima στα ΝΔ προς το Kobe στα ΒΑ.



Εικ. 9 Η εντυπωσιακή γραμμική διάταξη των εντάσεων κατά μήκος του σεισμικού ρήγματος Nojima στο πολεοδομικό συγκρότημα του Kobe κατά το σεισμό του Hanshin (**LEKKAS & KRANIS, 1997**).



Εικ. 10 Απόψεις του ρήγματος Nojima που ενεργοποιήθηκε κατά τον σεισμό του Hanshin της 17^{ης} Ιανουαρίου 1995 (πάνω) και εντυπωσιακή κατάρρευση της υπερυψωμένης οδικής αρτηρίας (κάτω) στο Kobe η οποία ήταν θεμελιωμένη κατά μήκος του ρήγματος.



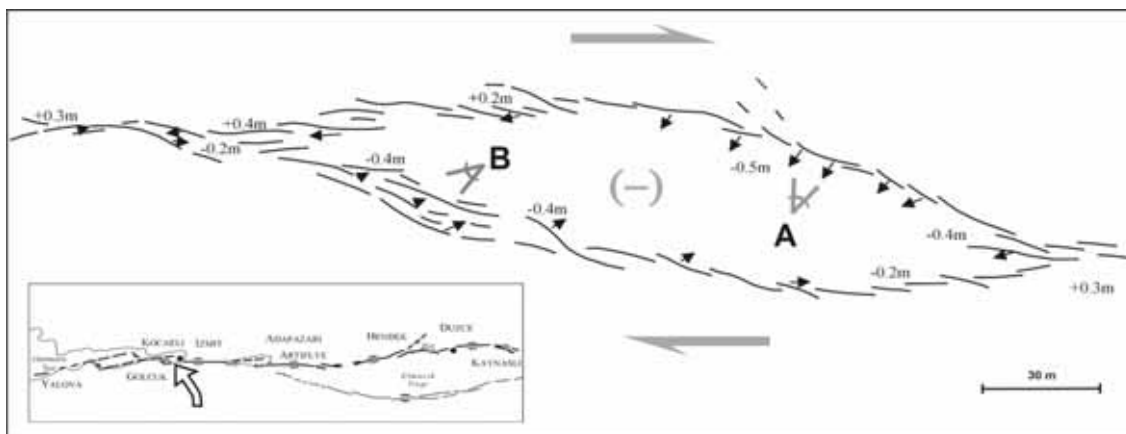
Εικ. 11 Η επιφανειακή εμφάνιση του σεισμικού ρήγματος του σεισμού της 17^{ης} Αυγούστου 1999 και του σεισμού της 12^{ης} Νοεμβρίου 1999 (πάνω) και η εντυπωσιακή γραμμική ανάπτυξη των εντάσεων (κάτω) κατά μήκος του (**LEKKAS, 2002**).



Εικ. 12 Εμφάνιση του σεισμικού ρήγματος του σεισμού της 17^{ης} Αυγούστου 1999 στην παράκτια περιοχή Golcuk που μετέθεσε δεξιόστροφα τη διάταξη των σιδερένιων στηλών κατά 5 μέτρα.



Εικ. 13 Κατάρρευση οικοδομών με κατεύθυνση παράλληλη προς τη διεύθυνση του ίχνους του ρήγματος οριζόντιας ολίσθησης που ενεργοποιήθηκε κατά το σεισμό της 17^{ης} Αυγούστου 1999.



Εικ. 14 Η ανάπτυξη της pull apart basin κατά μήκος της NAFZ στην περιοχή του Golcuk της Τουρκίας. Στις φωτογραφίες (κάτω) διακρίνονται τμήματα του σεισμικού ρήγματος στα όρια του βυθίσματος (**LEKKAS, 2003**).



Εικ. 15 Βύθιση της παράκτιας οικιστικής περιοχής του Gölçuk λόγω ανάπτυξης pull apart basin κατά το σεισμό της 17^{ης} Αυγούστου 1999.



Εικ. 16 Υποχώρηση οικοδομής μέσα στο έδαφος σε περιοχή ανάπτυξης flower structure κατά μήκος της NAFZ κατά το σεισμό της 12^{ης} Νοεμβρίου 1999.



Εικ. 17 Κύρτωση του εδάφους και ολοκληρωτικές καταστροφές κατασκευών κατά μήκος του ανάστροφου ρήγματος και της πτυχωσιγενούς ολίσθησης κατά το σεισμό της 8^{ης} Οκτωβρίου 2005.