

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Ο Σεισμός της ΝΙΚΟΜΗΔΕΙΑΣ (ΤΟΥΡΚΙΑ 1999)



Τομέας Γεωλογίας
Εργαστήριο Γεωλογίας – Παλαιοντολογίας

Πίνακας περιεχομένων

1	ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ	2
1.1	ΓΕΩΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ	2
1.2	ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	3
2	Ο ΣΕΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΝΙΚΟΜΗΔΕΙΑΣ (17^Η ΑΥΓΟΥΣΤΟΥ 1999).....	7
2.1	ΤΕΚΤΟΝΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ	8
2.2	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΕΣ ΔΙΑΡΡΗΞΕΙΣ ΤΟΥ ΣΕΙΣΜΟΥ	9
2.2.1	Τμήμα Gölcük – Λίμνη Sapanca.....	10
2.2.2	Τμήμα Λίμνη Sapanca – Akyazi.....	16
2.2.3	Τμήμα Akyazi – Λίμνη Eften.....	18
2.2.4	Τεκτονικές μικροδομές κατά μήκος της διάρρηξης.....	18
3	ΠΑΛΑΙΟΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	20
3.1	ΘΕΣΗ ASAGI YUVACIK (AY)	20
3.2	ΘΕΣΗ D'ENİZ EVLER (DE)	26
3.3	ΘΕΣΗ ACISU (AC)	31
3.4	ΘΕΣΗ KULLAR-YAYLACIK (KY)	33
4	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	37
5	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ.....	39
5.1	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α'	40
5.2	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β'	52
5.3	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ'	65
5.4	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ'	66

ΤΟΥΡΚΙΑ

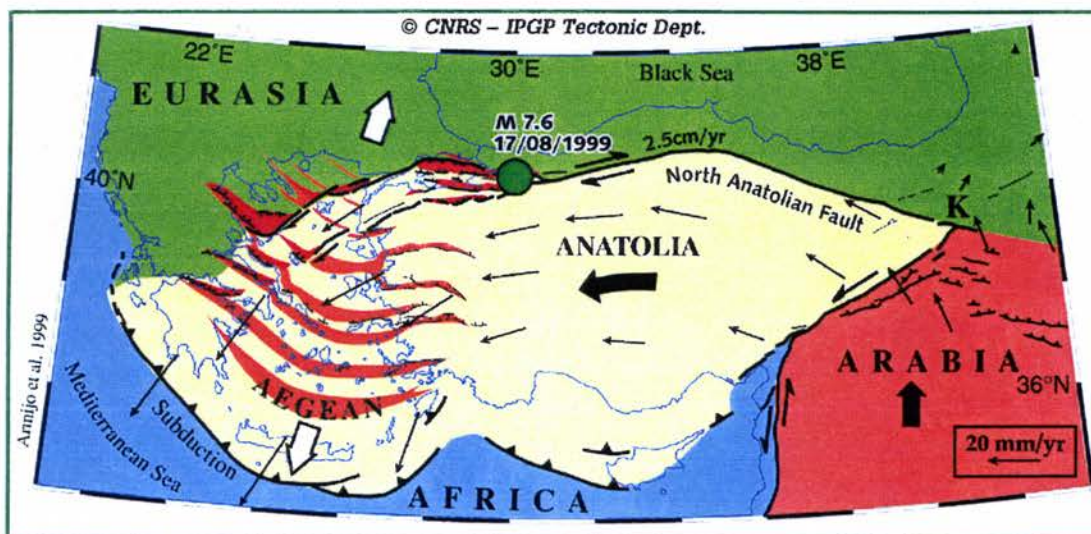
1 Γενικά στοιχεία για την περιοχή μελέτης

Η βασική περιοχή μελέτης για το παρόν ερευνητικό έργο βρίσκεται στη ΒΔ Τουρκία, στο δυτικότερο ορατό τμήμα του ρήγματος της βόρειας Ανατολίας, μεταξύ των πόλεων Gölcük και İzmit (Νικομήδεια). Δευτερεύουσες θέσεις μελετήθηκαν επίσης σε περιοχές ανατολικότερα αυτού του τμήματος.

Η ομάδα έργου για την έρευνα υπαίθρου στη συγκεκριμένη περιοχή για το Τμήμα Γεωλογίας του Α.Π.Θ. αποτελείτο από τον Καθηγητή κ. Σπύρο Παυλίδη, και το Δρ. Αλέξανδρο Χατζηπέτρο, οι οποίοι κατά τη διάρκεια των εργασιών υπαίθρου συνεπικουρήθηκαν από τους κ.κ. Zeki Tutkun (Καθηγητή Πανεπιστημίου Çanakkale), Volkan Özaksoy (Δρ. Γεωλόγο, Μ.Τ.Α., Άγκυρα) και Bülent Doğan (Δρ. Γεωλόγο, Ι.Τ.Υ, Κωνσταντινούπολη), χωρίς επιβάρυνση του προϋπολογισμού του έργου.

1.1 Γεωτεκτονική τοποθέτηση

Η περιοχή μελέτης είναι τεκτονικά ενεργή και παρουσιάζει συχνά σεισμούς μεγάλου μεγέθους. Η σημαντική σεισμική δραστηριότητα κατά μήκος γενικά του ρήγματος της βόρειας Ανατολίας οφείλεται κατά κύριο στο γενικό γεωτεκτονικό καθεστώς (Εικόνα 1-1). Καθώς η Αφρικανική και η Αραβική πλάκα κινούνται προς Β, το τέμαχος της Ανατολίας – Αιγαίου κινείται προς τα δυτικά. Η κίνηση αυτή συνοδεύεται από τη δραστηριότητα δύο μεγάλων ρηξιγενών ζωνών: το δεξιόστροφο ρήγμα της βόρειας Ανατολίας στα Β, συνολικού μήκους 1500 km, και το αριστερόστροφο ρήγμα της ανατολικής Ανατολίας στα Α, μήκους 550 km.

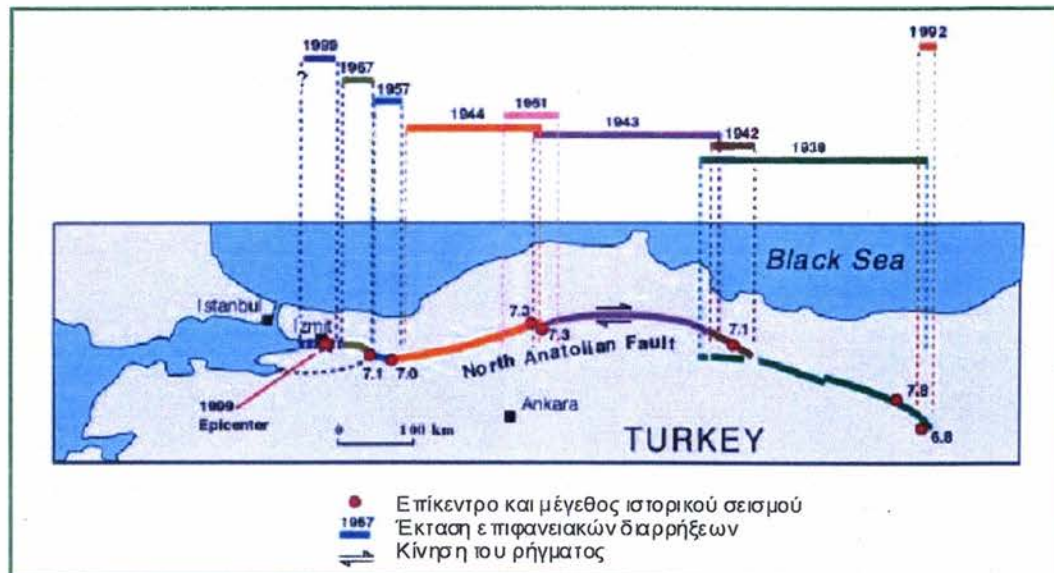


Εικόνα 1-1. Κίνηση προς τα δυτικά του τεμάχους της Ανατολίας – Αιγαίου, η οποία λαμβάνει χώρα στα ρήγματα της Βόρειας (δεξιόστροφο) και της Ανατολικής (αριστερόστροφο) Ανατολίας (Armijo et al., 1999). Τα βέλη δείχνουν το διάνυσμα της κίνησης σε mm/yr με βάση δεδομένα GPS και SLR (Reilinger et al., 1997). Από γεωλογικά δεδομένα προσδιορίζεται μία ταχύτητα κίνησης της τάξης των 2,5 cm/yr για το Ολόκαινο (Hubert, 1998).

Η μεγάλη τεκτονική δομή του δεξιόστροφου ρήγματος της βόρειας Ανατολίας παρουσιάζει ολίσθηση της τάξης των 10 – 20 mm/yr (Barka, 1992, Straub and Kahle, 1995).

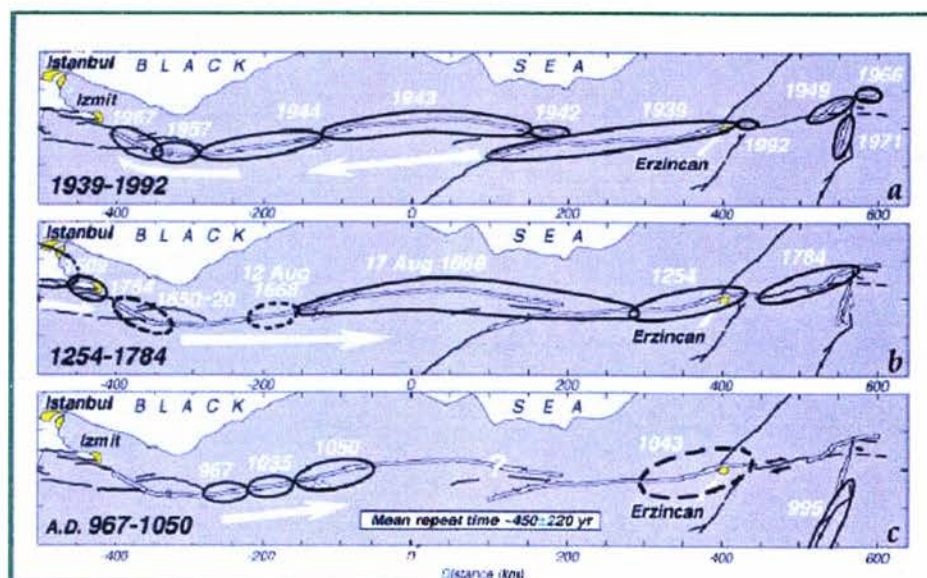
1.2 Σεισμική ιστορία της περιοχής μελέτης

Η γραπτή ιστορία της Τουρκίας, κυρίως από βυζαντινές και οθωμανικές πηγές, έχει ενδείξεις για πολλούς καταστροφικούς σεισμούς. Παρά το ότι οι μαρτυρίες αυτές δεν παρέχουν πληροφορίες σχετικά με επιφανειακές διαρρήξεις, είναι δυνατόν να εξαχθούν έμμεσα σχετικά συμπεράσματα από περιγραφές των ζημιών και από την ακτίνα εξάπλωσής τους. Η θέση των επιφανειακών διαρρήξεων παλαιότερων σεισμών είναι σημαντική για την εκτίμηση του σεισμικού κινδύνου, καθώς επίσης και για την εξαγωγή ποσοτικών δεδομένων που αφορούν την περίοδο επανάληψης και το μέγεθος πιθανών επερχόμενων σεισμών.



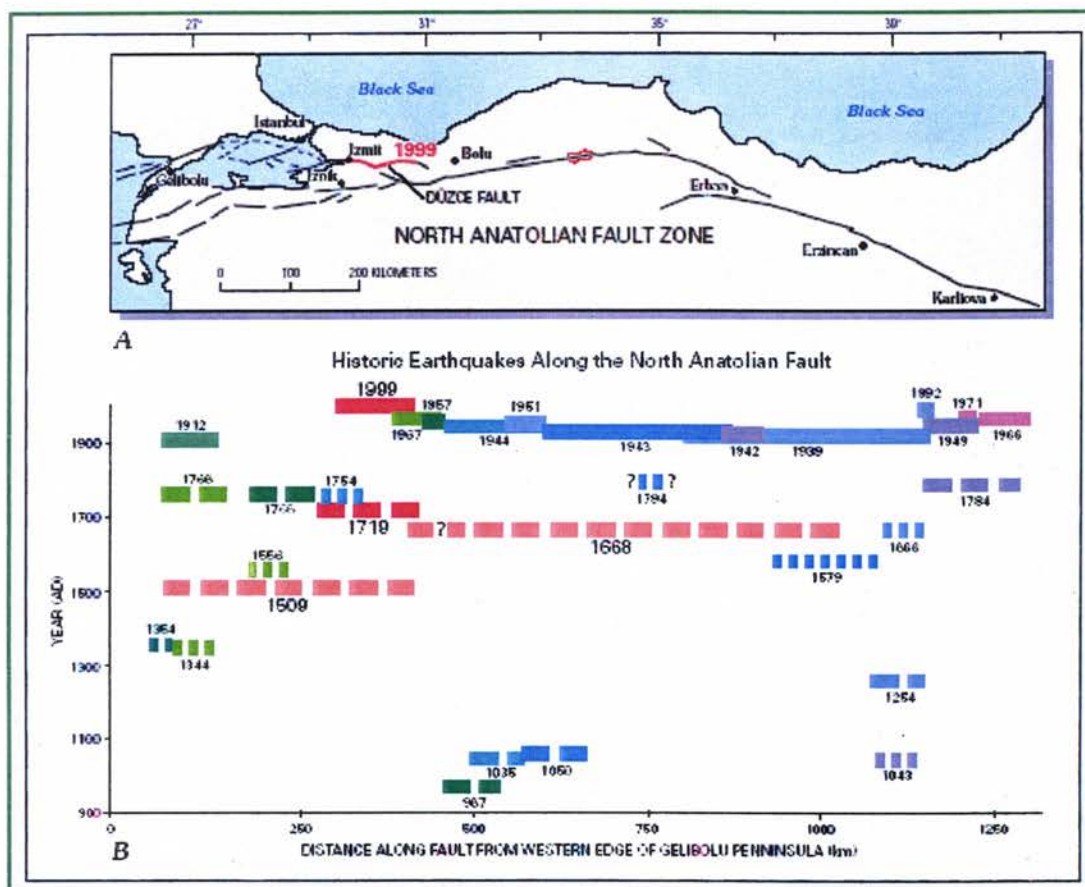
Εικόνα 1-2. Πρόσφατη ιστορική δραστηριότητα στον 20^ο αιώνα στο ρήγμα της Βόρειας Ανατολίας (τροποποιημένο από *Okumura et al., 1993*).

Κατά τον 20^ο αιώνα, ισχυρού μεγέθους σεισμοί που προκάλεσαν επιφανειακές διαρρήξεις στο ρήγμα της βόρειας Ανατολίας συνέβησαν το 1939 (M=7,8), 1942 (M=7,1), 1943 (M=7,3), 1944 (M=7,3), 1951, 1957 (M=7,0), 1967 (M=7,1), 1992 (M=6,8) και 1999 (M= 7,4 και 7,1), Εικόνα 1-2.



Εικόνα 1-3. Μετατόπιση της δραστηριότητας στο ρήγμα της βόρειας Ανατολίας σε διάφορες ιστορικές περιόδους.

Είναι χαρακτηριστικό ότι ενώ κατά τον 20^ο αιώνα παρατηρήθηκε μία «μετανάστευση» της σεισμικής δραστηριότητας προς τα Δ, σε παλαιότερες ιστορικές περιόδους η δραστηριότητα ακολούθησε αντίστροφη πορεία, προς τα Α (Εικόνα 1-3).



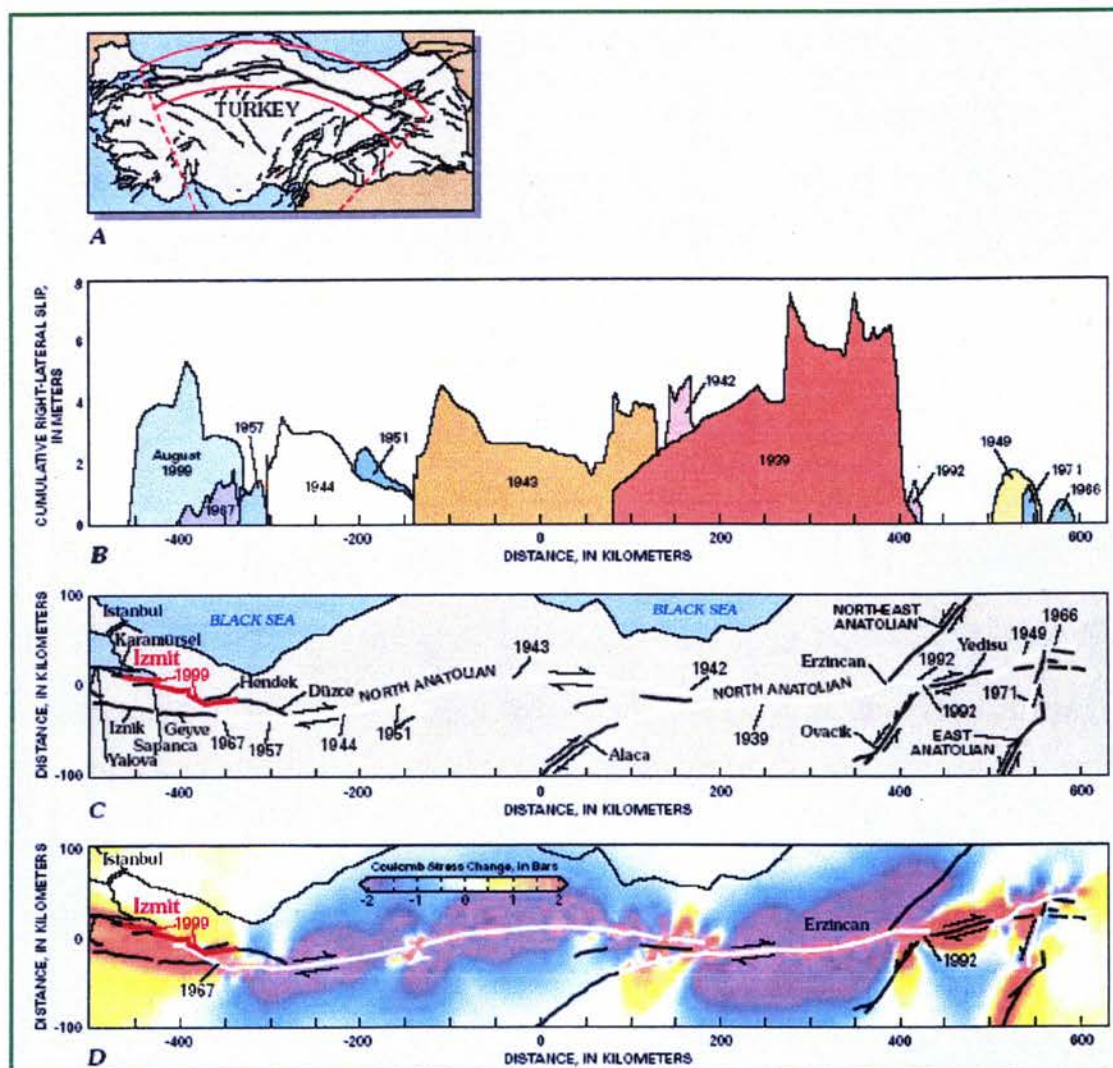
Εικόνα 1-4. Α. Σχηματικός χάρτης του ρήγματος της βόρειας Ανατολίας. Το ρήγμα αναπτύσσεται γενικά σε ευθεία γραμμή, αλλά στο δυτικό του τμήμα διακλαδίζεται σε περισσότερους κλάδους. Το τμήμα που δραστηριοποιήθηκε στο σεισμό του Αυγούστου 1999 σημειώνεται με κόκκινο χρώμα. Το τμήμα αυτό ανήκει κατά ένα μέρος του βορειότερου κλάδου, και κατά ένα μέρος στο ρήγμα του Düzce, όπου και σημειώθηκε ο δεύτερος μεγάλος σεισμός ($M=7,1$) το Νοέμβριο του 1999. Τροποποιημένο από *Barka (1992)* και *Rockwell et al. (2001)*. Β. Ιστορικοί σεισμοί κατά μήκος του ρήγματος και αντίστοιχες επιφανειακές διαρρήξεις. Η διάρρηξη του Αυγούστου 1999 φαίνεται να είναι παρόμοια με αυτή του σεισμού του 1719. Οι συμπαγείς γραμμές δείχνουν γνωστές σεισμικές διαρρήξεις, οι μακρές παύλες πολύ πιθανές επιφανειακές διαρρήξεις, ενώ οι κοντές παύλες υποδεικνύουν διαρρήξεις για τις οποίες τα ιστορικά δεδομένα δεν είναι πολύ βέβαια. Πριν από το 1719, το ίδιο τμήμα δραστηριοποιήθηκε ως μέρος μίας μεγαλύτερης διάρρηξης το 1668 και το 1509. Κενά στα ιστορικά αρχεία μπορούν να ερμηνευθούν είτε ως απουσία σεισμικής δραστηριότητας, είτε ως απουσία μαρτυριών. Επειδή στο κεντρικό τμήμα του ρήγματος υπάρχουν λίγα αστικά κέντρα, η έλλειψη ιστορικών δεδομένων είναι φυσικό επακόλουθο. Σύνθεση από *Ambraseys (1970)*, *Ikeda et al. (1991)*, *Ambraseys and Finkel (1995)*, *Barka (1996)*, *Stein et al. (1997)*, και *Rockwell et al. (2001)*.

Η Εικόνα 1-4 δίνει με λεπτομέρεια πληροφορίες για την επιφανειακή διάρρηξη των ιστορικών σεισμών στο ρήγμα της βόρειας Ανατολίας, ενώ η Εικόνα 1-5 δείχνει διάφορα στοιχεία για το μέτρο της δεξιόστροφης μετατόπισης και της συσσώρευσης των τάσεων κατά τον 20^ο αιώνα.

Με βάση συγκρίσεις ζημιών και της ακτίνας διασποράς τους, ο σεισμός του Αυγούστου 1999 είναι όμοιος με αυτόν του 1719. Ο σεισμός αυτός κατέστρεψε πολλούς

οικισμούς, ενώ η περιγραφή των ζημιών του είναι αξιοσημείωτα όμοια με αυτή του 1999 (Ambraseys and Finkel, 1995).

Δύο άλλοι σεισμοί το 1766 και το 1754 συνέβησαν πιθανότερα πιο κοντά στην Κωνσταντινούπολη. Αυτοί οι σεισμοί είναι όμοιοι σε μέγεθος με αυτούς του 20^{ου} αιώνα. Από ιστορικά αρχεία φαίνεται ότι παλαιότεροι σεισμοί ενεργοποίησαν πολύ μεγάλα τμήματα του ρήγματος. Το 1509 π.χ., ένας σεισμός προκάλεσε επιφανειακές διαρρήξεις στο τμήμα από την Καλλίπολη (Gelibolu) στα δυτικά, μέχρι την Βόλου στα ανατολικά. Ένας επίσης μεγάλος σεισμός συνέβη το 1668 στο κεντρικό – ανατολικό τμήμα του ρήγματος σε μήκος άνω των 600 km από την Βόλου στα δυτικά μέχρι το Erzincan στα ανατολικά.



Εικόνα 1-5. Το ρήγμα της Βόρειας Ανατολίας. Α. Θέση του κυρίου ρήγματος και των άλλων κύριων ρηγμάτων της Τουρκίας. Οι εικόνες Β έως D προβάλλονται σε σχέση με τον πόλο περιστροφής (στο σημείο όπου τέμνονται οι διακεκομμένες γραμμές). Β, C. Η προς τα Δ μετανάστευση των σεισμών συνδέεται με μετατόπιση 2 – 6 m ανά γεγονός, με μέσο όρο τα 4 m. Ο σεισμός του Αυγούστου 1999 φαίνεται ότι γενικά είναι τυπικός όσον αφορά τη μετατόπιση και το μήκος των επιφανειακών διαρρήξεων. D. Συσσώρευση της τάσης στο ρήγμα της βόρειας Ανατολίας που συνδέεται με την προς τα Δ μετανάστευση των σεισμών στο διάστημα 1939-1967. Παρά το ότι γενικά η τάση μειώθηκε σε ένα μήκος 750 km του ρήγματος, στην περιοχή της Νικομήδειας (Izmit) υπολογίστηκε ότι αυξήθηκε (Stein et al., 1997).

Τον 20^ο αιώνα το ρήγμα της βόρειας Ανατολίας έχει προκαλέσει σεισμούς σε διαφορετικά τμήματά του με έναν συστηματικό τρόπο, που ωστόσο είναι μη τυπικός σε μεγάλα ρήγματα. Ξεκινώντας από το σεισμό του 1939 ($M = 7,9$), ο οποίος δημιούργησε επιφανειακές διαρρήξεις μήκους 350 km, στον 20^ο αιώνα συνέβησαν άλλοι δέκα σεισμοί μεσαίου ή μεγάλου μεγέθους (Εικόνα 1-4).

Οι περισσότεροι από του σύγχρονους σεισμούς συνέβησαν διαδοχικά σε μία μετανάστευση προς τα Δ. Ο σεισμός του Αυγούστου 1999 είναι ο δυτικότερος μεγάλος σεισμός (στο βόρειο κλάδο του ρήγματος), σε ένα τμήμα του ρήγματος που φαίνεται να μην είχε δραστηριοποιηθεί για τουλάχιστον 250 έτη.

Τα ιστορικά δεδομένα δεν δείχνουν ότι η σεισμική συμπεριφορά του τμήματος αυτού είναι επανάληψη κάποιας προηγούμενης διαδοχής. Αυτό που φαίνεται από το ιστορικό αρχείο είναι ότι πολλοί σεισμοί με επιφανειακές διαρρήξεις συνέβησαν σε κοντινές χρονικές περιόδους κατά το παρελθόν, όπως αυτοί των 18^{ου}, 14^{ου} και 11^{ου} αιώνων.

2 Ο σεισμός της Νικομήδειας (17^η Αυγούστου 1999)

Στις 17 Αυγούστου 1999 ένας ισχυρότατος σεισμός με επίκεντρο την περιοχή της Νικομήδειας (Izmit ή Kocaeli, όπως είναι επίσης γνωστή η πόλη) μεγέθους $M_w=7,4$ έπληξε τη ΒΔ Τουρκία, προκαλώντας το θάνατο δεκάδων χιλιάδων ανθρώπων και δημιουργώντας πολύ εκτεταμένες καταστροφές σε κτίρια και υποδομές, οι οποίες προκάλεσαν σοβαρό πλήγμα στην εθνική οικονομία της Τουρκίας.

Η ευρύτερη περιοχή της θάλασσας του Μαρμαρά (Κωνσταντινούπολη και γύρω πόλεις, ειδικά γύρω από τον κόλπο της Νικομήδειας (Izmit)) έχει γνωρίσει πολύ μεγάλη ανάπτυξη τις τελευταίες δύο δεκαετίες. Η ανάπτυξη αυτή οφείλεται στην πολύ γρήγορη βιομηχανοποίηση της περιοχής που περικλείεται από το τρίγωνο των πόλεων Κωνσταντινούπολη, Νικομήδεια και Προύσα (Bursa). Στον κόλπο της Νικομήδειας είναι κατασκευασμένα πολλά μεγάλα πετροχημικά συγκροτήματα, μεταποιητικές και κατασκευαστικές βιομηχανίες, καθώς επίσης και μεγάλα λιμάνια (πολιτικά και στρατιωτικά).

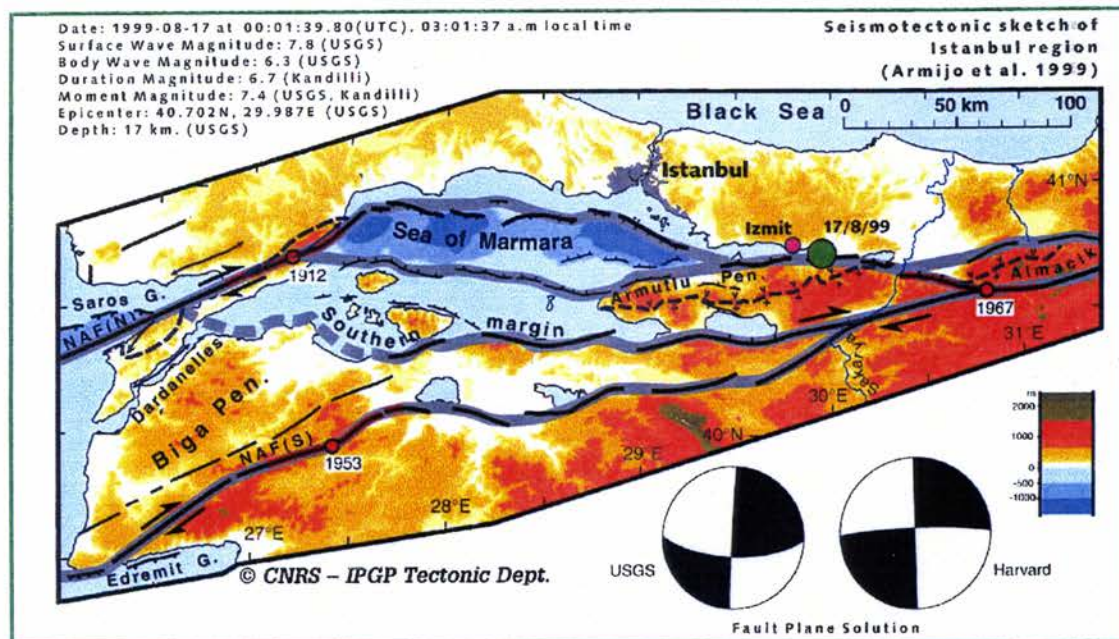
Αυτή η βιομηχανοποίηση έχει ως αποτέλεσμα την έλευση πολλών εσωτερικών μεταναστών από την ανατολική Τουρκία, επιτείνοντας έτσι το στεγαστικό πρόβλημα. Υπολογίζεται ότι περίπου 20 εκατομμύρια άνθρωποι (το ένα τρίτο του πληθυσμού της Τουρκίας) διαμένουν μόνιμα σε αυτή την περιοχή. Λόγω της αυξημένης ανάγκης στέγασης, προτιμάται ευρέως η λύση κατασκευής έως και εξώροφων πολυκατοικιών, συχνά χωρίς την τήρηση κανενός είδους προδιαγραφών και χωρίς κανέναν έλεγχο. Είναι δε χαρακτηριστικό, ότι ακόμη και μετά το σεισμό και τις γεωλογικές – γεωτεχνικές μελέτες και υποδείξεις, κατασκευάζονταν κτίρια ακόμα και σε περιοχές απαγορευμένης δόμησης (Εικόνα 2-1).



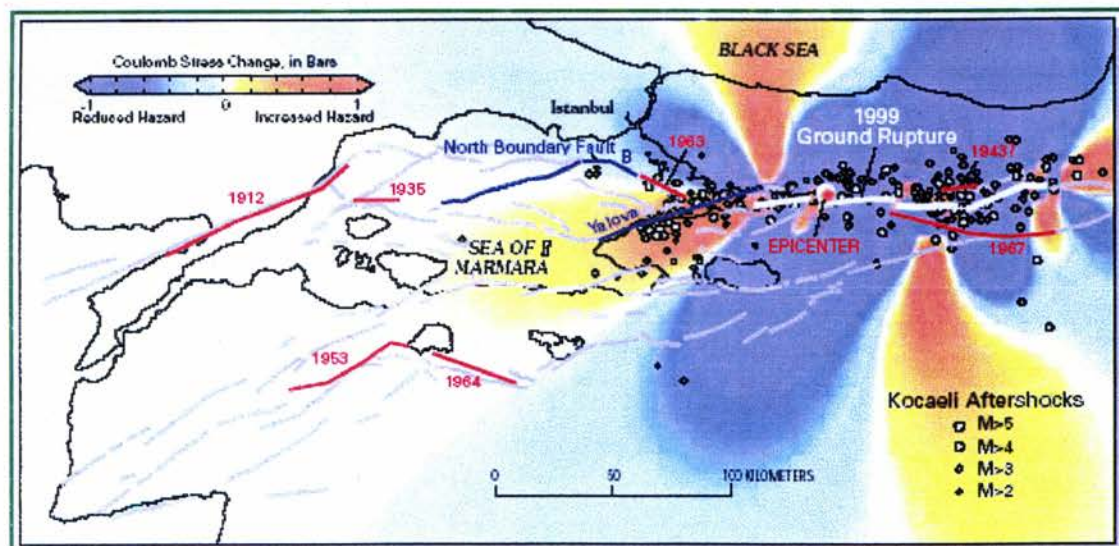
Εικόνα 2-1. Ανέγερση οικοδομής σε «απαγορευμένη» ζώνη ανατολικά του Gölcük (Σεπτέμβριος 2001).

2.1 Τεκτονικό περιβάλλον

Ο σεισμός της 17^{ης} Αυγούστου 1999 προκλήθηκε από ενεργοποίηση του δυτικού τμήματος του ρήγματος της βόρειας Ανατολίας. Η πιθανότητα ενός ισχυρού σεισμού στην επικεντρική περιοχή του σεισμού του 1999 είχε υπολογιστεί σε 12% σε ένα διάστημα 30 ετών (Stein et al., 1997).



Εικόνα 2-2. Στην περιοχή μελέτης, το ρήγμα της Βόρειας Ανατολίας διακλαδίζεται σε δύο κύριους κλάδους, το βόρειο – NAF (N) και το νότιο NAF (S), οι οποίοι απέχουν περί τα 100 km. Ο βόρειος κλάδος οριοθετεί τη νότια ακτή του κόλπου του İzmit. Ο σεισμός της Νικομήδειας έγινε σε αυτόν τον κλάδο, με επίκεντρο ανατολικά της θάλασσας του Μαρμαρά. Εικονίζονται επίσης οι μηχανισμοί γένεσης του σεισμού από USGS και Harvard (τροποποιημένο από Armijo et al., 1999).



Εικόνα 2-3. Χάρτης που δείχνει τη μεταφορά της τάσης σε γνωστά και πιθανά ρήγματα στη θάλασσα του Μαρμαρά μετά το σεισμό του Αυγούστου 1999. Είναι χαρακτηριστικό ότι οι εκτός ρήγματος μετασεισμοί τείνουν να συγκεντρώνονται στο σημείο όπου υπολογίζεται ότι η τάση Coulomb αυξήθηκε ως αποτέλεσμα του σεισμού. Ο σεισμός του Düzce της 12^{ης} Νοεμβρίου 1999 ($M_w = 7,1$) συνέβη στην περιοχή αυξημένης τάσης ανατολικά της διάρρηξης του Αυγούστου (Stein).

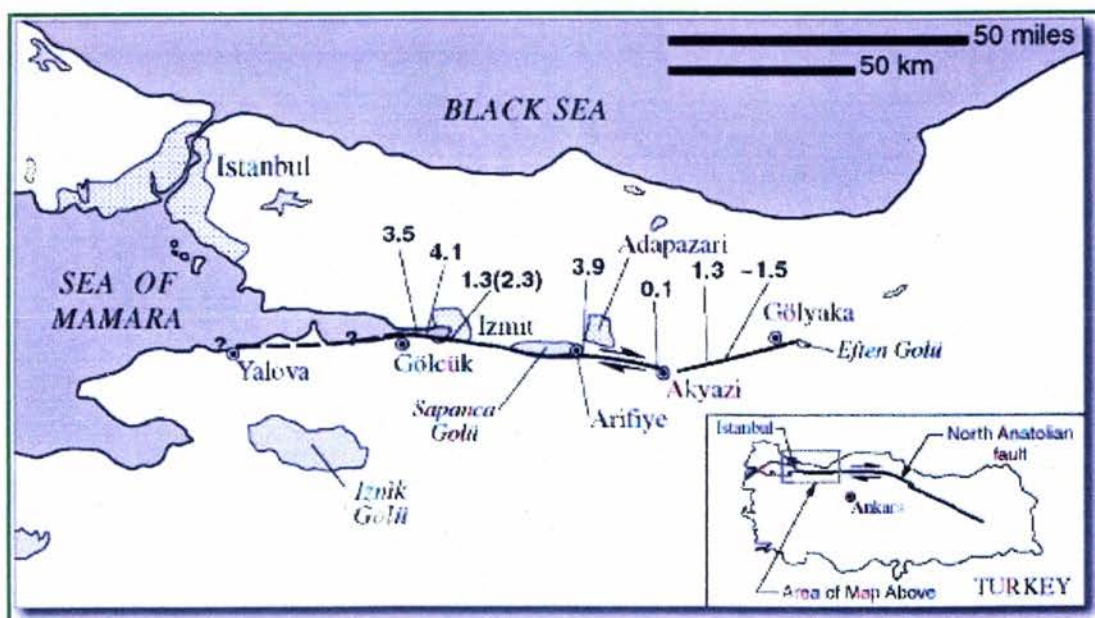
Στη μεγαλύτερή του έκταση το ρήγμα της βόρειας Ανατολίας παρουσιάζεται ως μία τεκτονική γραμμή, με μερικά μικρότερα υποπαράλληλα ρήγματα. Στο δυτικό του τμήμα όμως, και για μία απόσταση 650 km, διακλαδίζεται σε περισσότερους κλάδους, εκ των οποίων οι σημαντικότεροι είναι ο βόρειος και ο νότιος (Εικόνα 2-2). Ο πιο βόρειος είναι και ο πιο ενεργός, και είναι αυτός στον οποίο συνέβη ο σεισμός του Αυγούστου του 1999. Στην Εικόνα 2-3 φαίνεται η μεταφορά τάσης σε γειτονικά ρήγματα μετά το σεισμό, διαδικασία που συνέβαλε στη γένεση του σεισμού του Düzce το Νοέμβριο του ίδιου έτους.

2.2 Επιφανειακές διαρρήξεις του σεισμού

Οι επιφανειακές διαρρήξεις στο σεισμό του 1999 επηρέασε κυρίως Πλειοκαινικά και Τεταρτογενή ιζήματα σε λεκάνες. Οι λεκάνες αυτές, οι οποίες είναι πολύ συνηθισμένες κατά μήκος όλης της έκτασης του ρήγματος της βόρειας Ανατολίας, είναι χαρακτηριστικές μορφοτεκτονικές δομές που συνδέονται με τη δράση του ρήγματος.

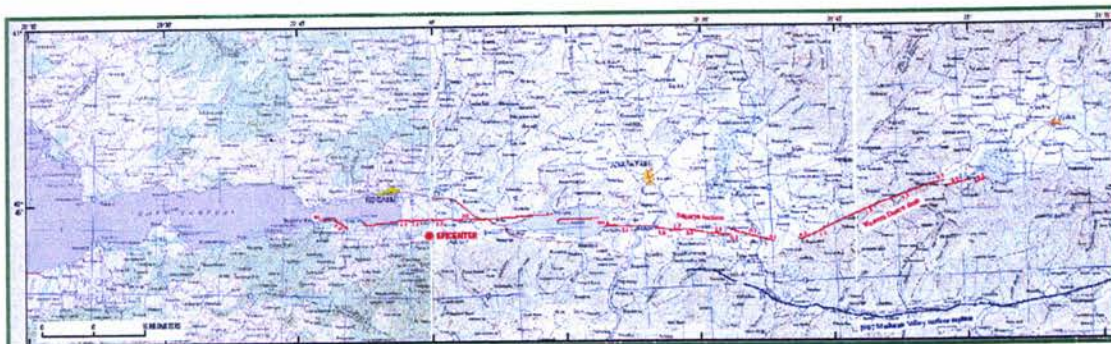
Ο σεισμός της 17^{ης} Αυγούστου 1999 προκάλεσε τη δημιουργία επιφανειακών διαρρήξεων σε μία απόσταση τουλάχιστον 110 km. Οι επιφανειακές διαρρήξεις συνέβησαν κατά μήκος του ρήγματος της βόρειας Ανατολίας ανατολικά και δυτικά του epicέντρου, αλλά και σε ένα μέρος του BA – ND ρήγματος του Düzce (Εικόνα 2-4).

Οι επιφανειακές διαρρήξεις χαρακτηρίζονται από μία ζώνη επάλληλων επικαλυπτόμενων ρηγμάτων παράταξης A-Δ, η οποία εκφράζει μία συνιστώσα εφελκυσμού στο δυτικό τμήμα του βορειότερου κλάδου του ρήγματος της βόρειας Ανατολίας (*Armijo et al., 1999*). Η μέγιστη δεξιόστροφη μετατόπιση έφτασε περίπου τα 5 m, 31 km ανατολικά του epicέντρου. Η συνήθης μετατόπιση έφτανε τα 2,5 έως 4,5 m δεξιόστροφης κίνησης. Η μετατόπιση μειωνόταν σταδιακά ανατολικά του μέγιστου, αλλά πιο απότομα προς τα δυτικά (Εικόνα 1-5B), όπως επίσης και σε θέσεις όπου η επιφανειακή διάρρηξη μεταπίπτει σε νέα γραμμή, όπως π.χ. στη λίμνη Sapanca. Το άλμα επίσης μειώνεται απότομα στα ανατολικά, όπου είναι η διάρρηξη είναι παράλληλη με τη διάρρηξη του σεισμού του 1967 στην κοιλάδα Mudurnu (Εικόνα 2-5).



Εικόνα 2-4. Γενικός χάρτης του ρήγματος της Βόρειας Ανατολίας (ένθετο) και η ζώνη των σεισμικών διαρρήξεων που δημιουργήθηκε κατά το σεισμό της 17^{ης} Αυγούστου 1999. Οι αριθμοί εκτός παρένθεσης δείχνουν τη δεξιόστροφη μετατόπιση κατά μήκος του ρήγματος, ενώ οι αριθμοί σε παρενθέσεις δείχνουν την κατακόρυφη μετατόπιση (από EERI, 1999).

Η ρηξιγενής ζώνη συνήθως ήταν μία στενή ζώνη διαρρήξεων (πλάτους 5 με 25 m), οι οποίες είτε ακολουθούσαν τη γραμμή του ρήγματος, είτε σχημάτιζαν μικρά παράλληλα ρήγματα υπό γωνία με την κύρια γραμμή. Η σεισμική διάρρηξη φαίνεται ότι ακολουθούσε παλαιότερες επιφανειακές διαρρήξεις, καθώς σε αρκετές περιπτώσεις όπου υπήρχε κατακόρυφη (κανονική) μετατόπιση παρατηρήθηκε ένα προϋπάρχον ρηξιγενές πρανές.



Εικόνα 2-5. Χάρτης επιφανειακών διαρρήξεων του σεισμού του Αυγούστου 1999 κατά μήκος του ρήγματος της βόρειας Ανατολίας. Η διάρρηξη και οι μετατοπίσεις στο ρήγμα σημειώνονται με κόκκινο χρώμα. Σημειώνεται επίσης, με μπλε χρώμα, το δυτικό άκρο της διάρρηξης του σεισμού της κοιλάδας Mudurnu (1967), η οποία σε αυτό το τμήμα ήταν παράλληλη με αυτή του 1999 (Barka et al., 1999).

2.2.1 Τμήμα Gölcük – Λίμνη Sapanca

Η δυτικότερη εμφάνιση χερσαίας διάρρηξης παρατηρήθηκε στο Gölcük, όπου μία προβλήτα μετατοπίστηκε περίπου 4 m (Εικόνα 2-6), ενώ και οι εγκαταστάσεις της ναυτικής βάσης υπέστησαν σοβαρές καταστροφές λόγω των επιφανειακών διαρρήξεων (Εικόνα 2-7).



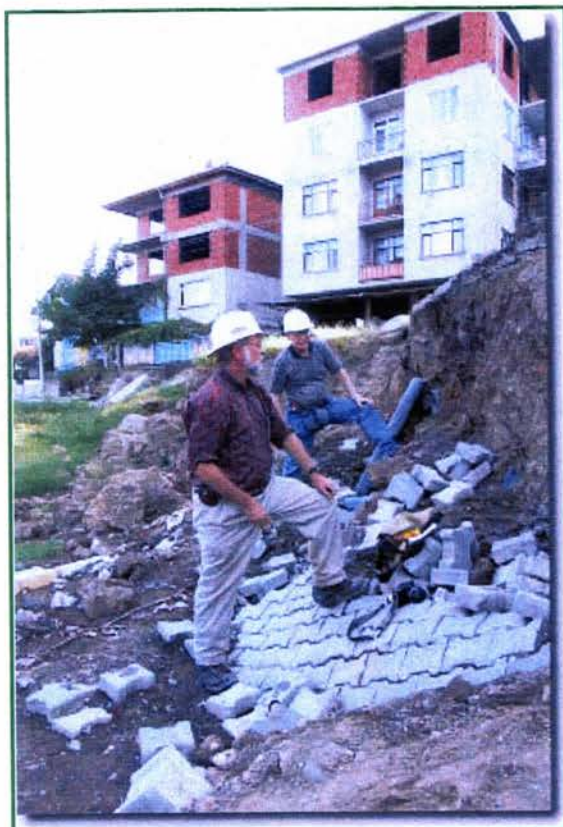
Εικόνα 2-6. Συμπιεστικές επιφανειακές διαρρήξεις οι οποίες συνδέονται με δεξιόστροφη μετατόπιση στις προβλήτες της ναυτικής βάσης του Gölcük.

Προς τα δυτικά η διάρρηξη διερχόταν από έναν μικρό κόλπο στο Degirmendere, και η παραλία του οικισμού βυθίστηκε. Δεν αναφέρθηκε καμία επιφανειακή διάρρηξη στη χερσόνησο Hersek, και είναι πιθανό ότι η υποθαλάσσια διάρρηξη σταμάτησε δυτικά του Degirmendere. Ένα ρηξιγενές πρανές που κλίνει προς Ν παρατηρήθηκε κοντά

στην άκρη της χερσονήσου Hersek, αλλά είναι μάλλον μέρος του επόμενου Α – Δ τμήματος του ρήγματος της βόρειας Ανατολίας προς τα Δ.



Εικόνα 2-7. Επιφανειακή διάρρηξη και καταστροφή κατασκευής στη ναυτική βάση του Gölcük.



Εικόνα 2-8. Το ρηξιγενές πρανές στο κανονικό ρήγμα του Gölcük. Η κατακόρυφη μετατόπιση στη θέση αυτή είναι 2,3 m, ενώ η δεξιόστροφη 1,3 m.



Εικόνα 2-9. Λεπτομέρεια του σπιτιού που διακρίνεται στο βάθος αριστερά στην Εικόνα 2-8. Είναι αξιοσημείωτο ότι παρά την μεγάλη κατακόρυφη μετατόπιση, ούτε το σπίτι, ούτε ο φράχτης υπέστησαν ζημιές.



Εικόνα 2-10. Γενική άποψη των θέσεων που αναφέρονται στην Εικόνα 2-8 και Εικόνα 2-9.

Ανατολικά της πόλης του Gölcük παρατηρήθηκε μία μεγάλη κανονική διάρρηξη μήκους τουλάχιστον 4 km με μικρή οριζόντια μετατόπιση παράταξης ΒΔ – ΝΑ (110°). Το μέγιστο κανονικό άλμα που παρατηρήθηκε έφτασε τα 2,3 m, ενώ η δεξιόστροφη συνιστώσα τα 1,3 m (Εικόνα 2-8).

Παρά το ότι στη θέση αυτή παρατηρείται η μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση, οι ζημιές στις κατασκευές ήταν ελάχιστες. Είναι χαρακτηριστικό ότι οι κατασκευές που διακρίνονται στην Εικόνα 2-8, παρά το ότι βρίσκονται σε πολύ μικρή απόσταση από το ρήγμα, δεν υπέστησαν σοβαρές ζημιές, και ήταν κατοικήσιμες αμέσως μετά το σεισμό (Εικόνα 2-9 και Εικόνα 2-10).

Στη συνέχεια της διάρρηξης προς τα Α, το ρήγμα διερχόταν σε μικρή απόσταση από το εργοστάσιο της Ford. Στη θέση αυτή, παρά το μεγάλο κατακόρυφο άλμα, η διάρρηξη δεν προκάλεσε μεγάλες ζημιές, ακόμα και σε κατασκευές του κατελθόντος τέμαχους (hangingwall) πολύ κοντά στο ρήγμα (Εικόνα 2-11).



Εικόνα 2-11. Το κανονικό ρήγμα στο Gölcük, κοντά στο εργοστάσιο της Ford. Εδώ παρατηρείται μία από τις μεγαλύτερες κατακόρυφες μετατοπίσεις. Είναι χαρακτηριστικό το ότι η τριώροφη οικοδομή της φωτογραφίας υπέστη ελάχιστες ζημιές, παρά το ότι βρίσκεται στο κατελθόν τέμαχος και πολύ κοντά στο ρήγμα.

Η ελεύθερη επιφάνεια του κανονικού ρήγματος είχε μέση μετατόπιση 1,5 m στην περιοχή του εργοστασίου της Ford (Εικόνα 2-12 και Εικόνα 2-13).

Η γεωμετρία του συστήματος των διαρρήξεων, το προϋπάρχον ευθύγραμμο πραινές με κλίση προς τα ΒΑ, καθώς επίσης και η γενική γεωμορφολογία της περιοχής, δείχνουν ότι η επιφανειακή διάρρηξη σε αυτή τη θέση συνδέεται με τεκτονικό ρήγμα, και όχι με δευτερογενή ολίσθηση, όπως είχε υποθεθεί από κάποιους ερευνητές αμέσως μετά το σεισμό. Πράγματι, όπως διαπιστώθηκε και από την επιτόπια παλαιοσεισμολογική έρευνα που περιγράφεται στο κεφ. 3.2, το ρήγμα αυτό δραστηριοποιήθηκε και σε τουλάχιστον άλλους τρεις παλαιότερους σεισμούς.



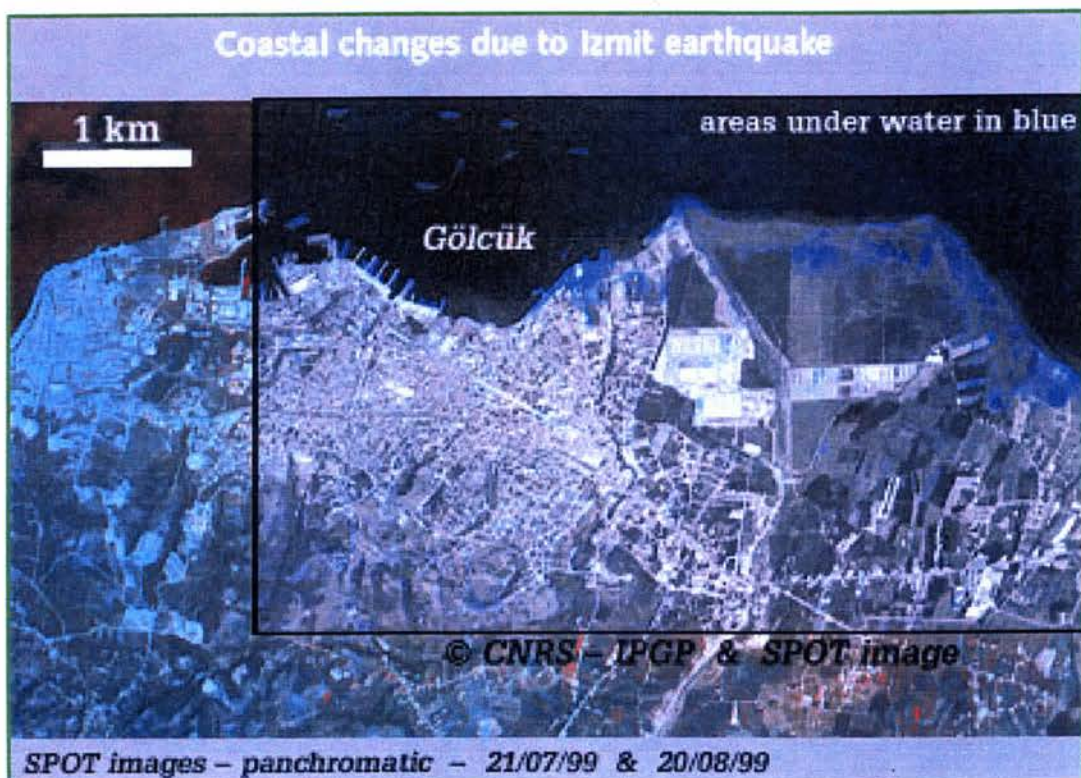
Εικόνα 2-12. Άποψη του ρήγματος στην περιοχή του Gölcük, πολύ κοντά στη θέση που φαίνεται στην Εικόνα 2-11. Ο πυλώνας μεταφοράς ηλεκτρικού ρεύματος παρέμεινε στη θέση του και εξακολούθησε να είναι λειτουργικός.



Εικόνα 2-13. Το ρηξιγενές πρανές παράλληλα στο φράχτη στη θέση του εργοστασίου της Ford ανατολικά του Gölcük.

Στο νότιο μέρος του κόλπου της Νικομήδειας δεν παρατηρήθηκε άλλη δεξιόστροφη μετατόπιση. Το κανονικό ρήγμα του Gölcük που αναφέρθηκε παραπάνω, προκάλεσε τοπική καταβύθιση της ακτής. Περίπου 4 km ακτογραμμής καταβυθίστηκαν έως 2 με

3 m (Εικόνα 2-14). Η περιοχή που καταβυθίστηκε συμπίπτει σε μεγάλο ποσοστό με το δέλτα του τοπικού ποταμού.



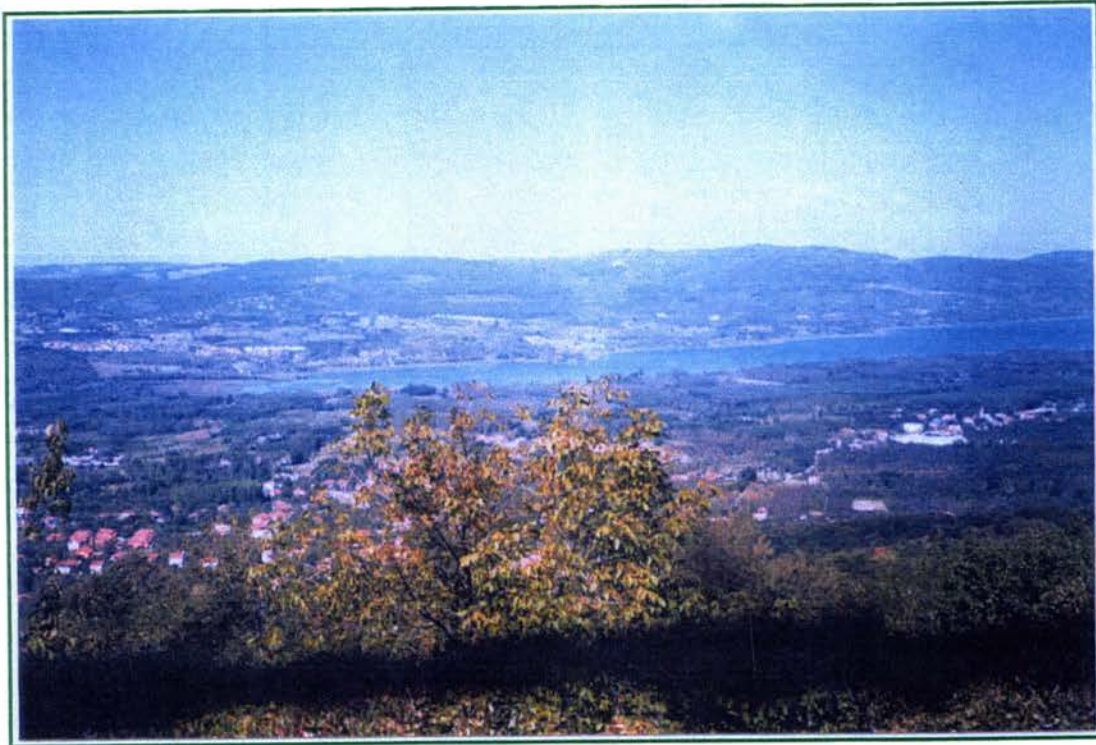
Εικόνα 2-14. Συνθετική πανχρωματική δορυφορική εικόνα SPOT της περιοχής του Gölcük πριν και μετά το σεισμό (ημερομηνίες λήψης 21/7 και 20/8/99), όπου φαίνονται με γαλάζιο χρώμα οι περιοχές που βυθίστηκαν κάτω από τη θάλασσα κατά τη διάρκεια του σεισμού.



Εικόνα 2-15. Εικόνα της επιφανειακής διάρρηξης στην περιοχή του Yailacik A. εικόνα αμέσως μετά το σεισμό, B. εικόνα το Σεπτέμβριο του 2001.

Η διάρρηξη συνεχιζόταν ανατολικά του κόλπου της Νικομήδειας χωρίς κατακόρυφη μετατόπιση (mole track), όπου προκάλεσε καταστροφές σε κτίρια (Εικόνα 2-15).

Στη συνέχεια η διάρρηξη μετατόπισε το Διευρωπαϊκό Αυτοκινητόδρομο (Trans European Motorway – TEM) κατά 3 m και έφτασε μέχρι τη ΒΔ άκρη της λίμνης Sapanca, η οποία βρίσκεται σε μία λεκάνη τύπου pull-apart. Η διάρρηξη πιθανόν να ακολούθησε τη βόρεια ακτογραμμή της λίμνης Sapanca μέχρι το Esmé, το οποίο υπέστη σημαντικές καταστροφές από ρευστοποίηση.



Εικόνα 2-16. Γενική άποψη της τεκτονικής pull-apart λεκάνης της λίμνης Sapanca. Όψη προς τα Β.

2.2.2 Τμήμα Λίμνη Sapanca – Akyazi

Ανατολικά της λίμνης Sapanca η διάρρηξη μετατοπίζεται (step-over) κατά περίπου 2 km προς Ν. Από τη λίμνη Sapanca μέχρι το Akyazi, η επιφανειακή διάρρηξη είχε μήκος περίπου 26 km (Εικόνα 2-17). Η διάρρηξη στο τμήμα αυτό αποτελείται από δύο κύριους κλάδους, οι οποίοι βρίσκονται σε διάταξη *en echelon* (Fumal et al., 1999).

Από τη λίμνη, η διάρρηξη συνεχίζεται σε παράταξη σχεδόν Α – Δ, και παραμορφώνει τον αυτοκινητόδρομο TEM και τις σιδηροδρομικές γραμμές σε αυτή τη θέση κατά περίπου 0,5 m. Η δεξιόστροφη μετατόπιση αυξήθηκε εντυπωσιακά στα επόμενα 1,5 km (έως 4,3 m), ενώ εδώ παρατηρήθηκε και η απολύτως μέγιστη δεξιόστροφη μετατόπιση που έφθασε τα $5,1 \pm 0,2$ m (USGS, 1999), ή κατ' άλλους τα 4,8 m (Εικόνα 2-18). Στην ίδια περιοχή παρατηρήθηκαν επίσης μεγάλες μετατοπίσεις, οι οποίες επιβεβαιώνουν ότι η μέγιστη μετατόπιση των περίπου 5 m δεν ήταν μεμονωμένο φαινόμενο (Εικόνα 2-19).



Εικόνα 2-17. Χάρτης της επιφανειακής διάρρηξης ανατολικά της λίμνης Sapanca, νότια του Adapazari, το οποίο υπέστη σημαντικές ζημιές από ρευστοποιήσεις (USGS, 1999). Στο χάρτη διακρίνεται η δεξιόστροφη μετατόπιση του Σαγγάριου (Sakarya), αποτέλεσμα της Ολοκαινικής κίνησης του ρήγματος της βόρειας Ανατολίας.

Προς τα ανατολικά, η μετατόπιση μειωνόταν ομοιόμορφα, και στον ποταμό Σαγγάριο (Sakarya) έφτασε τα $3,3 \pm 0,2$ m. Στο τμήμα αυτό παρατηρήθηκαν επικαλύψεις (step-over) στις διαρρήξεις. Ανατολικά του Σαγγάριου η δεξιόστροφη μετατόπιση μειώθηκε περίπου στα 2 m στο τμήμα που είναι παράλληλο με τη διάρρηξη του σεισμού του 1967 στην κοιλάδα Mudurnu. Η διάρρηξη του 1967 απέχει 7,5 km προς τα N, και η παρατηρηθείσα μετατόπιση του 1967 έφτασε τα 76 cm στην περιοχή αυτή (Ambraseys and Zatopec, 1969).

Η διάρρηξη στο τμήμα αυτό σταμάτησε στην περιοχή του Akyazi, και συνέχισε στο BA – ND (65°) παράταξης ρήγμα του Düzce μετά από μία διακοπή περίπου 6 km.



Εικόνα 2-18. Δεξιόστροφη μετατόπιση, η μέγιστη που παρατηρήθηκε σε όλη την έκταση της σεισμικής επιφανειακής διάρρηξης, σε μία φυτεία από λεύκες, στην περιοχή του Arifiye, νότια του Adapazari.



Εικόνα 2-19. Αποψη του ρήγματος στο Arifiye, με εντυπωσιακή δεξιόστροφη συνιστώσα, η οποία μετατοπίζει το οδόστρωμα.

2.2.3 Τμήμα Akvazi – Λίμνη Eften

Το τμήμα αυτό ακολουθεί το ρήγμα του Düzce (παράταξη ΒΑ – ΝΔ) μήκους περίπου 30 km σε μία επιμήκη κοιλάδα που οριοθετείται από την παρουσία υποβάθρου στο ΝΑ της μέρος. Παρά την αλλαγή στην παράταξη του ρήγματος, αυτό το τμήμα παρουσιάζει επίσης κυρίως δεξιόστροφη μετατόπιση

Η μετατόπιση κυμαινόταν από περίπου 0,5 m στο δυτικό άκρο του τμήματος αυτού μέχρι 1,5 m. Η επιφανειακή διάρρηξη σταματούσε στο νότιο περιθώριο της λίμνης Eften (Hartleb et al., 1999). Το τμήμα αυτό είναι επίσης παράλληλο με τη διάρρηξη του σεισμού του 1967.

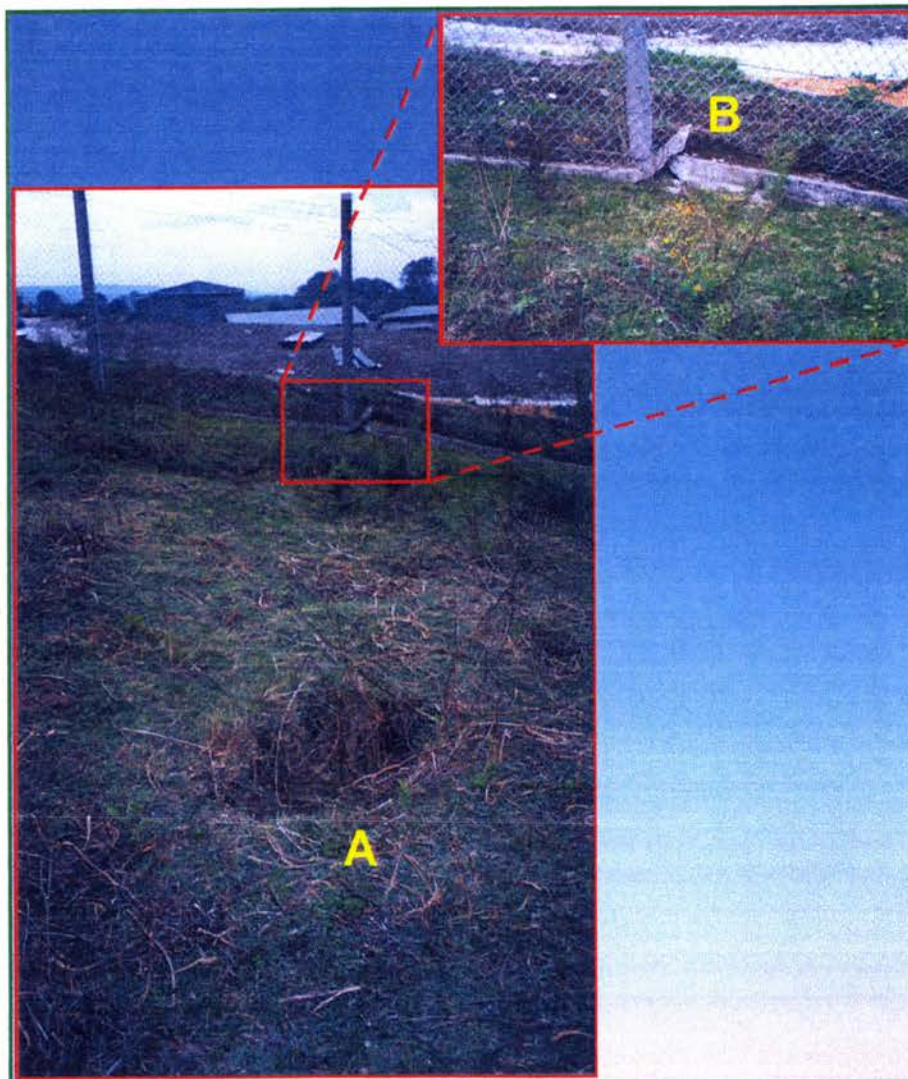
2.2.4 Τεκτονικές μικροδομές κατά μήκος της διάρρηξης

Κατά μήκος των διαρρήξεων που περιγράφηκαν στο κεφ. 2.2, οι οποίες αναπτύσσονται γραμμικά ακολουθώντας σε γενικές γραμμές το ίχνος του χαρτογραφημένου ρήγματος της Βόρειας Ανατολίας, παρατηρούνται μικροδομές που συνδέονται με τη σεισμική μετατόπιση. Οι δομές αυτές συχνά είναι αλληλένδετες, και παρατηρούνται στην ίδια ή σε γειτονικές θέσεις, ανάλογα με το τοπικό πεδίο των τάσεων και τις αλλαγές στη γεωμετρία. Σύμφωνα με τις παρατηρήσεις των Tutkun et al. (2001) και Tutkun and Pavlides (2001), αυτές οι δομές μπορούν σε γενικές γραμμές να ταξινομηθούν στις ακόλουθες κατηγορίες:

- Κανονική μετατόπιση: παρατηρείται στις περισσότερες θέσεις κατά μήκος των επιφανειακών διαρρήξεων, με απόλυτο μέγιστο τα 2,3 m που παρατηρήθηκαν ΑΝΑ του Gölcük. Συνδέεται με τη δημιουργία επιμηκών τάφρων, ρηξιγενών πρανών, *en echelon* επιφανειακών διαρρήξεων, αρνητικών ανθοδομών (negative flower structures), κλπ.

- Ανάστροφη μετατόπιση: παρατηρήθηκε σε πολλές θέσεις, και συνδέεται με τη δημιουργία μικρών συνοδευτικών δομών, όπως μικροεπωθήσεις, θετικές ανθοδομές (positive flower structures), εδαφικές ανυψώσεις (pop-ups), κλπ.
- Οριζόντια μετατόπιση: απαντάται σε ολόκληρο το μήκος του ρήγματος. Στις περισσότερες περιπτώσεις παρατηρήθηκε πλάγια μετατόπιση (οριζόντια μετατόπιση με κανονική ή ανάστροφη συνιστώσα), αλλά σε πολλές θέσεις η μετατόπιση ήταν καθαρά οριζόντιας μετατόπισης, με μέγιστο παρατηρηθέν άλμα της τάξης των 4,8 m.

Όπως αναφέρθηκε, πολλές φορές παρατηρούνται δομές φαινομενικά ασύμβατης φύσης στην ίδια θέση. Ένα παράδειγμα που μελετήθηκε στα πλαίσια του παρόντος έργου φαίνεται στην Εικόνα 2-20. Πρόκειται για μία σειρά επιφανειακών διαρρήξεων στο Terpetarla κοντά στην περίφραξη μίας στρατιωτικής βάσης του NATO, όπου παρατηρούνται σε συνέχεια δομές κανονικού και ανάστροφου χαρακτήρα.



Εικόνα 2-20. Επιφανειακή διάρρηξη στο Terpetarla. Είναι χαρακτηριστικό ότι σε αυτή τη θέση παρατηρούνται τόσο μεταπτωτικές (κανονικές διαρρήξεις και μικροτάφρος στο σημείο A), όσο και ανάστροφες (μικροεπίπτευση στο σημείο B στην ένθετη φωτογραφία) δομές. Στη θέση αυτή δεν υπάρχει δεξιόστροφη μετατόπιση.

3 Παλαιοσεισμολογική έρευνα στην περιοχή μελέτης

Όπως προαναφέρθηκε, στα πλαίσια του παρόντος ερευνητικού έργου διερευνήθηκαν με παλαιοσεισμολογικές μεθόδους¹ ορισμένες επιλεγμένες θέσεις κατά μήκος των σεισμικών επιφανειακών διαρρήξεων. Η επιλογή των θέσεων αυτών, λαμβάνοντας υπόψη και τους ειδικούς στόχους του έργου, έγινε με τη χρήση των ακόλουθων κριτηρίων:

1. Ύπαρξη στοιχείων υπαίθρου από την επιφανειακή γεωλογία – τεκτονική που να υποδηλώνουν ότι στη συγκεκριμένη θέση είναι πιθανό να εντοπιστούν, σε τομή, δομές υποβοηθητικές για την ερμηνεία της παλαιοσεισμολογικής συμπεριφοράς του ρήγματος. Τα στοιχεία αυτά προκύπτουν από χαρτογράφηση και μέτρηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των διαρρήξεων, όπως αυτές εμφανίζονται στην επιφάνεια, καθώς επίσης και από παρατήρηση των επιφανειακών γεωλογικών σχηματισμών.
2. Σύνδεση της σεισμικής διάρρηξης με κατάρρευση ή ζημία σε υπερκείμενη ή παρακείμενη κατασκευή, με στόχο τη διερεύνηση του ρόλου της γεωμετρίας του ρήγματος και της μικροστρωματογραφίας στη μηχανική συμπεριφορά του κτιρίου.

Στις επόμενες παραγράφους περιγράφονται με λεπτομέρεια οι τομές που κατασκευάστηκαν σε διάφορες θέσεις κατά μήκος του σεισμικού ρήγματος. Συνολικά κατασκευάστηκαν και μελετήθηκαν 5 τομές στις θέσεις Aşağı Yuvacik (2), Deniz Evler (1), Acisu (1) και Kullar-Yaylacik (1).

3.1 Θέση Aşağı Yuvacik (AY)

Η θέση αυτή βρίσκεται νότια της πόλης του Izmit, 1,3 km δυτικότερα από τη θέση Mahmutpaşazıftlı, όπου κατασκευάστηκαν παλαιοσεισμολογικές τομές (*Tutkun and Pavlides, 2001, Tutkun et al., 2001*) για τη μελέτη πιθανών παλαιότερων σεισμικών μετατοπίσεων.

Εδώ οι σεισμικές διαρρήξεις εμφανίζονται σε δύο παράλληλες γραμμές παράταξης A – Δ, οι οποίες απέχουν περί τα 40 m μεταξύ τους. Η μετατόπιση που παρατηρείται στην επιφάνεια είναι κανονική, ενώ το μέτρο της φτάνει τοπικά το 1,4 m προς Β (Εικόνα 3-1). Η οριζόντια μετατόπιση ήταν ελάχιστη στην επιφάνεια.

Όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα, οι επιφανειακές διαρρήξεις προκάλεσαν την κατάρρευση διώροφης κατασκευής από την οποία την περίοδο της παρούσας έρευνας παρέμεναν υπολειμματικά μόνο τα θεμέλια. Η διάρρηξη αυτή στη συνέχεια της προκάλεσε ζημιές σε ένα χαμηλό λιθόκτιστο τοίχιο, το οποίο παρουσιάζει μετατόπιση του επάνω μέρους του κατά περίπου 35 cm (Εικόνα 3-2).

¹ Η παλαιοσεισμολογία ερευνά την πρόσφατη σεισμική ιστορία συγκεκριμένων ρηγμάτων, με στόχο την εξαγωγή ποιοτικών και ποσοτικών χαρακτηριστικών, χρησιμοποιώντας ειδικές τεχνικές καταγραφής και χρονολόγησης επιλεγμένων εδαφικών δειγμάτων. Γενικά, η σειρά των εργασιών που απαιτούνται για τη διεξαγωγή μίας ολοκληρωμένης παλαιοσεισμολογικής έρευνας, και οι οποίες ακολουθήθηκαν σε όλες τις τομές που αναφέρονται στην παρούσα έκθεση, είναι: α) επιλογή της θέσης, β) κατασκευή της τομής, γ) καθαρισμός των τοιχωμάτων, δ) κατασκευή καννάβου 1x1 m, ε) λεπτομερής καταγραφή (logging) της στρωματογραφίας και της ρηγιγενούς γεωμετρίας σε κλίμακα 1:20, στ) δειγματοληψία από επιλεγμένα στρώματα, ζ) χρονολόγηση των δειγμάτων με κατάλληλη μέθοδο και η) ερμηνεία. Για κάθε ένα από τα παραπάνω στάδια ακολουθείται μία ειδική μεθοδολογία, η οποία αναπτύχθηκε σε μεγάλο βαθμό από τα μέλη της ερευνητικής ομάδας του Α.Π.Θ. κατά τη διάρκεια προηγούμενων αντίστοιχων ερευνών. Τα βασικά της στάδια περιγράφονται αναλυτικά από τον Χατζηπέτρο (1998).



Εικόνα 3-1. Άποψη προς τα Δ του ρηξιγενούς πρानούς στη θέση Ασαḡi Yuvacik. Στη θέση όπου βρίσκεται το τσιμεντένιο δάπεδο, προϋπήρχε διώροφη κατοικία, η οποία κατέρρευσε κατά τη διάρκεια του σεισμού. 20 m δυτικότερα από τη θέση αυτή, και στη συνέχεια του σεισμικού ρήγματος, κατασκευάστηκε η τομή ΑΥ-1.



Εικόνα 3-2. Άποψη προς τα Α της συνέχειας της νότιας ρηξιγενούς γραμμής στη θέση Ασαḡi Yuvacik. Διακρίνεται η παραμόρφωση του χαμηλού λιθόκτιστου τοίχου. Το πράσινο παραπέτασμα επάνω από τον τοίχο είναι το ίδιο που διακρίνεται στο βάθος και στην Εικόνα 3-1.

Με βάση τα κριτήρια επιλογής που αναφέρθηκαν παραπάνω στη σελίδα 20, επελέγη μία θέση 20 m δυτικότερα αυτής για την κατασκευή μίας τομής. Η τομή αυτή (ΑΥ-1) κατασκευάστηκε σε διεύθυνση Β-Ν (κάθετα στις σεισμικές διαρρήξεις). Το μήκος της ήταν 12 m, και το βάθος της έφτασε τα 3 m (Εικόνα 3-3). Στο κεντρικό της τμήμα παρατηρήθηκε η σεισμική ρηξιγενής ζώνη, η οποία μεταπίπτει προς Β και είναι σχεδόν

κατακόρυφη (Εικόνα 3-4). Στο κατώτερο τμήμα της τομής παρατηρήθηκε και μία δεύτερη διάρρηξη, η οποία όμως δε φτάνει μέχρι την επιφάνεια.



Εικόνα 3-3. Γενική άποψη προς Β της τομής ΑΥ-1, στο σημείο όπου διερχόταν η σεισμική διάρρηξη του 1999. Διακρίνεται ο υψηλός υδροφόρος ορίζοντας.



Εικόνα 3-4. Λεπτομέρεια της σεισμικής ρηξιγενούς ζώνης, όπως αυτή φαίνεται στην τομή ΑΥ-1.

Καταγράφηκε με λεπτομέρεια το δυτικό τοίχωμα της τομής, η στρωματογραφία της οποίας ήταν (από τα ανώτερα προς τα κατώτερα):



Εικόνα 3-5. Λεπτομέρεια του καννάβου και της στρωματογραφίας του δυτικού τοιχώματος της τομής ΑΥ-1, όπου διακρίνεται η ελαφρά στρώση προς τα Ν της αδρόκοκκης άμμου (στρώμα 4), καθώς και η δομή των στρωμάτων 5 και 6.

1. Τεχνητές επιχώσεις, με πολλές άστρωτες κροκάλες, με άφθονα σύγχρονα ανθρωπογενή υλικά.
2. Λεπτόκοκκη άμμος με μικρές κροκάλες, φαιοκάστανου χρώματος.
3. Υλικό όμοιο με το 1, χωρίς ανθρωπογενή υλικά.
4. Αδρόκοκκη άμμος με μικρές κροκάλες και ελαφρά στρώση προς τα Ν (Εικόνα 3-5).
5. Ιλυώδης άμμος με διάσπαρτες κροκάλες.
6. Υλικό όμοιο με το 4, αλλά πιο σκούρο.
7. Αργιλοίλυσ με άφθονο οργανικό υλικό.

Η ερμηνεία της τομής δείχνει ότι στη συγκεκριμένη περίπτωση δεν είναι δυνατόν να εντοπιστούν με βεβαιότητα παλαιότεροι σεισμοί. Μία πιθανή ένδειξη για ένα προηγούμενο σεισμό είναι η μη σύμφωνη στρωματογραφία εκατέρωθεν της ρηξιγενούς ζώνης για τα στρώματα 1-4, σε αντίθεση με τα 5-7. Επειδή όμως η δομή αυτή είναι δυνατόν να προέλθει από διάφορες γεωλογικές/γεωμορφολογικές διεργασίες, η ταυτοποίηση κάποιου παλαιοσεισμού δεν είναι δυνατή.

Στην ίδια θέση κατασκευάστηκε και μία δεύτερη τομή (ΑΥ-2) στο βορειότερο κλάδο της διάρρηξης, η οποία εδώ κλίνει προς Ν (Εικόνα 3-6). Το κύριο μέρος της τομής αυτής είχε παράταξη Β – Ν, ενώ στα δύο άκρα της κατασκευάστηκαν δύο μικρότερες

συνεχόμενες τομές, που ενώνονταν με την κύρια, παράταξη Α – Δ, με στόχο την ανίχνευση πιθανής οριζόντιας μετατόπισης (Εικόνα 3-7).



Εικόνα 3-6. Διάνοιξη της τομής ΑΥ-2, 40 m βόρεια της ΑΥ-1, στο σημείο όπου διερχόταν ένας παράλληλος κλάδος της σεισμικής διάρρηξης. Τα κτίρια που διακρίνονται στη φωτογραφία υπέστησαν πολύ περιορισμένες ζημιές.



Εικόνα 3-7. Γενική άποψη του κύριου κλάδου της τομής ΑΥ-2, όπου διακρίνονται οι ιλυώδεις αποθέσεις και ο υψηλός υδροφόρος ορίζοντας. Όψη προς Β.



Εικόνα 3-8. Λεπτομέρεια του ανατολικού τοιχώματος της τομής ΑΥ-2, όπου διακρίνεται η μετατόπιση του οργανικού ιλυώδους ορίζοντα κατά περίπου 1 m προς Ν.

Στην τομή αυτή το υλικό που συναντήθηκε ήταν κυρίως ιλυώδες – αργιλικό, με άφθονο οργανικό υλικό. Η στρωματογραφία αυτή οφείλεται στην ύπαρξη ενός τενάγους (Εικόνα 3-6, προσκήνιο), το οποίο προκαλεί την απόθεση λεπτόκοκκων υλικών και την ανάπτυξη οργανικής μάζας.

Η ρηξιγενής ζώνη προκαλεί μετάπτωση του κατελθόντος τεμάχους κατά περίπου 1 m προς τα Ν (Εικόνα 3-8), η οποία ταυτίζεται με την επιφανειακή μετατόπιση στη θέση αυτή. Στην τομή ΑΥ-2 δεν έγινε η αποτύπωση των τοιχωμάτων της, αφενός μεν γιατί δεν υπήρχε παλαιότερη μετατόπιση, αφετέρου δε γιατί ο υδροφόρος ορίζοντας ήταν πολύ υψηλός, με αποτέλεσμα την πλήρωση μεγάλου μέρους της σε μικρό χρονικό διάστημα και την καταστροφή των τοιχωμάτων της.

3.2 Θέση Dëviz Evler (DE)

Στη θέση όπου εμφανίστηκε το κανονικό ρήγμα ανατολικά του Gölçük (κεφ. 2.2.1) επελέγη η θέση κατασκευής μίας ακόμη τομής στην περιοχή Dëviz Evler. Στη θέση αυτή η κανονική μετατόπιση ήταν της τάξης του 1,5 m προς τα ΒΑ (Εικόνα 3-9).



Εικόνα 3-9. Λεπτομέρεια της ρηξιγενούς ζώνης με άλμα 1,5 m του ρήγματος του Gölçük στη θέση της τομής DE-1. Όψη προς τα ΝΑ.

Λόγω του άλματος αυτού, το οποίο στη θέση ήταν σχεδόν εντελώς κανονικό, επηρεάστηκαν τα υπερκείμενα δένδρα (λεύκες), πολλά από τα οποία απέκτησαν κλίση, χωρίς όμως να νεκρωθούν (Εικόνα 3-10).

Στο τμήμα αυτό του ρήγματος, επελέγη μία συγκεκριμένη θέση με βάση κυρίως το πρώτο από τα κριτήρια που αναφέρθηκαν στη σελίδα 20, και αυτό γιατί κατά μήκος της διάρρηξης δεν υπήρχαν θέσεις οι οποίες να ικανοποιούν και τα δύο κριτήρια σε ικανοποιητικό βαθμό.

Στη θέση που επελέγη κατασκευάστηκε η τομή DE-1 κάθετα στην παράταξη του ρήγματος (Εικόνα 3-11), το οποίο στη θέση αυτή είχε παράταξη 120°. Οι διαστάσεις της τομής ήταν 18 x 6 x 4 m (Μ x Π x Υ), ενώ οι γεωγραφικές συντεταγμένες, από μετρήσεις GPS, είναι Β 40°42'38.1", Α 029°51'24.0".

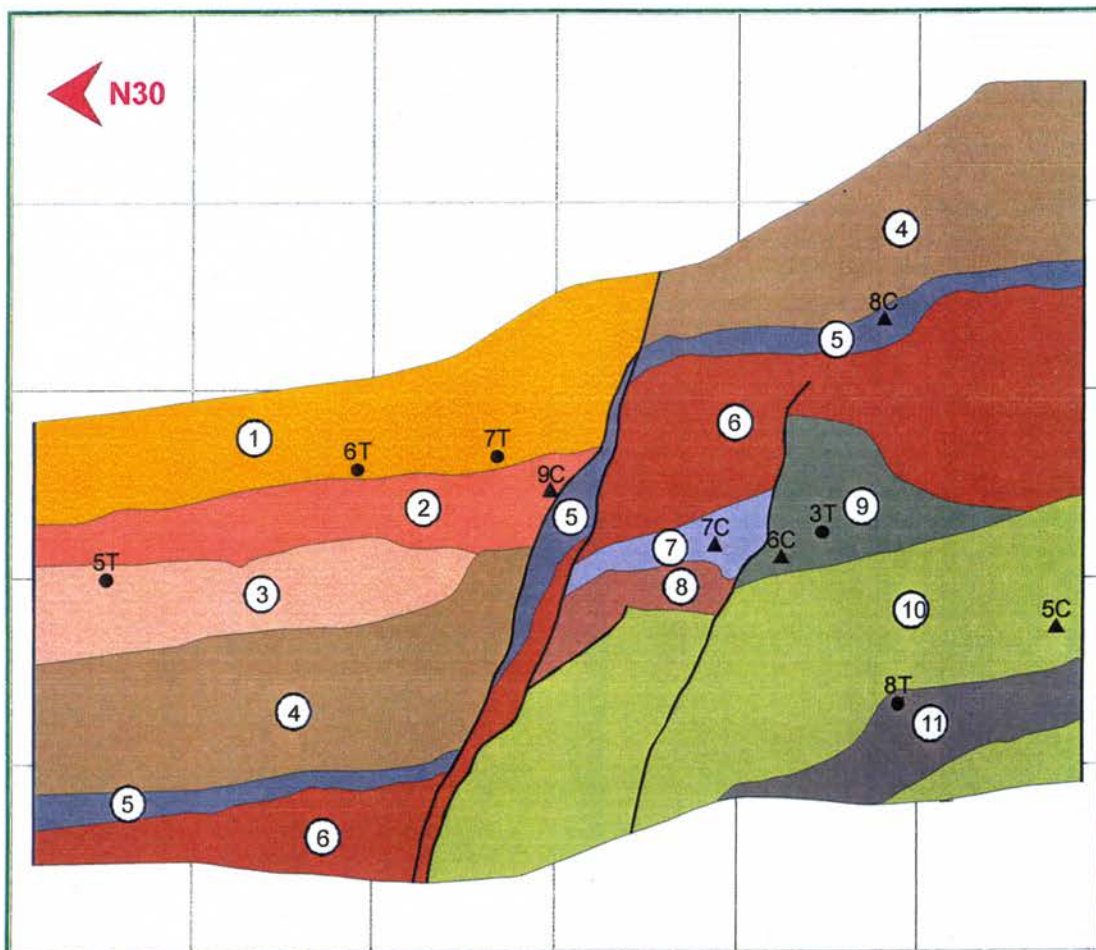


Εικόνα 3-10. Κεκλιμένα δένδρα (λεύκες) στην περιοχή της τομής DE-1. Η κλίση των δένδρων έγινε λόγω της επιφανειακής διάρρηξης σε αυτή τη θέση.



Εικόνα 3-11. Φάση κατασκευής της τομής DE-1.

Μετά την κατασκευή της τομής, ακολουθήθηκε η μεθοδολογία που αναφέρεται στην υποσημείωση 1 (σελ. 20). Η λεπτομερής καταγραφή και των δύο τοιχωμάτων της τομής, έδειξε ότι η στρωματογραφία αποτελείται από τα ακόλουθα στρώματα (Εικόνα 3-12):



Εικόνα 3-12. Καταγραφή τμήματος του ανατολικού τοιχώματος της τομής DE-1. Η αρίθμηση των στρωμάτων ακολουθεί την περιγραφή του κειμένου. Σημειώνονται επίσης οι θέσεις δειγματοληψίας για χρονολόγηση με ^{14}C (τρίγωνα) και θερμοφωταύγεια (κύκλοι).

1. Σύγχρονο εδαφικό λεπτόκοκκο υλικό με αραιές κροκάλες, ερυθροκάστανου χρώματος.
2. Αλλούβιο με ποικιλόχρωμες κροκάλες του υποβάθρου μικρού και μεσαίου μεγέθους (10-12 cm).
3. Αδρόκοκκη άμμος με ασθενή στρώση προς τα Β. Πολύ αραιές κροκάλες μικρού μεγέθους (έως 2 cm).
4. Υλικό όμοιο με το 2, με μεγαλύτερη συμμετοχή αδρόκοκκης άμμου. Το κατώτερο μέρος του στρώματος εμφανίζεται ελαφρά οξειδωμένο (ερυθροκάστανη απόχρωση).
5. Κροκάλες με οξείδια μαγγανίου (μαύρου χρώματος). Οι κροκάλες γενικώς εμφανίζονται διατεταγμένες παράλληλα / υποπαράλληλα με τη στρώση.

6. Κροκαλοπαγές με κροκάλες ποικίλου μεγέθους (max 15 cm), γενικώς ερυθροκάστανου χρώματος, αλλά διαφέρει κατά θέσεις.
7. Κολλούβιο τεφρού χρώματος με κροκάλες μεγέθους έως 12 cm και πολλές μικρότερες μεγέθους 2-5 cm, χωρίς καμία στρώση.
8. Κροκαλοπαγές ερυθροκάστανου χρώματος (μέγεθος κροκαλών έως 15 cm).
9. Καστανοπράσινη λεπτόκοκκη άμμος με ελάχιστες μικρού μεγέθους κροκάλες, κυρίως στη νότια άκρη του στρώματος.
10. Ελαιοπράσινη άργιλλος με ενστρώσεις και φακούς λεπτόκοκκης άμμου.
11. Αδρόκοκκη άμμος πράσινου χρώματος.

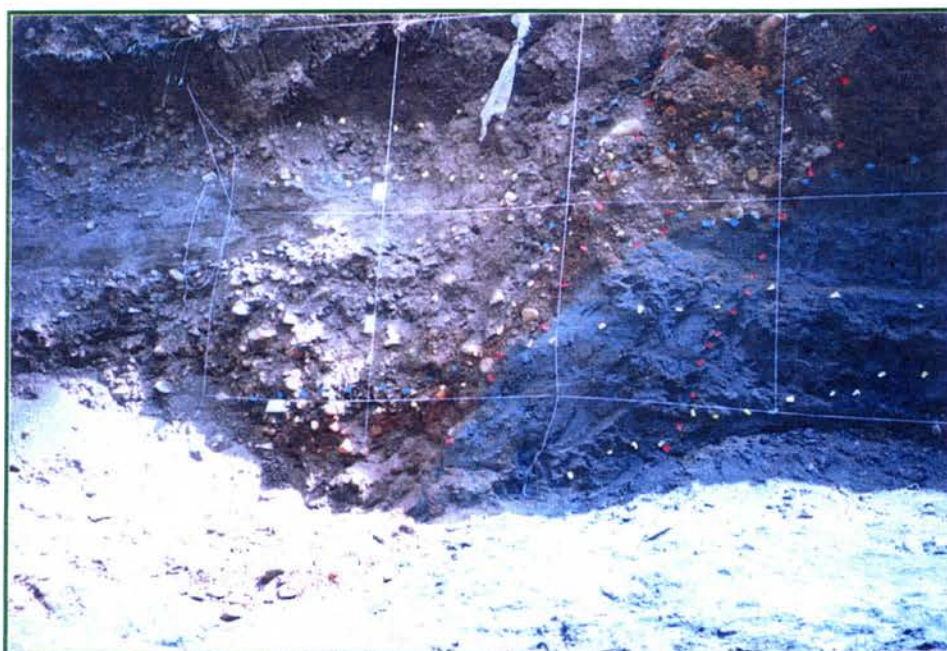
Η Εικόνα 3-13 δείχνει τη γενική άποψη του ανατολικού τοιχώματος της τομής DE-1, όπου διακρίνεται η στρωματογραφία που περιγράφηκε παραπάνω.



Εικόνα 3-13. Γενική άποψη του ανατολικού τοιχώματος της τομής DE-1. Διακρίνεται η στρωματογραφία τόσο στο ανελθόν (footwall) όσο και στο κατελθόν (hangingwall) τέμαχος.

Οι ρηξιγενείς δομές στην τομή αυτή αποτελούνται από δύο ρήγματα, το βορειότερο εκ των οποίων αποτελείται από 2 κλάδους και είναι αυτό το οποίο έφτασε μέχρι την επιφάνεια και δραστηριοποιήθηκε κατά το σεισμό του Αυγούστου του 1999, ενώ το δεύτερο σταματά στο στρώμα 6, και φαίνεται ότι συνδέεται με παλιότερες δραστηριοποιήσεις της ζώνης. Η βασική ρηξιγενής ζώνη φαίνεται στην Εικόνα 3-14 για το ανατολικό τοίχωμα, και στην Εικόνα 3-15 για το δυτικό.

Η μελέτη της μικροστρωματογραφίας και της τεκτονικής δομής που παρατηρήθηκαν και στα δύο τοιχώματα της τομής, δείχνουν ότι το ρήγμα αυτό δραστηριοποιήθηκε τουλάχιστον άλλες τρεις φορές πριν από το σεισμό του 1999.



Εικόνα 3-14. Λεπτομέρεια της ρηξιγενούς ζώνης στο ανατολικό τοίχωμα της τομής DE-1. Διακρίνεται ο κάνναβος αναφοράς και η σήμανση των σημαντικών στοιχείων της τομής (κόκκινα σημεία: ρήγματα και διακλάσεις, λευκά σημεία: όρια στρωμάτων).



Εικόνα 3-15. Η ρηξιγενής ζώνη, όπως αυτή διακρίνεται στο δυτικό τοίχωμα της τομής DE-1.

3.3 Θέση Acisu (AC)

Η επόμενη θέση στην οποία κατασκευάστηκε παλαιοσεισμολογική τομή για τη μελέτη της παλαιότερης σεισμικής ιστορίας της επιφανειακής διάρρηξης του 1999, βρισκόταν στο Acisu. Η επιφανειακή διάρρηξη στη θέση αυτή είχε σχεδόν αποκλειστικά χαρακτηριστή οριζόντιας μετατόπισης, με μικρή κανονική συνιστώσα (Εικόνα 3-16).



Εικόνα 3-16. Η επιφανειακή διάρρηξη του σεισμού Α της θέσης της τομής AC-1. Όψη προς τα Δ.

Η θέση που επελέγη για την κατασκευή της τομής βρισκόταν σε μία επιμήκη εποχική λίμνη (sag pond), η οποία αναπτύσσεται επάνω στο ίχνος του ρήγματος (Εικόνα 3-17), στη συνέχεια της οποίας η διάρρηξη προκάλεσε σημαντικές καταστροφές σε ένα τζαμί. Τέτοιου είδους γεωμορφολογικές δομές είναι αρκετά συχνές κατά μήκος ρηγμάτων οριζόντιας μετατόπισης. Το χαρακτηριστικό σε αυτή την περίπτωση είναι ότι η λίμνη αυτή βρίσκεται σε μία αναστροφή της μορφολογίας, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3-17.



Εικόνα 3-17. Γενική άποψη της εποχικής λίμνης (sag pond) στη θέση της τομής AC-1. Όψη προς τα Ν – ΝΔ.

Μετά την κατασκευή της τομής AC-1 (Εικόνα 3-18) στο κέντρο περίπου της εποχικής λίμνης και εκτός ζώνης σεισμικών διαρρήξεων, διαπιστώθηκε ότι το υλικό της ήταν αργιλικό, με πλούσια οργανικά υπολείμματα.



Εικόνα 3-18. Φάση εκσκαφής της τομής AC-1, παράταξης Β – Ν. Όψη προς Β.

Μετά την καταγραφή του δυτικού τοιχώματος της τομής, φάνηκε ότι στην ίδια θέση προϋπήρξαν παλαιότερες εποχικές λίμνες, οι οποίες είχαν παρόμοια δομή με τη σημερινή. Στα ανώτερα 1,2 m της τομής διαπιστώθηκε ότι υπάρχουν άφθονα κεραμικά θραύσματα, τα οποία υποδηλώνουν την ανθρώπινη παρουσία κατά τη διάρκεια των τελευταίων φάσεων δημιουργίας της λίμνης (Εικόνα 3-19).

Η ύπαρξη διαδοχικών παλαιολιμνών είναι ένδειξη παλαιοσεισμών στη θέση αυτή, γιατί η δραστηριοποίηση του ρήγματος προκαλεί αλλαγή στην επιφανειακή μορφολογία, η οποία με τη σειρά της προκαλεί απόθεση νέου υλικού επάνω από το προϋπάρχον. Επειδή όμως δε συνδέεται άμεσα με μία συγκεκριμένη ρηξιγενή επιφάνεια, δεν μπορούν να βγουν ασφαλή συμπεράσματα σχετικά με τον ακριβή χρονολογικό προσδιορισμό πιθανών παλαιοσεισμών.



Εικόνα 3-19. Λεπτομέρεια του δυτικού τοιχώματος της τομής AC-1. Διακρίνεται το αργιλικό υλικό πλήρωσης, καθώς επίσης και κεραμικά θραύσματα που υποδηλώνουν τη σχετικά μικρή ηλικία του συγκεκριμένου στρώματος (δημιουργία σε ιστορικούς χρόνους).

3.4 Θέση Kullar-Yaylacik (KY)

Η θέση αυτή βρίσκεται στην περιοχή Yaylacik, 1 περίπου km δυτικά του οικισμού Kullar, όπου η επιφανειακή διάρρηξη προκάλεσε την κατάρρευση ενός συγκροτήματος πολυώροφων οικοδομών.



Εικόνα 3-20. Στη θέση κατασκευής της τομής KY-1 η διάρρηξη είχε οριζόντια δεξιόστροφη μετατόπιση της τάξης των 3 περίπου m, όπως φαίνεται και από τη μετατόπιση του τοιχείου. Όψη προς Ν.

Στη θέση αυτή παρατηρείται δεξιόστροφη μετατόπιση της τάξης των 3 m (Εικόνα 3-20), ενώ η κατακόρυφη συνιστώσα της κίνησης είναι αμελητέα. Η τομή KY-1 είχε διεύθυνση Β-Ν και κατασκευάστηκε κάθετα στις επιφανειακές διαρρήξεις.



Εικόνα 3-21. Φάση κατασκευής της τομής KY-1. Όψη προς Β. Στη θέση της διάρρηξης και ανατολικά του τοιχίου, υπήρχαν πολυώροφες οικοδομές οι οποίες κατέρρευσαν κατά τη διάρκεια του σεισμού.



Εικόνα 3-22. Λεπτομέρεια της βόρειας ζώνης του ρήγματος στην τομή KY-1.

Μετά την κατασκευή της τομής, διαπιστώθηκε ότι η ζώνη των επιφανειακών διαρρήξεων αποτελείται από δύο διακριτές ρηξιγενείς επιφάνειες, οι οποίες παρουσίαζαν

δεξιόστροφη κίνηση. Ενδιάμεσα των δύο επιφανειών παρατηρήθηκε μία ζώνη διάτμησης (shear zone), με πολλές μικρές επιφάνειες διακλάσεων και ολισθήσεων. Το υλικό που παρατηρήθηκε στην τομή αυτή είναι ιδιαίτερα διαταραγμένο, και αποτελείται από «μίγμα» (mélange) αργίλων και άμμων με διάσπαρτες κροκάλες με χαοτική δομή.



Εικόνα 3-23. Λεπτομέρεια της βόρειας ρηξιγενούς ζώνης στην τομή KY-1, όπου διακρίνεται πιθανή ρευστοποίηση στο άνω αριστερό μέρος της φωτογραφίας.



Εικόνα 3-24. Λεπτομέρεια της πιθανής δομής ρευστοποίησης που διακρίνεται στην Εικόνα 3-23.

Στη βορειότερη ρηξιγενή ζώνη παρατηρήθηκε μία δομή η οποία ερμηνεύθηκε ως πιθανή παλαιορευστοποίηση (Εικόνα 3-23). Η εσωτερική διάταξη στη δομή αυτή ενισχύει την παραπάνω άποψη, καθώς οι κόκκοι της άμμου είναι προσανατολισμένοι και δίνουν την εντύπωση «ροής» (Εικόνα 3-24).

Τέλος, η νότια ρηξιγενής ζώνη παρουσιάζεται ως μία επιφάνεια καθαρά οριζόντιας μετατόπισης. Οι γραμμώσεις ολίσθησης του τελευταίου σεισμού διατηρούνται πολύ καλά στο αργιλικό υλικό που παραμορφώνεται (Εικόνα 3-25).



Εικόνα 3-25. Λεπτομέρεια της νότιας ρηξιγενούς ζώνης. Διακρίνονται οι γραμμώσεις ολίσθησης, οι οποίες δείχνουν σχεδόν καθαρή οριζόντια δεξιόστροφη μετατόπιση.

4 Βιβλιογραφία

- Ambraseys N.N. (1970). Some characteristic features of the Anatolian fault zone, *Tectonophysics*, 9, 143–165.
- Ambraseys N.N., and Finkel C.F. (1995) The seismicity of Turkey and adjacent areas, A historical review, 1500–1800, *Istanbul, Muhittin Salih Eren*, 240 p.
- Ambraseys N.N., and Zatopec A. (1969). The Mudurnu Valley, West Anatolia, Turkey, Earthquake of 22 July 1967, *Seismological Society of America Bulletin*, 59, 521–589.
- Armijo R., B. Meyer, A. Hubert, and A. Barka (1999). Westwards propagation of the North Anatolian Fault into the Northern Aegean: Timing and kinematics, *Geology*, 27, 3, 267–270, 1999.
- Awata Y., Yoshioka T., Emre O., Duman T., Dogan A. and Tsukuda E. (2000). Segment structures of the surface ruptures associated with the August 17, 1999 Izmit earthquake, Turkey, *XXVII ESC General Assembly, Lisbon, Portugal, 10-15 September 2000*, Abstract and Papers volume.
- Barka A. (1992). The North Anatolian fault zone, *Annales Tectonicae*, v. 6, p. 164–195.
- Barka A. (1996). Neotectonics of the Marmara region – Selected papers on the North Anatolian fault, field trip to the North Anatolian fault, August 1–15, 1997, *Istanbul, Istanbul Technical University & Eurasia Earth Science Institute*, 56 p.
- Barka A. (1999). The 17 August 1999 Izmit earthquake, *Science*, 285, 1858–1859.
- Barka A. (2000). The August 17 and November 12, 1999 earthquakes in the eastern Marmara sea region, *Active fault research for the new millenium, Hokudan, Japan, 17-26 January 2000*, Proceedings, S1-S6.
- Barka A., Akyuz S., Altunel E., Sunal G., Cakir Z., Dikbas A., Yerli B., Rockwell T., Dolan J., Dawson T., Hartleb R., Tucker A., Fumal T., Langridge R., Stenner H., Christofferson S., Armijo R., Meyer B., and Chaballier J. (1999). 17 August 1999 Izmit Earthquake, Northwestern Turkey [abs.], *Eos*.
- EERI (1999). Special Earthquake Report, *Earthquake Engineering Research Institute*, October 1999.
- Fumal T.E., Langridge R.M., Stenner H.D., Christofferson S., Dolan J.F., Hartleb R., Tucker A.Z., Rockwell T., Dawson T., Çakir Z., Dikbas A., Yerli B., and Barka A. (1999). Slip distribution and geometry of the Sakarya section of the 1999 Izmit earthquake ground rupture, Western Turkey [abs.], *Eos*.
- Hartleb R., Dawson T., Tucker A., Dolan J. T., Rockwell J., Yerli B., Dikbas A., Çakir Z., Gurer T., Uslu O., and Barka A. (1999) Surface rupture and slip distribution along the Düzce strand of the 17-August-1999 Izmit, Turkey earthquake [abs.], *Eos*.
- Hubert, A. (1998). La faille Nord-Anatolienne (cinématique, morphologie, localisation, vitesse et décalage total) et modélisations utilisant la contrainte de Coulomb sur différentes échelles de temps, *Doctorat de l' Université Paris VII*, 222 pp.
- Ikeda, Y., Suzuki, Y., Herece, E., Saroglu, F., Isikara, A.M., and Honkura, Y. (1991). Geological evidence for the last two faulting events on the North Anatolian fault zone in the Mudurnu Valley, western Turkey, *Tectonophysics*, 193, 335–345.
- Nalbant S.S., A. Hubert and G.C.P. King (1998). Stress coupling between earthquakes in northwest Turkey and the north Aegean Sea, *Jour. Geophys. Res.*, 103, 24469–24486.
- Okumura K., Yoshioka T. and Kusu I. (1993). Surface faulting on the North Anatolian Fault in these two millennia. *U.S. Geological Survey Open-file Report*, 94-568, 143–144.
- Reilinger R. E., McClusky S. C., Oral M. B., King R. W., Toksoz M. N., Barka A. A., Kinik I., Lenk O., and Sanli I. (1997). Global Positioning System measure-

-
- ments of present-day crustal movements in the Arabia-Africa-Eurasia plate collision zone, *Journal of Geophysical Research*, 102, 9983-9999.
- Rockwell T., Barka A., Dawson T., Thorup K., and Akyuz S. (2001). Paleoseismology of the Gazikoy-Saros segment of the North Anatolia fault, northwestern Turkey – Comparison of the historical and paleoseismic records, implications of regional seismic hazard, and models of earthquake recurrence, *International Journal of Seismology*, June issue.
- Stein R.S., A. Barka and J.H. Dieterich (1997). Progressive failure on the North Anatolian fault since 1939 by earthquake stress triggering, *Geophys. J. Int.*, 128, 594-604.
- Straub C.S., and Kahle H. (1995). Active crustal deformation in the Marmara Sea region, NW Anatolia, inferred from GPS measurements, *Geophysical Research Letters*, 22, 2533-2536.
- Tutkun Z. and Pavlides S. (2001). Small scale contractional – extensional structures and morphotectonics along the fault traces of Izmit (Turkey) 1999 earthquake, *9th International Conference of the Geological Society of Greece*.
- Tutkun Z., Pavlides S. and Doğan B. (2001). Small scale structural pattern along the surface rupture traces of the Izmit – Kocaeli (Turkey) 1999 earthquake, *4th International Symposium on Eastern Mediterranean Geology*.
- USGS (1999). Implications for earthquake risk reduction in the United States from the Kocaeli, Turkey, earthquake of August 17, 1999, *United States Geological Survey Circular 1193*, 65 p.
- Χατζηπέτρος Α. (1998). Παλαιοσεισμολογική – μορφοτεκτονική μελέτη και μηχανική συμπεριφορά των συστημάτων ενεργών διαρρήξεων Μυγδονίας, Ανατολικής Χαλκιδικής, Κοζάνης – Γρεβενών, *Διδακτορική Διατριβή*, Α.Π.Θ.

5 Παραρτήματα

Στα πλαίσια της διάχυσης των αποτελεσμάτων του παρόντος ερευνητικού έργου, ορισμένα από τα πρόδρομα αποτελέσματά του ανακοινώθηκαν σε συνέδρια και δημοσιεύτηκαν σε αντίστοιχα πρακτικά.

Συγκεκριμένα, οι εργασίες που ανακοινώθηκαν και συνοψίζονται είναι:

1. Tutkun Z., Pavlides S. and Doğan B. (2001). Small scale structural pattern along the surface rupture traces of the Izmit – Kocaeli (Turkey) 1999 earthquake, *4th International Symposium on Eastern Mediterranean Geology* (κεφ. 5.1).
2. Tutkun Z. and Pavlides S. (2001). Small scale contractional – extensional structures and morphotectonics along the fault traces of Izmit-Kocaeli (Turkey) 1999 earthquake, *9th International Conference of the Geological Society of Greece* (κεφ. 5.2).
3. Pavlides S., Chatzipetros A., Tutkun Z., Özaksoy V. & Doğan B. (2002). Morphotectonics and Palaeoseismology Along the Fault Traces of Izmit-Sapanca Strike-Slip and Gölcük-Kavaklı Normal Faults: Kocaeli-Turkey 1999 Earthquake, *IX International Symposium on Natural and Human-made Hazards – Disaster Mitigation in the Perspective of the New Millenium* (κεφ. 1.1).
4. Pavlides S., Tutkun Z., Chatzipetros A., Özaksoy V. and Doğan B. (2003). Trenching along the Gölcük 1999 normal fault: evidence for repeated recent seismic activity, *International Workshop on the North Anatolian, East Anatolian and Dead Sea Fault Systems: Recent Progress in Tectonics and Paleoseismology, and Field Training Course in Paleoseismology* (κεφ. 5.4).

5.1 Παράρτημα Α'

4th International Symposium on Eastern Mediterranean Geology

SMALL SCALE STRUCTURAL PATTERN ALONG THE SURFACE RUPTURE TRACES OF THE IZMIT-KOCAELI (TURKEY) 1999 EARTHQUAKE

by

ZEKI TUTKUN², SPYROS PAVLIDES³ AND BULENT DOGAN³

ABSTRACT

The August 17, 1999, Mw=7.4 Izmit (Kocaeli) earthquake (Turkey) ruptured 100 km at least surface fault on land (total estimated : 140-160km) along the north-western branch of the North Anatolian Fault Zone (NAFZ). Although the pre-existing structures of NAFZ has been divided into segments, showing stepover and pull apart geometry, the 1999 earthquake ruptures are generally linear, E-W striking (N80°-100°), right-lateral, too. In small scale and on the recent sediments they show very typical strike-slip displacements (2 to 5m), pop-ups and pressure ridges (N 40-70°), P (N80°), R (N100-110°) and R' (~N350°) Riedel shears, extensional cracks (N115°-135°), restraining and releasing bends and small pull apart structures. Co-existence of strike slip fault ruptures with normal and reverse separation is typical. The most typical normal fault (D=1.5-2m) was mapped in Kavakli-Yeniköy villages (Gölcük peninsula) striking N130-140°. In the epicentral area (Gölcük-Tepetarla) the seismic ruptures did not follow any known or previously mapped fault, but the surface morphology and the Digital Elevation Model (DEM) show typical and recognizable morphotectonic features, typical of Holocene activity. That is elongated valleys, shutter ridges, high angle slopes, scarplets, stream offset; while trenching tectonostratigraphy indicate paleo sag-ponds (clay deposits) and paleo liquefaction (C¹⁴ dating-Holocene-historical deposits 200 to 11,000 yr. BP).

KEY WORDS: Izmit-Kocaeli 1999 earthquake, North Anatolian Fault, Co-seismic ruptures.

INTRODUCTION

Anatolia from neotectonic point of view is a post alpine collisional intracontinental convergence in association with tectonic escape related deformation region, and the consequent structures are folds, thrusts, suture zones, active typical normal faults and important strike-slip faults, like the right-lateral North Anatolian Fault Zone (e.g. Bozkurt 2001). This fault is an intracontinental strike-slip structure, too, with a slip rate of about 20mm /yr, well developed topographic expression and remarkable seismic activity.

Although many papers, announcements and abstracts have appeared recently on the Izmit 1999 co-seismic fault traces, little attention has been paid subsequently to the small-scale structures associated with divergence or convergence or simple shear along the activated seismic fault. They constitute a useful point of analysis of structures along strike-slip faults and could be helpful for considerably larger scale. They are analogues to the North Anatolian Fault Zone itself. Field observations along the 90-100 km on land fault traces of the Izmit (Kocaeli) 17th August, 1999 earthquake have been taken immediately after the event (Tutkun et al. 2000) and on the small scale structures (tension cracks, contractional, Riedel shears etc) in detail, on May 17-18 and mainly June 17-22, 2000, January 13-15 and September 5-11, 2001.

² Kocaeli University, Dept. of Geology, Izmit, / now at Canakkale University, Turkey.

³ Aristotle University of Thessaloniki, Dept. of Geology, 54006 Greece.

³ Kocaeli University, Dept. of Geology, Izmit, / now at ITU, Istanbul, Turkey.

The purpose of this paper is to summarize the 1999 co-seismic fault geometry and segmentation and to emphasize both on some small-scale typical strike-slip characteristics and controls on superficial structural patterns within the sedimentary cover, as well as to show some typical active fault morphotectonic features.

FAULT GEOMETRY AND SEGMENTATION

The earthquake caused right-lateral strike-slip movement on the fault. The fault rupture was characterized by en echelon, P, R, R' Riedels, extensional and contractional structures, locally, which caused uplift, subsidence, and rotation in micro-scale. In macro-scale the surface ruptures are named as Karadere-Arifiye and Sapanca-Gölcük segments from east to west as a first approximation (fig.1). To the west the rupture might extend under the Izmit gulf for over 50 km. The total measured on land maximum offset range between 1 and 4.8 m on the Karadere-Arifiye segment and 2.5-3.5 on the Sapanca-Golcuk segment.

Although the earthquake ruptures are generally linear (fig.1), E-W striking ($N80^{\circ}$ - 100°), they can be divided into branches (not typical segments) on the basis of their geometry. The Karadere "segment" (or branch) (A) is an ENE-WSW ($N75^{\circ}$ - 85°) striking, 20-25km (?) long fault from Eften lake to Akyazi town. It also overlapped with the November 12, 1999 Duzce earthquake ruptures (Tutkun et al 2000; Emre et al., 2000); the maximum observed displacement was about 2m, while the average less than 1m. The Arifiye "segment" (B) is a 25 km long linear and more or less continues seismic trace from the Arifiye village to the east shore of the Sapanca lake. In between Arifiye and the town of Akyazi there is a 5 km gap of surface seismic traces. It strikes E-W (90°). The maximum right lateral displacement (4.8 m) was observed close to Arifiye village. The displacement is gradually decreased toward the east (0.3m), but the average displacement on this segment is as high as 2-2.5m. The Karadere and Arifiye fault branches are sub-parallel and near to the western edge of the 1967 Mudurnu seismic fault traces (Ambraseys & Zatopec 1969, Barka & Kadinsky-Cade 1988). This segment is separated from the Sapanca-Gölcük one by the Sapanca lake step over and by a NW-SE trending normal fault (Gölcük peninsula-Kavakli area).

The Sapanca-Tepetarla-Gölcük E-W (90°) striking, 35km long "segments" (C) extends from the northwestern shore of the lake Sapanca to Golcuk peninsula, while for about 4 km it runs under the Izmit gulf along the southern shoreline. The maximum displacement is 4m, while the average is 2.5 ± 0.5 m. The western edge of the segment at Kavakli-Denizevler-Yenikoy area is a typical 4 km long normal fault, NW-SE (120° - 130°) striking, with 2.10m maximum vertical offset and 0.2-0.3m right-lateral one.

The Western "segment" (D) is a possible submarine E-W structure from Golcuk to Yalova about 40-50 long. It is simply based on spatio-temporal distribution of aftershocks. The seismicity pattern itself defines two (2) segments that extend about 80km east and 75km west of the main shock epicenter (40.8° N- 29.9° E, Colcuk-Izmit, fig.1). For further information on the fault geometry see also Awata et al, 2000; Barka 1999, 2000; Tutkun 2000; Youd et al "Earthquake SPECTRA" 2000, Ergin et al. 2001 among others.

SMALL-SCALE STRUCTURAL PATTERNS

Although the observed ruptures are pure strike-slip mainly, drag faults are often seen with pressure ridges, tension fractures and small pull-apart basins (Biddle & Christie-Blick 1985). The most remarkable normal fault was found in Kavakli (Denizsevler) area (Gölcük peninsula). It is a WNW-ESE trending, NNE dipping oblique-slip fault. At Denizsevler sport center it shows 130-140° strike, 1.5m vertical displacement and 0.3m dextral one, while vertical displacements of about 2 meters have been measured at Yenikoy, too. It affects recent delta deposits, sandy clays, sands, gravel, conglomerates and soil. It is a typical extensional structure perpendicular to σ_3 main stress principal axis. Extensional features, which are mode I cracks (see Scholz 1990) form in strike-slip systems, in response to simple shear at about 45° to the master fault, as Golcuk-Kavakli fault is. But this fault is believed to activated during of just after the main shock as a gravitational slip, following a pre-existing structure, than typical co-seismic rupture. This normal fault could possibly be the visible strand of a pull-apart structure, lying close to the epicenter of the main shock where the rupture propagation had started.

Co-existence of strike-slip faults with normal and reverse separation is typical (Biddle & Christie-Blick 1985, see also Scholz 1990). Compressional small scale structures observed are: pressure ridges (fig.2), that is linear topographic highs bounded by faults, and pop-ups, that is uplifted small block, as well as "thrusts" at 60-40° (Table I). In general the orientation and movement along right-stepping small fault branches has resulted in local compression that caused shortening and uplift. That is, numerous left- and right-stepping linear fault traces of about 10-15 meters long, has accommodated right-lateral-motion, tend to overstep one another and produce compression locally. Figures 2 (right corner box) and 3 (a), (b) show typical reverse structures (strike : 40-70°, 2-3 m long). On the contrary in local extension (e.g. releasing stepovers) tension fractures (open-up structures) 1-10 meters long have been developed at 130-140° mainly, that is 40 to 45° angle to the master fault (fig. 3 c, d). Synthetic shears (R) Riedels stand at 100-110° and (P) shears at 80°, while in 170° stands the antithetic (or conjugate Riedel R') shear rarely and the Main right-lateral Displacement Zone developed at an average strike of 90°, (Table I, figs 1, 2, 3, 4).

MORPHOTECTONICS

The surface rupture of the 1999 earthquake could not be predicted along Izmit- Sapanca lake-Arifiye E-W elongated valley, an area covered by Pleistocene and Holocene mainly sediments. None fault was previously traced or mapped, where the recent co-seismic ruptures appeared. But Earthquake Geology recently developed the study of Earth's surface (morphotectonics) for evidence of paleo-earthquake activity. The most impressive morphotectonic structures in the region, which dominate the area, are the E-W elongated Gulf of Izmit, the lake Sapanca and the Tepetarla-Arifiye valleys, too. The gulf is in fact a 50km long and 10 average width prolongation

of the sea inland, along the northwestern branch of NAFZ (see also fig. 1). In smaller scale the Tepetarla-Kular-Yaylacik-Agasiguvacik morphology (Mahmut pasa) has been studied in detail by topographic sections, DEM construction and consequently by landscape analysis, as the most typical example of the region. The digital elevation map was produced by on-screen digitising elevation contours (scale 1:20.000) and a shaded relief image was produced (ARCVIEW and ARCVIEW). Both morphology and Plio-pleistocene deposit stratigraphy indicate the fault migration northwards (fig. 3) up to linear E-W elongated valley where the 1999 ruptures appeared.

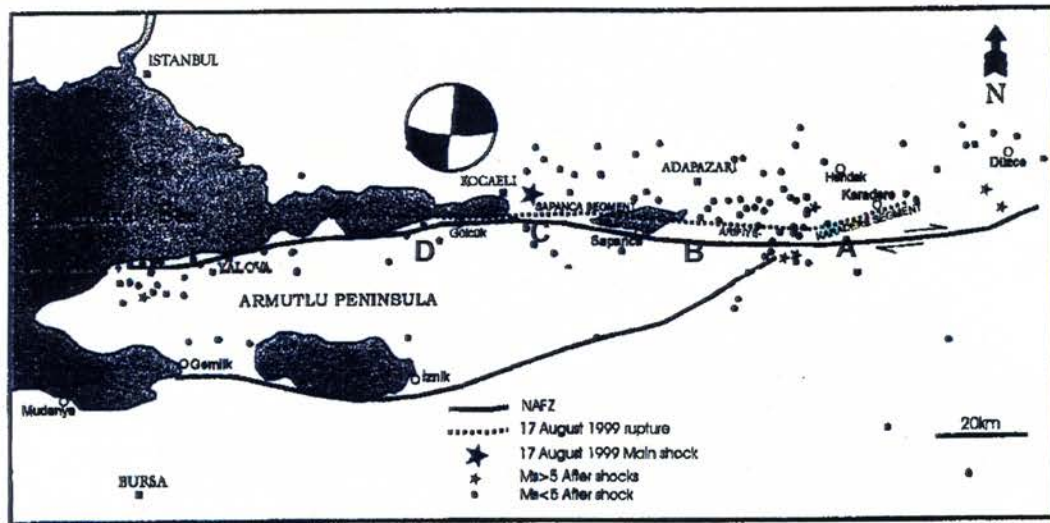


Fig. 1. The surface ruptures of the 17th August 1999 ($M_w=7.4$) Izmit earthquake with the four distinct "segments" (or branches) named from east to west: A. Karadere; B. Arifiye; C. Sapanca-Gölcük; D. Izmit Gulf. In general the co-seismic fault ruptures are linear and could be divided into two typical segments only. NAFZ: North Anatolian Fault Zone (western strands), (after Z. Tutkun et al 1999; 2000 unpublished).

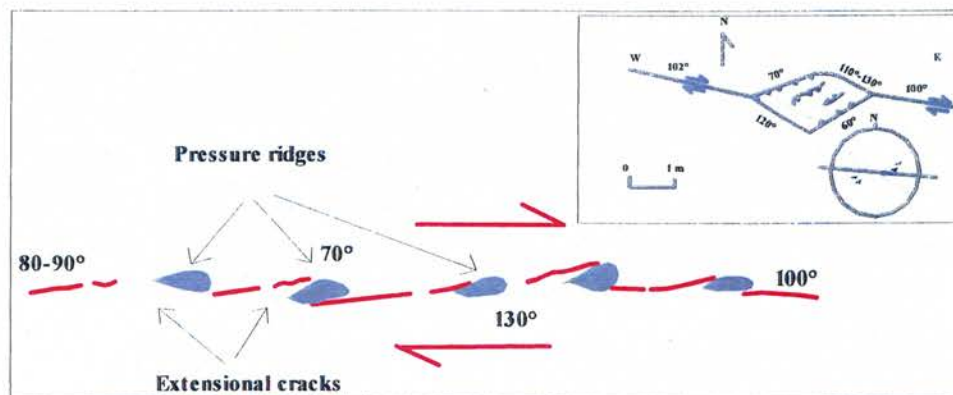


Fig.2: Sketch of a series of pressure ridges along the right-stepping linear fault traces at "Mahmut pasa" (Gölcük - Sapanca segment, Kocaeli area). In general the orientation and movement along stepping small fault branches has resulted in local compression that caused shortening and uplift of about 5-10 meters long (gray areas). They also accompanied by extensional fractures (120-130°). Right corner box: the structure of a typical pressure ridge, where the Main displacement Zone is 100° and the contractional

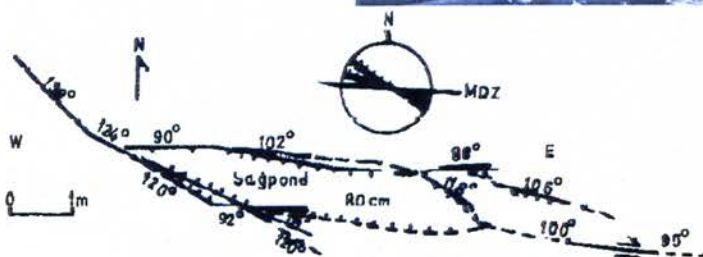
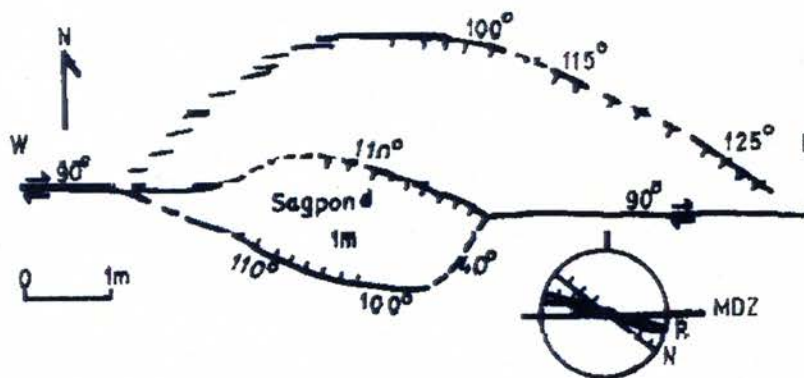
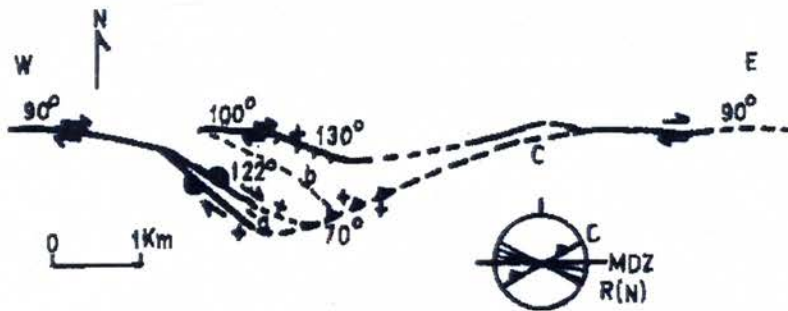
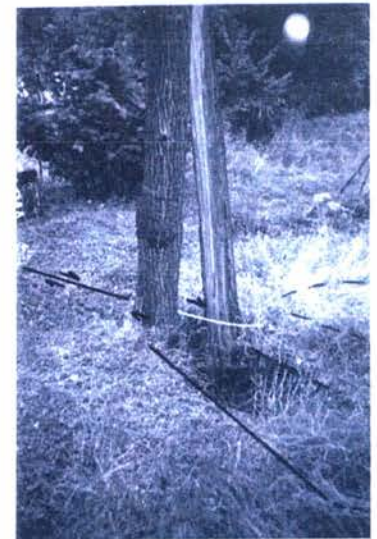
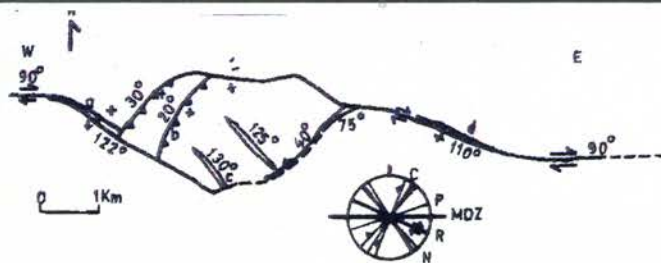


Fig. 3.
Representative detailed mapped small

scale features along the right-lateral

strike-slip Izmit co-seismic fault. A) Geometry of a Pressure Ridge at Tepetarla and the angular relation among structures (small circle), MDZ:

master Displacement Zone, C: contractional structures, N: normal or Tension fractures, P and R shears; right the corresponding photograph. B) Displaced poplar (kavak) at Tepetarla, diagram in map view, at a: strike-slip displacement $D=37\text{cm}$, Opening $O=28\text{cm}$; at b: $D=10\text{cm}$, vertical Displacement $D'=60\text{cm}$, $O=35\text{cm}$; right the corresponding photograph. C) and D) Sagpond geometry at Arifiye (sketches and photographs).

Several neotectonic and geomorphic observations along the fault indicate Quaternary activity. Yaylacik hill (fig.4 a) where a block of new apartment buildings on the fault trace totally collapsed, is a typical shutter ridge, which controls the drainage diversion. The "Mahmut pasa ciftligi" low hill relief can be also characterized as a large scale elongated E-W shutter hill (fig. 4 b). The most characteristic small shutter ridge is the 10m long (E-W) and 3m width (fig. 4 c) in the center of the E-W elongated small valley, southern of "Mahmut pasa" hills, along the 1999 seismic traces (fig. 4).

We have begun a programme of trenching across the fault in order to obtain fundamental data for the evaluation of past activity. The "Mahmut pasa" area is located at the middle of a linear shallow valley with flat floor (fig.4). Two trenches on the 1999 fault traces on a small pressure ridge have been excavated (fig. 4 site T), 8m long and 4m deep in order to look for paleo fossilized seismic structures or paleo-earthquakes (fig. 5). The trench walls display a record of Holocene (historic) sedimentation. The sediments are broadly divided into three at least layers and the superficial recent soil, named a) 2m thick dark soil; b) 1m yellow sandy mud, possibly of paleo sag ponds deposits, and c) 1m dark paleo soil with few pebbles. They are in typical horizontal position, but disaccommodated. Structural features, that is joints (cracks), seismites and paleo-liquefaction, associated with the fault are identified from sampled and C14 dated. A preliminary concluding is that Izmit-Sapanca area has been severely damaged by at least an event earlier than 200 years or so (see also Sungai et al., 2000, Rockwell et al., 2000). This fault segment is possibly associated with the 1894 and 1878 earthquakes according to Papadimitriou et al., (2000) and Ambraseys (2001), as well as with the strong shocks of the 18th century (e.g. 1719 earthquake, that is the most probable or the 1754 shock) or earlier (e.g. 1509), according to our preliminary data and our paleoseismological works, which is in progress in the region. A second trench was also opened at Yaylacik, where the cooperative apparent buildings block collapsed. It shows the positive flower structure geometry of the 1999 fault, as well as a previous one in the brown soil-clays (4 m deep). A third trench at Kavakli-Yeniköy (Gölcük) oblique-normal fault clearly shows three (3) event: the last with 1.6m downthrow (1999 scarp) and two paleoevents printed on the Holocene sediments, 0.70m and 0.30m vertical displacement respectively.

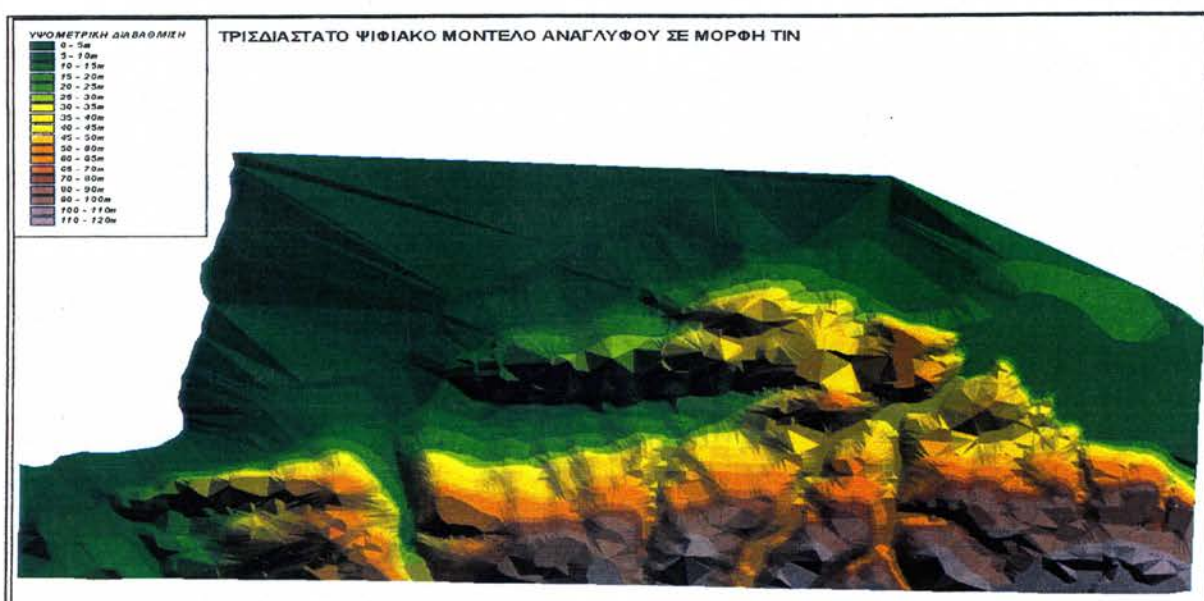
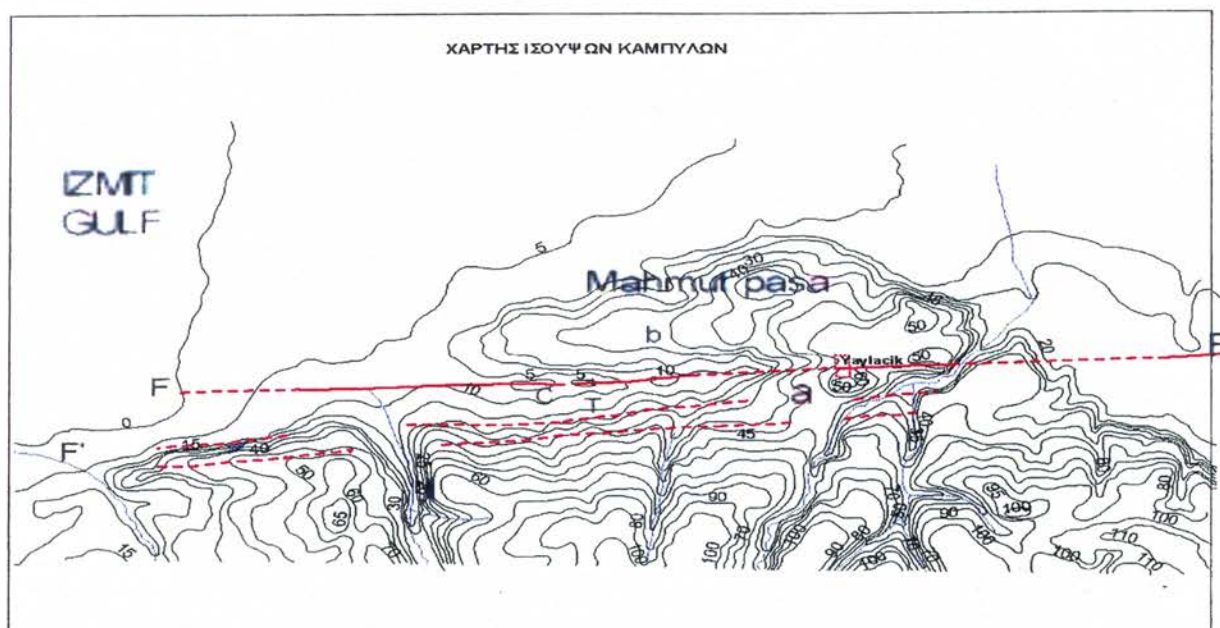


Fig. 4. Top: Topographic map part of Sapanca-Gölcük segment at Mahmut pasa cifgligi (between Yaylacik and Yuvacik villages) F: 1999 co-seismic fault traces; F': pre-existing faults (in geological terms; photograph in the box shows an older parallel fault affecting Plio-Pleistocene deposits; striking N110-120°, dipping 70-80° NE; southern of Kular-Yaylacik); a, b, c : shutter ridges; T: trenches. Down: Digital probable Elevation Model (DEM) of the landscape at the same area.

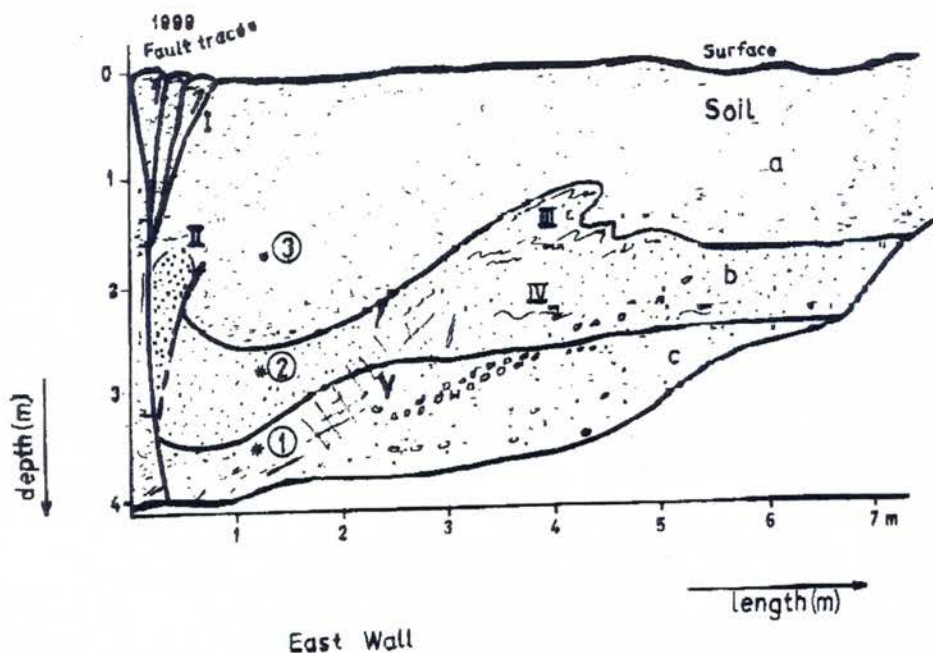


Fig. 5. Trench (Izmit-I, East wall) where the three distinct layers are shown (a: soil; b: sandy mud (clays); c: soil, possibly of paleo-sag-pond origin), the 1999 fault (contractional) with the small-scale flower structure (I), liquefaction (II and III), seismites (IV) and cracks (V). Sampling sites 1: 11,800 \pm 40 years BP; 2: no results (?); 3: 120 \pm 40 years BP (Radiocarbon Analysis, The University of Georgia, USA). Photograph: excavation works.

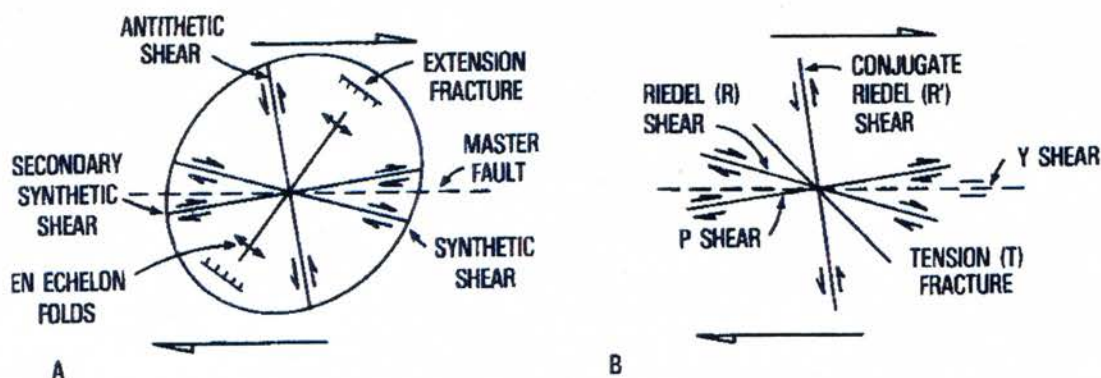


Fig. 7. The angular relations between structures in right-lateral simple shear conditions (Biddle & Christie-Blick 1985) that tend to form the measured small and medium size structures of the 1999 Izmit earthquake surface fault traces.

CONCLUSIONS

The epicenter of the main shock was located at the eastern edge of the Izmit gulf, that is Gölcük-Kavaklı south of Izmit town area, where the linear strike-slip fault is separated by a typical normal fault. On the base of surface geometry the total length of the 1999 co-seismic fault can be divided into two main segments (a: Izmit-Gulf-Gölcük-Izmit and b: Sapanca-Karadere), while on the base of local strikes, displacements and step-over geometry it can be divided also into smaller branches.

The co-seismic rupture is not a single break in small scale, instead it is composed of numerous small typical right-lateral strike-slip structures 2 to 10 m long, that is P, R, R' Riedels, tension fractures and contractional structures. They are pressure ridges, pop ups, sag-ponds (small pull-apart basins few meters long), and Riedel synthetic mainly shears controlled by the master fault displacement. Some representative measurements and the corresponding sites are given in the figure 3 and can be explained by the angular relation of figure 7. Generally, they were responsible for local differentiation in damage manifestation. Primary structures on the sedimentary cover along the activated 1999 fault are close to those predicted by an idealized strain ellipse for right lateral shear (fig. 7). Local fault rupture geometry and kinematics are compatible with instrumental data (earthquake focal mechanisms). They are analogues to large scale structures of the North Anatolian Fault Zone. Similar phenomena have been observed and studied along the 12th November 1999 Düzce-Bolu earthquake (fig.8).

Representative morphotectonic and trenching tectonostratigraphy at Sapanca-Gölcük segment clearly show the Holocene-historical (200 to 11,000 years BP C14) development of the fault at the present site.

Acknowledgments

Thanks are due to municipality of Izmit and.....factory and many villages of the damaged areas for their help during our field work. The research partly supported by the Greek Earthquake Planning and Protection Organisation (OASP), in the framework of the project "The results of the surface ruptures of the seismogenic fault to infrastructure from the observations of Turkey and Taiwan 1999 earthquakes" (coordinator I. Sigalas). Thanks also due to reviewers

REFERENCE

- Ambraseys N. (2001). The earthquake of 10 July 1894 in the Gulf of Izmit and its relation to the earthquake of 17 August 1999. *J. Seismology*, 5: 117-128.
- Ambraseys N. & Zatopec, A. (1969). The Mudurnu Valley, Western Anatolia, Turkey, Earthquake of 22 July 1967. *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, 59, 521-589.
- Awata, Y. Yoshioka, T. Emre, O. Duman, T.Y., Dogan, A. & Tsukuda, E. (2000). Segment structures of the surface ruptures associated with the August 17, 1999 Izmit Earthquake, Turkey, XXVII

-
- Gen. Assem. ESC, Abstracts and Papers, Lisbon, Portugal, 10-15 September 2000.
- Barka, A. (1999). The August 17th, 1999 Izmit earthquake. *Science*, 285, 1858-1859.
- Barka, A. (2000). The August 17 and November 12 1999 earthquakes in the eastern Marmara sea region. "Active Fault Research for the New Millenium", Okumura et al (Eds), Proceedings, HOKUDAN-Japan International Sympocium, January 17th-26th, 2000, S1-S6.
- Barka, A. and Kadinsky-Cade, K., (1988). Strike-slip fault geometry in Turkey and its influence on earthquake activity. *Tectonics* 7, 663-684.
- Biddle, K. & Christie-Blick, N. (1985). Strike-slip deformation, basin formation, and sedimentation. *Soc. Econ. Paleontol. & Mineral. Special Publ. No 37*, 386 pp.
- Bozkurt, E. (2001). Neotectonics of Turkey-a synthesis. *Geodyn. Acta*, 14, 3-30.
- Emre, O., Erkal, T., Tchepalyga, A., kazanci, N., Kecer, M. & Unay E. (1998). Neogene-Quaternary evolution of the Eastern Marmara Region, northwest Turkey. *Bull. MTA* 120, 211-234.
- Ergin, M., Tapirdamaz, C.Yorul, A., Cetin, S., Tarancioglu, A., & Ozalaybey, S., (2001). 4th Internatiol Sympocium Eastern Mediterranean Geology, May 2001, Isparta, Turkey, Abstract Volume, 176.
- Papadimitriou, E.E., Karakostas, V.G., & Papazachos, B.C., (2000). Rupture zones in the area of the 17.08.99 Izmit (NW Turkey) large earthquake (Mw 7.4) and stress changes caused by its generation. *J. Seismology*, 1-8.
- Rockwell, Th., Barka, A., Akyuz, S., Dawson, T., Sieh, K. & Gonzales, T. (2000). The North Anatolian Fault around Marmara Sea, and pre- and post-earthquake research after the August 17, 1999 Kocaeli earthquake. "Active Fault Research for the New Millenium" Okumura et al (Eds), Proceedings HOKUDAN-Japan International Sympocium, January 17th-26th, 2000, 587-592.
- Scholz, Ch. (1990). The mechanics of earthquakes and faulting. Cambridge University Press 1990. pp. 1-439.
- Sungai, T. et al. (2000) Trenching survey across the 1999 August Izmit Earthquake rupture NW-Turkey-A Prompt Report. XXVII Gen. Assem. ESC, Abstracts and Papers, Lisbon, Portugal, 10-15 September 2000.
- Tutkun, S.Z. Kavak, S., Ozden, O. Tatar, & Dogan, B. (1999). Surface deformation and aftershocks distribution of the 17 August 1999, Marmara Earthquake and its Neotectonic significance. Intern. Conf. EHRMR '99, Near East University 18-22 October 1999, Nicosia, North Cyprus. (Abs)
- Tutkun, Z., Gürer, O.F., & Dogan, B. (2000). 17th August 1999 Izit (M 7.4) and 12th November 1999 Düzce (M 7.2) Earthquakes. Excursion book, Kocaeli University. 6 pp.
- Youd L. (Ed), (2000). Kocaeli, Turkey Earthquake of August 17, 1999. "EARTHQUAKE SPECTRA", Special Issue, Supplem. 16 (3).
-

TABLE I. Representative measurements of small scale features along the right-lateral strike-slip Izmit co-seismic fault. All measurements are given in degrees from North (strike). MDZ: Master Displacement Zone; P and R Riedel Shears; Ex: Tension fractures-normal faults; C: Contractional (compressional) R' shear (antithetic); Dh: horizontal (dextral) Displacement; Dv: vertical and H: heave (opening)

Gölcük-Kavaklı-FORD

MDZ	P	R	Ex	C	R'	Dh	Dv	H
90°	-	-	-	-	-	3.50	-	-
90°	-	-	125°	-	-	0.20	1.80	-
-	-	-	130°	-	-	0.30	2.00	-
-	-	-	140°	-	-	-	-	-
-	-	-	135°	-	155°	-	-	-
-	-	-	130°	-	170°	0.30	1.50	-
82°	-	-	-	-	-	0.90	-	-
85°	-	-	-	-	-	2.60	-	-
90°	-	-	-	-	-	2.80	-	-

Tepetarla

MDZ	P	R	Ex	C	R'	Dh	Dv	H
90°	-	100°	130°	40°	-	0.10	0.60	0.35
90°	80°	-	122°	70°	-	0.37	-	0.28
90°	-	-	132°	55°	-	-	0.30	-
90°	-	-	122°	30°	-	-	0.80	0.10
90°	-	110°	130°	20°	-	-	-	-
90°	-	105°	115°	-	-	-	-	-
100°	-	110°	-	70°	-	-	-	-

Asagiguvacik village (Gölcük-Izmit area)

MDZ	P	R	Ex	C	R'	Dh	Dv	H
90°	82°	105°	130°	-	-	2.5	-	-
94°	88°	(110°)	120°	-	-	2.5	0.80	-
96°	-	-	115°	-	-	-	0.60	-
100°	-	-	120°	-	-	-	0.42	-
			130°				0.55	

Mustafa pasa-Yaylacik

MDZ	P	R	Ex	C	R'	Dh	Dv	H
100°	-	110°	125°	50°	-	2.3	-	-
100°	-	-	125°	40°	-	-	-	-
85°	-	110°	130°	40°	-	-	-	0.1
90°	-	115°	140°	43°	-	-	-	-
90°	80°	110°	135°	-	170°	-	-	0.2
90°	-	115°	140°	50°	-	-	-	0.18
90°	78°	106°	120°	55°	-	-	-	-
100°	-	110°	122°	70°	-	-	-	0.30
90°	80°	-	124°	60°	-	-	-	-
95°	80°	-	130°	-	185°	-	-	-
92°	80°	-	120°	-	-	-	0.42	-

Sapanca-Arifiye

MDZ	P	R	Ex	C	R'	Dh	Dv	H
105°	-	135°	125°	50°	-	-	0.10	-
90°	-	120°	125°	40°	-	-	-	1.50
92°	-	102°	124°	-	-	-	0.80	-
88°	-	106°	138°	-	-	-	0.40	-
95°	80°	114°	125°	-	-	-	0.45	-

90°	-	110°	128°	-	-	-	1.00	-
90°	78°	110°	130°	-	-	-	-	-
90°	-	115°	135°	-	-	-	0.50	-
90°	80°	100°	132°	-	-	-	-	-

Fig. 6. A 2.30m horizontal (right-lateral) displacement and 1.55 m opening (heave) moving the frontal staircase of a one-floor house (Arifiye).

Fig. 8. The surface rupture and slip distribution of the 12th November 1999 Duzce earthquake (Tutkun 1999). The photograph shows typical pressure ridges at Kaynasly.

5.2 Παράρτημα Β'

9th International Conference of the Geological Society of Greece, Athens, Greece, September 26-28, 2001

SMALL SCALE CONTRACTIONAL - EXTENSIONAL STRUCTURES AND MORPHOTECTONICS ALONG THE FAULT TRACES OF IZMIT-KOCAELI (TURKEY) 1999 EARTHQUAKE

by
ZEKI TUTKUN⁴, AND SPYROS PAVLIDES⁵

ABSTRACT

The Mw=7.4 Izmit (Kocaeli) earthquake of August 17, 1999 (Turkey) ruptured 100 km at least surface faults on land along the northwestern branch of the North Anatolian Fault Zone (NAFZ). Although the pre-existing structures of NAFZ has been divided into segments, showing stepover and pull apart geometry, the earthquake ruptures are generally linear, E-W striking (N80°-100°), right-lateral. In small scale and on the recent sediments they show very typical strike-slip displacements (2 to 5m), pop-ups and pressure ridges (N 40-70°), P (N80°), R (N100-110°) and R' (~N350°) Riedel shears, extensional cracks (N115°-135°), restraining and releasing bends and small pull apart structures. In the epicentral area (Gölcük-Tepetarla) the seismic ruptures did not follow any known or previously mapped fault, but the morphology and the Digital Elevation Model (DEM) show typical and recognizable paleo-earthquake features. That is elongated valleys, shutter ridges, high angle slopes, scarplets, stream offset; while trenching tectonostratigraphy indicate palaeo sag-ponds (clayly deposits) and palaeo liquefaction (C¹⁴ dating-Holocene-historical deposits 200 to 11,000 yr. BP).

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο σεισμός της 17^{ης} Αυγούστου 1999 στην Τουρκία (Mw=7.4) έδωσε επιφανειακές διαρρήξεις περίπου 100 km στην ξηρά από την πόλη Gölcük μέχρι τη λίμνη Eften. Με βάση γεωμετρικά κριτήρια το σεισμικό ρήγμα μπορεί να διακριθεί σε δύο κύρια "τμήματα" με γενική γραμμική διάταξη και δεξιόστροφη κίνηση. Από τη μελέτη μικροδομών κατά μήκος του ρήγματος, όπως εμφανίζονται επιφανειακά στα πρόσφατα ιζήματα, προκύπτει ότι η γενική διεύθυνση του είναι Α-Δ (80-100°), οι δεξιόστροφες οριζόντιες μετατοπίσεις φτάνουν τα 2 έως 5 m, οι συμπιεστικές δομές αναπτύσσονται σε διευθύνσεις 40-70°, οι συνθετικές Riedel διατμήσεις σε 80° (Ρ) και 100-110° (R), οι αντιθετικές σε 350° (R') και οι εφελκυστικές 115-135°, δηλαδή τυπικές ιδεατές δομές μια απλής δεξιόστροφης διάτμησης. Στην επικεντρική περιοχή του Gölcük-Tepetarla οι διαρρήξεις ακολουθούν τυπικές μορφολογικές δομές, όπως προκύπτει από την τριδιάστατη ανάλυση του αναγλύφου (DEM) και την τεκτονοστρωματογραφική ανάλυση παλαιοσεισμολογικών εκσκαφών (παλαιορευστοποιήσεις εδαφών: C¹⁴ 200 μέχρι 11,000 χρόνια-Ολόκαινο).

KEY WORDS: Co-seismic ruptures, Earthquake structures, Izmit-Kocaeli earthquake.

INTRODUCTION

Field observations along the 90-100 km on land fault traces of the Izmit (Kocaeli) 17th August, 1999 earthquake have been taken immediately after the event (Tutkun et al. 2000) and on the small scale structures (tension fractures, contractional, Riedel shears) in detail, on May 17 and mainly June 17-20, 2000. The earthquake caused right-lateral strike-slip

⁴ Kocaeli University, Dept. of Geology, Izmit, Turkey

⁵ Aristotle University of Thessaloniki, Dept. of Geology, 54006 Greece

movement on the fault. The surface ruptures are named as Karadere-Arifiye and Sapanca-Gölcük "segments" from east to west as a first approximation (fig.1). To the west the rupture might extend under the Izmit gulf for over 50 km. The total measured on land maximum offset range between 1 and 4.8 m on the Karadere-Arifiye segment and 2.5-3.5 on the Sapanca-Gölcük segment.

Although many papers, announcements and abstracts have appeared recently on the Izmit fault traces geometry and kinematics, little attention has been paid subsequently to the small-scale structures associated with divergence or convergence or simple shear along the activated seismic fault. They constitute a useful point of analysis of structures along strike-slip faults and could be helpful for considerably larger scale (fig. 2). They are analogues to the North Anatolian Fault Zone itself.

The purpose of this paper is to summarize the 1999 fault geometry and segmentation and to emphasize both on some small-scale typical strike-slip characteristics and controls on superficial structural patterns within the sedimentary cover and to morphotectonics of the pre-existing active fault.

FAULT GEOMETRY AND SEGMENTATION

Although the earthquake ruptures are generally linear (fig. 1), E-W striking ($N80^{\circ}$ - 100°), they can be divided into segments on the basis of their geometry. The Karadere "segment" (or branch) (A) is an ENE-WSW ($N75^{\circ}$ - 85°) striking, 20-25km (?) long fault from Eften lake to Akyazi town, it also overlapped with the November 12, 1999 Duzce earthquake ruptures (Emre et al., 2000); the maximum observed displacement was about 2m, while the average less than 1m. The Arifiye "segment" (B) is a 25 km long linear and more or less continues seismic trace from the Arifiye village to the east shore of the Sapanca lake. In between Arifiye and the town of Akyazi there is a 5 km gap of surface seismic traces. It strikes E-W (90°). The maximum right lateral displacement (4.8 m) was observed close to Arifiye village. The displacement is gradually decreased toward the east (0.3m), but the average displacement on this segment is as high as 2-2.5m. The Karadere and Arifiye fault branches are sub-parallel and near to the western edge of the 1967 Mudurnu seismic fault traces (Ambraseys & Zatopec 1969, Barka & Kadinsky-Cade 1988). This segment is separated from the Sapanca-Gölcük one by the Sapanca lake step over and by a NW-SE trending normal fault (Gölcük peninsula-Kavakli area).

The Sapanca-Tepetarla-Gölcük E-W (90°) striking, 35km long "segments" (C) extends from the northwestern shore of the lake Sapanca to Golcuk peninsula, while for about 4 km it runs under the Izmit gulf along the southern shoreline. The maximum displacement is 4m, while the average is 2.5 ± 0.5 m. The western edge of the segment at Kavakli area is a normal (2.10 m) right-lateral (0.2 - 0.3 m) oblique slip 5 km normal fault, NW-SE (120 - 130°) striking.

The Western "segment" (D) is a possible submarine E-W structure from Golcuk to Yalova about 40-50 long. It is simply based on spatio-temporal distribution of aftershocks. The seismicity pattern itself defines two (2) segments that extend about 80km east and 75km west of the mainshock epicenter ($40.8N$ - $29.9E$, Colcuk-Izmit, fig.1). For further information on the fault geometry see also Awata et al, 2000; Barka 1999, 2000; Tutkun 2000; Youd L. et al "Eq SPECTRA" 2000, Lekkas 2001, Ergin et al. 2001 among others.

SMALL-SCALE STRUCTURAL PATTERNS

Although the observed ruptures are pure strike-slip mainly, drag faults are often seen with pressure ridges, tension fractures and small pull apart basins (Biddle & Christie-Blick 1985). The most remarkable normal fault was found in Kavakli area (Golcuk peninsula). It is a WNW-ESE trending, NNE dipping oblique-slip fault. At Kavakli sport center it shows 130 - 140° strike, 1.5m vertical displacement and 0.3m dextral one. It is a typical extensional feature perpendicular to σ_3 main stress principal

axis. Extensional features, which are mode I cracks, form in strike-slip systems, in response to simple shear at about 45° to the master fault. This normal fault is possibly the visible strand of a pull-apart structure.

Co-existence of strike-slip faults with normal and reverse separation is typical (Biddle & Christie-Blick 1985, see also Scholz 1990). Compressional small scale structures observed are: pressure ridges, that is linear topographic highs bounded by faults, and pop-ups, that is uplifted small block, as well as trusts at 40° . In general the orientation and movement along right-stepping small fault branches has resulted in local compression that caused shortening and uplift. Figure 2 (a) and (b) shows typical reverse structures ($40-70^\circ$). On the contrary in local extension tension fractures have been developed at $130-130^\circ$ mainly, that is 40 to 45° to the master fault. Synthetic shears (R) Riedles stand at $100-110^\circ$ and (P) shears at 80° , while in 170° stands the antithetic (or conjugate Riedle R') shear and the Main right-lateral Displacement Zone at 90° , (fig.2).

MORPHOTECTONICS

Earthquake geology recently developed the study of Earth's surface (morphotectonics) for evidence of earthquake faulting. The most impressive morphotectonic structures in the region, which dominate the area, are the E-W elongated Gulf of Izmit, the lake Sapanca and the Tepetarla-Arifiye elongated too, valley. The gulf is in fact a 50km long and 10 average width prolongation of the sea inland, along the northwestern branch of NAFZ (see also fig. 1). In smaller scale the Tepetarla-Yaylacik morphology has been studied in detail by topographic sections, DEM construction (ARCINFO and ARCVIEW) and consequently landscape analysis, as the most typical example of the region. Both morphology and Plio-pleistocene deposit stratigraphy indicate the fault migration northwards (fig. 3) up to linear E-W elongated valley where the 1999 ruptures appeared.

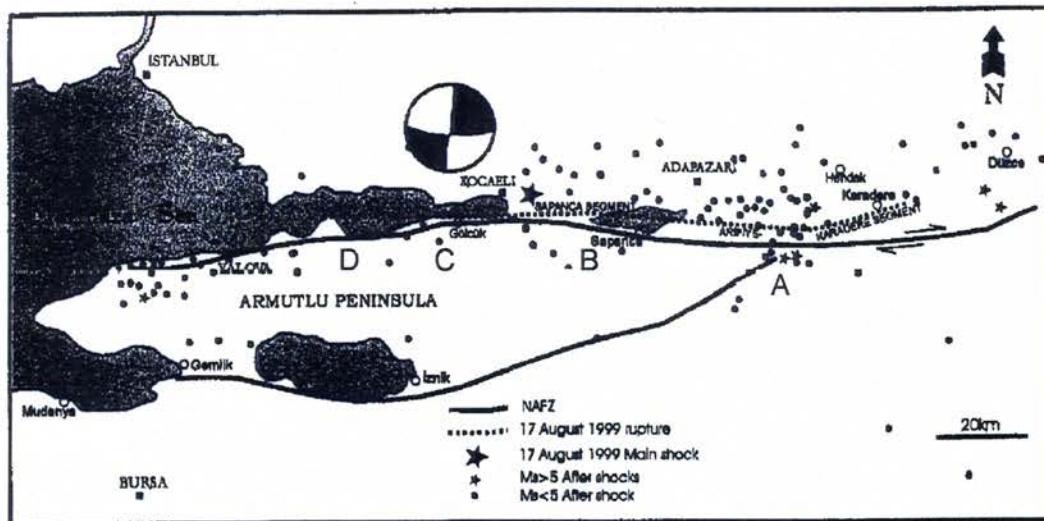
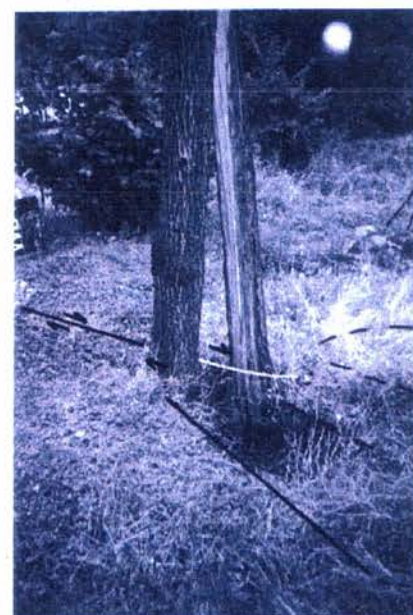
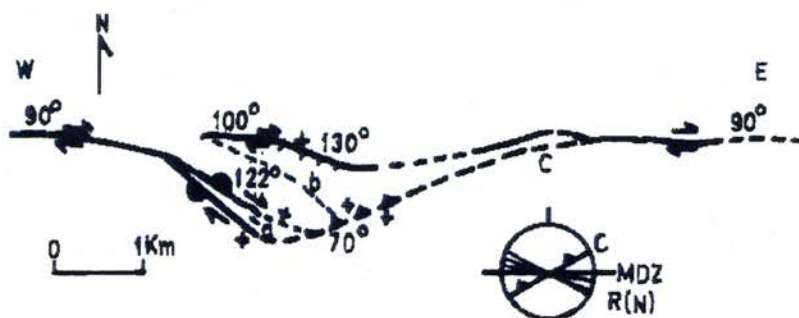
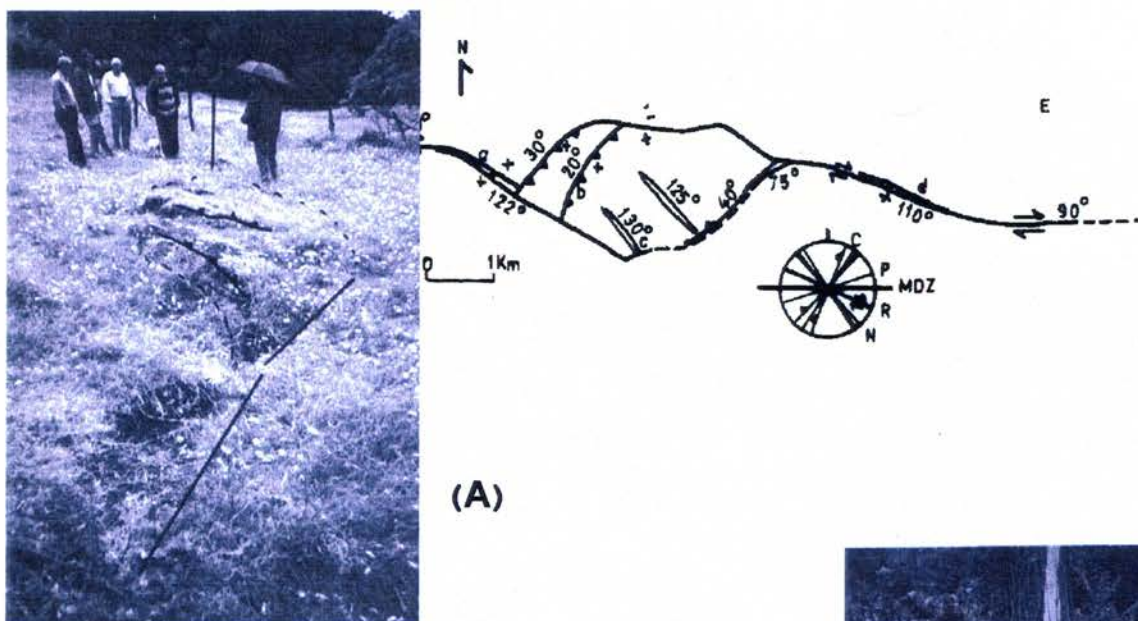
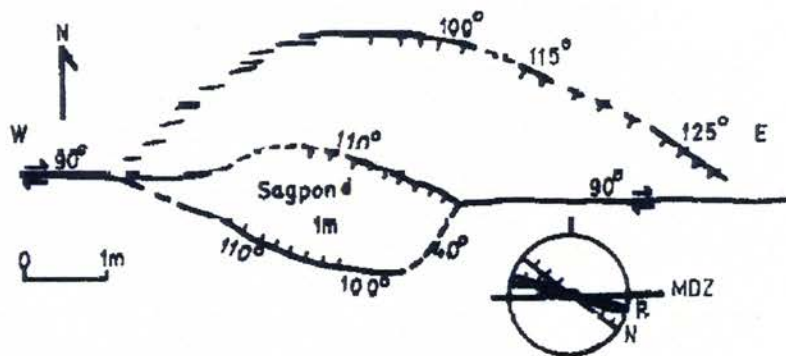


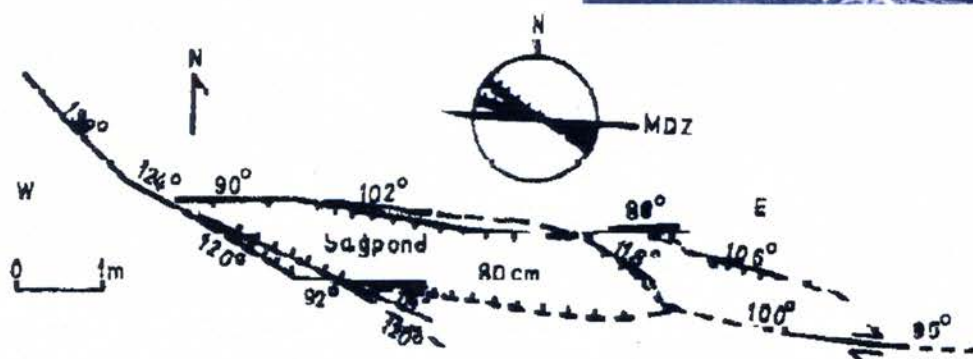
Fig. 1. The surface ruptures of the 17th August 1999 ($M_w=7.4$) Izmit earthquake with the four distinct "segments" (or branches) named from east to west: A. Karadere; B. Arifiye; C. Sapanca-Golcuk; D. Izmit Gulf. In general the co-seismic fault ruptures are linear and could be divided into two typical segments. NAFZ: North Anatolian Fault Zone (western strands), (after Z. Tutkun et al 1999, 2000 unpublished).



(B)



(C)



(D)

Fig. 2. Representative detailed mapped small scale features along the right-lateral strike-slip Izmit co-seismic fault. A) Geometry of a Pressure Ridge at Tepetarla and the angular relation among structures (small

circle), MDZ: master Displacement Zone, C: contractional structures, N: normal or Tension fractures, P and R shears; right the corresponding photograph. B) Displaced poplar (kavak) at Tepetarla, diagram in map view, at a: strike-slip displacement $D=37\text{cm}$, Opening $O=28\text{cm}$; at b: $D=10\text{cm}$, vertical Displacement $D'=60\text{cm}$, $O=35\text{cm}$; right the corresponding photograph. C) and D) Sag-pond geometry at Arifiye (sketches and photographs).

Several neotectonic and geomorphic observations along the fault indicate Quaternary activity. Yavlacik hill (a) where the new apartment buildings on the fault trace totally collapsed, is a typical shutter ridge, which controls the drainage diversion. The "Mahmut pasa ciftligi" can be also characterized as a large scale elongated E-W shutter hill (b) the most characteristic small shutter ridge is the 10m long (E-W) and 3m width (c) in the center of the E-W elongated small valley, southern of "Mahmut pasa" hill, along the recent seismic traces (fig. 3).

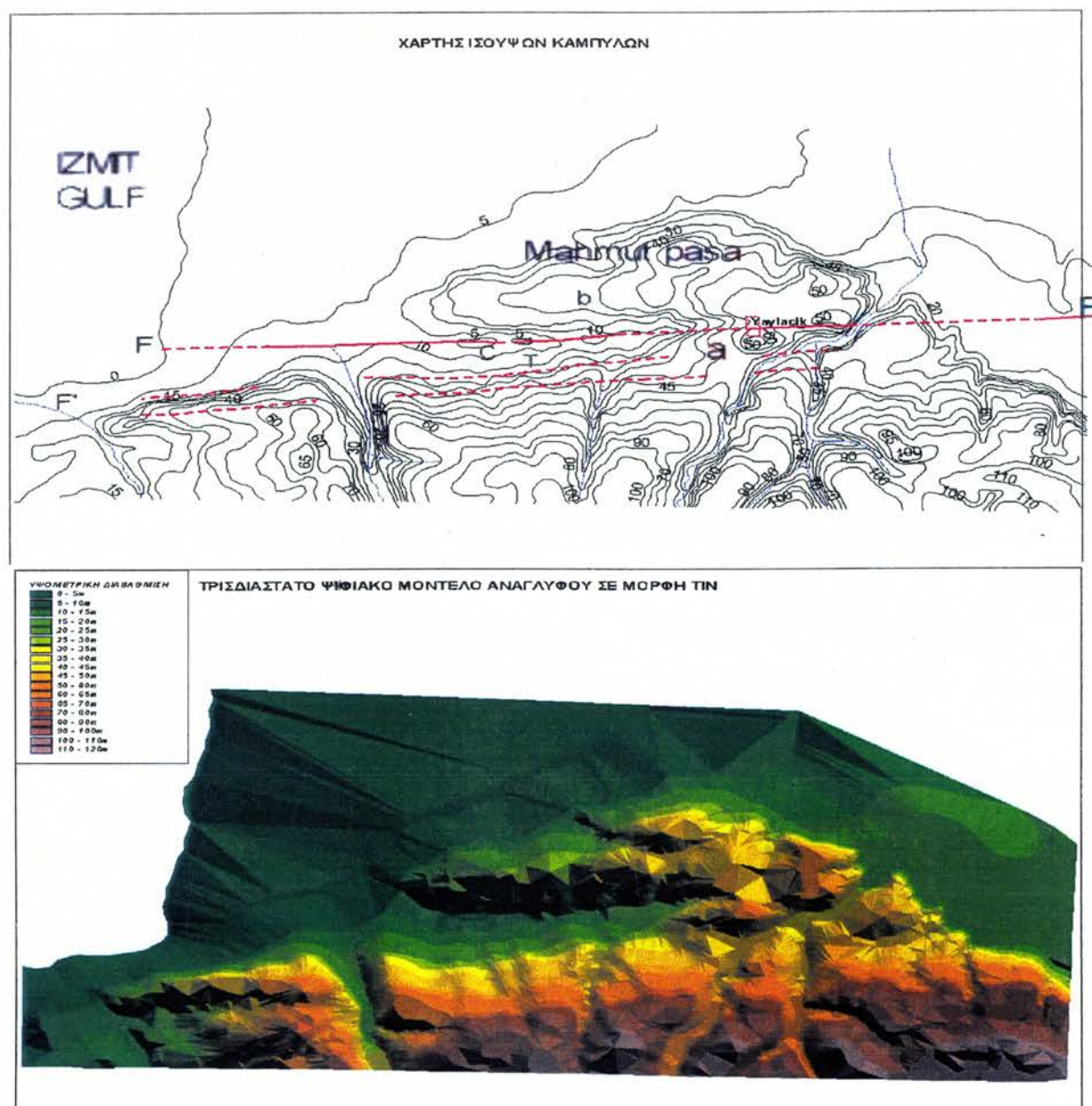


Fig. 3. Top: Topographic map part of Sapanca-Gölcük segment at Mahmut pasa ciftligi (between Yaylacik and Yuvacik villages) F: 1999 co-seismic fault traces; F': pre-existing faults (in geological terms); a,b,c : shutter ridges; T: trenches. Down: Digital probable Elevation Model (DEM) of the landscape at the same area.

We have begun a programme of trenching across the fault in order to obtain fundamental data for the evaluation of past activity. Two trenches on the fault traces have been excavated (fig. 3; T), 8m long and 4m deep in order to look for paleo fossilized seismic structures or paleo-earthquakes (fig. 4). They show three at least layers and the superficial recent soil, named a) 2m thick dark soil; b) 1m yellow sandy mud, possibly of paleo sag ponds deposits, and c) 1m dark paleo soil with few pebbles. They are in typical horizontal position, but disaccommodated. Structural features, that is joints (cracks), seismites and paleo-liquefaction, associated with the fault and identified from sampled and C14 dated. This fault segment is possibly associated with the 1894 and 1878 earthquakes

(Papadimitriou et al 2000; Ambraseys 2001), as well as with the strong shocks of the 18th century (1719 and 1754).

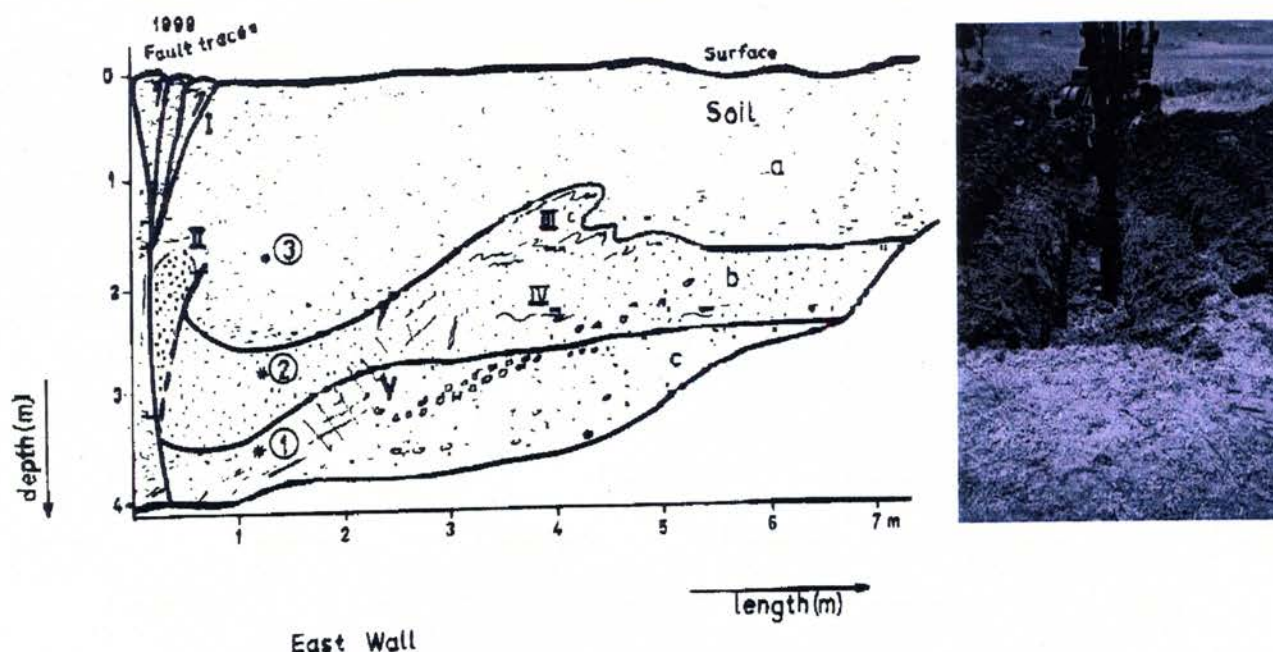


Fig. 4. Trench (Izmit-I, East wall) where the three distinct layers are shown (a: soil; b: sandy mud (clays); c: soil, possibly of palaeo-sag-pond origin), the 1999 fault (contactational) with the small-scale flower structure (I), liquefaction (II and III), seismites (IV) and cracks (V). Sampling sites 1: 11,800 \pm 40 years BP; 3: 120 \pm 40 years BP (Radiocarbon Analysis, The University of Georgia, USA) Photograph: excavation works.

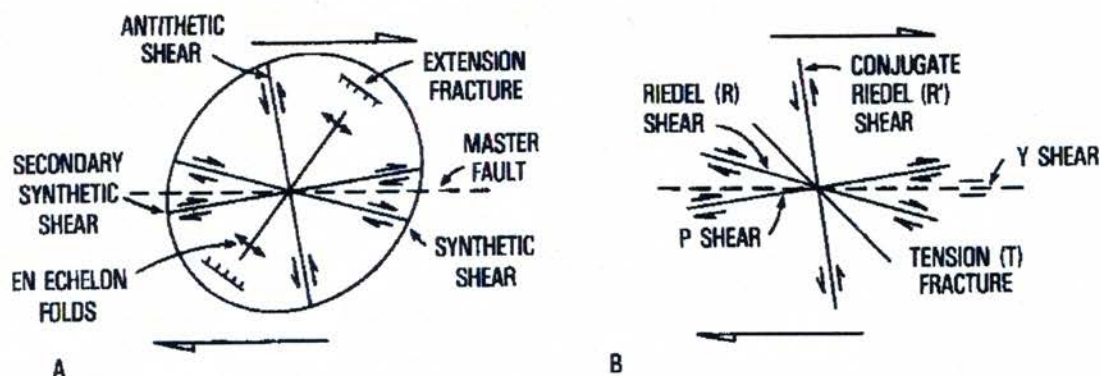


Fig. 5. The angular relations between structures in right-lateral simple shear conditions (Biddle & Christie-Blick 1985) that tend to form the measured small and medium size structures of the 1999 Izmit earthquake surface fault traces.

CONCLUSIONS

The co-seismic rupture is not a single break, instead it is composed of numerous small scale structures 2 to 10 m long, that is tension fractures and contractional structures, e.g. pressure ridges, pop ups, sag-ponds, and Riedel synthetic shears controlled by the master fault displacement were studied. Some representative measurements and the corresponding sites are given in the figure 2. Reasonable and quantitative explanation for the observation that either subsidence or uplift takes place, is given. Primary structures on the sedimentary cover along the activated 1999 fault are close to those predicted by an idealized strain

ellipse for right lateral shear (fig. 5). They are analogues to the North Anatolian Fault Zone. In macro scale and on the base of surface geometry, the total length of the 1999 Izmit fault can be divided into two main segments and some shorter slightly overstepping branches. Representative morphotectonic and trenching tectonostratigraphy at Sapanza-Gölcük segment clearly show the Holocene-historical (200 to 11,000 years BP C14) development of the fault at the present site.



Fig. 6. Left (a) Normal fault subparallel (strike N 106°) strand to Gölcük-Sapanca "segment" (Asagiyuvacik) with vertical displacement of 40 cm. This strand is lying 50 m southern to master dextral displacement fault where D was 1.10-1.20 m horizontal. Right (b). The right - lateral fault zone at Tepetarla D=1.20 m.

REFERENCE

- Ambraseys N. 2001. The earthquake of 10 July 1894 in the Gulf of Izmit and its relation to the earthquake of 17 August 1999. *J.Seism.* 8: 117-128.
- Ambraseys N.N. & Zatopec, A. 1969. The Mudurnu Valley, Western Anatolia, Turkey, Earthquake of 22 July 1967. *Seismol. Soc. Amer. Bull.*, 59, 521-589.
- Awata, Y. Yoshioka, T. Emre, O. Duman, T.Y., Dogan, A. Tsukuda, E. 2000. Segment structures of the surface ruptures associated with the August 17, 1999 Izmit Earthquake, Turkey, XXVII Gen. Assem. ESC, Abstracts and Papers, Lisbon, Portugal, 10-15 September 2000.
- Barka, A. 1999. The August 17th, 1999 Izmit earthquake. *Science*, 285, 1858-1859.
- Barka, A. 2000. The August 17 and November 12 1999 earthquakes in the eastern Marmara sea region. "Active Fault Research for the New Millennium" Proc. HOKUDAN Intern. Symp. January 17th-26th, 2000, S1-S6
- Barka, A. and Kadinsky-Cade, K., 1988, Strike-slip fault geometry in Turkey and its influence on earthquake activity. *Tectonics* 7, 663-684.
- Biddle & Christie-Blick 1985. Strike-slip deformation, basin formation, and sedimentation. *Soc. Econ. Paleontol. & Mineral. Special Publ.* No 37, 386 pp.
- Emre, O., Erkal, T., Tchepalyga, A., kazanci, N., Kecer, M. and Unay E. (1998). Neogene-Quaternary evolution of the Eastern Marmara Region, northwest Turkey. *Bull. MTA* 120, 211-234.
- Ergin, M., Tapirdamaz, C.Yorul, A., Cetin, S., Tarancioglu, A., Ozalaybey, S., 2001. 5th Intern. Symp. Eastern Mediterranean Geology, May 2001, Isparta, Turkey, Abstract Vol, 176.
- Lekkas, L.E. 2001. Parameters of Intensity distribution in the Izmit and Duzce (Turkey) earthquakes. (This volume).
- Papadimitriou, E.E., Karakostas, V.G., Papazachos, B.C., 2000. Rupture zones in the area of the 17.08.99 Izmit (NW Turkey) large earthquake (Mw 7.4) and stress changes caused by its generation. *J. Seism.*, 1-8.
- Scholz, Ch. 1990. The mechanics of earthquakes and faulting. Cambridge University Press 1990. pp. 1-439
- Tutkun, S.Z. Kavak, S., Ozden, O. Tatar, Dogan, B. 1999. Surface deformation and aftershocks distribution of the 17 August 1999, Marmara



Fig. 6. Left (a) Normal fault subparallel (strike $N 106^\circ$) strand to Gölcük-Sapanca "segment" (Asagiyuvacik) with vertical displacement of 40 cm. This strand is lying 50 m southern to master dextral displacement fault where D was 1.10-1.20 m horizontal. Right (b). The right - lateral fault zone at Tepetarla $D=1.20$ m.

REFERENCE

- Ambraseys N. 2001. The earthquake of 10 July 1894 in the Gulf of Izmit and its relation to the earthquake of 17 August 1999. *J.Seism.* 8: 117-128.
- Ambraseys N.N. & Zatopec, A. 1969. The Mudurnu Valley, Western Anatolia, Turkey, Earthquake of 22 July 1967. *Seismol. Soc. Amer. Bull.*, 59, 521-589.
- Awata, Y. Yoshioka, T. Emre, O., Duman, T.Y., Dogan, A. Tsukuda, E. 2000. Segment structures of the surface ruptures associated with the August 17, 1999 Izmit Earthquake, Turkey, XXVII Gen. Assem. ESC, Abstracts and Papers, Lisbon, Portugal, 10-15 September 2000.
- Barka, A. 1999. The August 17th, 1999 Izmit earthquake. *Science*, 285, 1858-1859.
- Barka, A. 2000. The August 17 and November 12 1999 earthquakes in the eastern Marmara sea region. "Active Fault Research for the New Millennium" Proc. HOKUDAN Intern. Symp. January 17th-26th, 2000, S1-S6
- Barka, A. and Kadinsky-Cade, K., 1988, Strike-slip fault geometry in Turkey and its influence on earthquake activity. *Tectonics* 7, 663-684.
- Biddle & Christie-Blick 1985. Strike-slip deformation, basin formation, and sedimentation. *Soc. Econ. Paleontol. & Mineral. Special Publ.* No 37, 386 pp.
- Emre, O., Erkal, T., Tchepalyga, A., kazanci, N., Kecer, M. and Unay E. (1998). Neogene-Quaternary evolution of the Eastern Marmara Region, northwest Turkey. *Bull. MTA* 120, 211-234.
- Ergin, M., Tapirdamaz, C.Yorul, A., Cetin, S., Tarancioglu, A., Ozalaybey, S., 2001. 5th Intern. Symp. Eastern Mediterranean Geology, May 2001, Isparta, Turkey, Abstract Vol, 176.
- Lekkas, L.E. 2001. Parameters of Intensity distribution in the Izmit and Duzce (Turkey) earthquakes. (This volume).
- Papadimitriou, E.E., Karakostas, V.G., Papazachos, B.C., 2000. Rupture zones in the area of the 17.08.99 Izmit (NW Turkey) large earthquake (Mw 7.4) and stress changes caused by its generation. *J. Seism.*, 1-8.
- Scholz, Ch. 1990. The mechanics of earthquakes and faulting. Cambridge University Press 1990. pp. 1-439
- Tutkun, S.Z. Kavak, S., Ozden, O. Tatar, Dogan, B. 1999. Surface deformation and aftershocks distribution of the 17 August 1999, Marmara

-
- Earthquake and its Neotectonic significance. Intern. Conf. EHRMR '99, Near East University 18-22 October 199, Nicosia, North Cyprus. (Abs)
- Tutkun, Z., Gürer, O.F., Dogan, B. 2000. 17th August 1999 Izit (M 7.4) and 12th November 1999 Düzce (M 7.2) Earthquakes. Excursion book, Kocaeli University. 6 pp.
- Youd Leslie et al.(Eds), 2000. EARTHQUAKE SPECTRA, Kocaeli, Turkey Earthquake of August 17, 1999. Special Issue, Supplem. to Vol. 16, Publ. No 2000-03.

TABLE I. Representative measurements of small scale features along the right-lateral strike-slip Izmit co-seismic fault. All measurement are given in degrees from North (strike). MDZ: Master Displacement Zone; P and R Riedel Shears; Ex: Tension fractures-normal faults; C: Contractional (compressional) R' shear (antithetic); Dh: horizontal (dextral) Displacement; Dv: vertical and H: heave (opening)

Göltçük-Kavaklı-FORD

MDZ	P	R	Ex	C	R'	Dh	Dv	H
90°	-	-	-	-	-	3.50	-	-
90°	-	-	125°	-	-	0.20	1.80	-
-	-	-	130°	-	-	0.30	2.00	-
-	-	-	140°	-	-	-	-	-
-	-	-	135°	-	155°	-	-	-
-	-	-	130°	-	170°	0.30	1.50	-
82°	-	-	-	-	-	0.90	-	-
85°	-	-	-	-	-	2.60	-	-
90°	-	-	-	-	-	2.80	-	-

Tepetarla

MDZ	P	R	Ex	C	R'	Dh	Dv	H
90°	-	100°	130°	40°	-	0.10	0.60	0.35
90°	80°	-	122°	70°	-	0.37	-	0.28
90°	-	-	132°	55°	-	-	0.30	-
90°	-	-	122°	30°	-	-	0.80	0.10
90°	-	110°	130°	20°	-	-	-	-
90°	-	105°	115°	-	-	-	-	-
100°	-	110°	-	70°	-	-	-	-

Asagiguvacik village (Göltçük-İmit area)

MDZ	P	R	Ex	C	R'	Dh	Dv	H
90°	82°	105°	130°	-	-	2.5	-	-
94°	88°	(110°)	120°	-	-	2.5	0.80	-
96°	-	-	115°	-	-	-	0.60	-
100°	-	-	120°	-	-	-	0.42	-
			130°				0.55	

Mustapha pasa-Yaylacik

MDZ	P	R	Ex	C	R'	Dh	Dv	H
100°	-	110°	125°	50°	-	2.3	-	-
100°	-		125°	40°		-	-	
85°	-	110°	130°	40°	-	-	-	0.1
90°	-	115°	140°	43°	-	-	-	-
90°	80°	110°	135°	-	170°	-	-	0.2
90°	-	115°	140°	50°	-	-	-	0.18
90°	78°	106°	120°	55°	-	-	-	-
100°	-	110°	122°	70°	-	-	-	0.30
90°	80°		124°	60°	-	-	-	
95°	80°	-	130°	-	185°	-	-	-
92°	80°	-	120°	-	-	-	0.42	-

Sapanca-Arifiye

MDZ	P	R	Ex	C	R'	Dh	Dv	H
105°	-	135°	125°	50°	-		0.10	-
90°	-	120°	125°	40°			-	1.50
92°	-	102°	124°	-	-	-	0.80	-
88°	-	106°	138°	-	-	-	0.40	-
95°	80°	114°	125°	-	-	-	0.45	-

90°	-	110°	128°	-	-	-	1.00	-
90°	78°	110°	130°	-	-	-	-	-
90°	-	115°	135°	-	-	-	0.50	-
90°	80°	100°	132°	-	-	-	-	-

5.3 Παράρτημα Γ'

IX International Symposium on Natural and Human-made Hazards – Disaster Mitigation in the Perspective of the New Millenium, Antalya, Turkey, 3-5 October 2002.

PALEOSEISMOLOGY OF THE 1999 GÖLCÜK NORMAL FAULT FROM TRENCH INVESTIGATION

Pavlidis S., Chatzipetros A. (Aristotle University of Thessaloniki, Greece)

Turtkun Z., Özaksoy V. (Çanakkale University, Turkey) and Dogan B. (Istanbul Technical University, Turkey)

During the 1999 Izmit (Kocaeli) strong earthquake a NW-SE trending 4 to 5 km long normal fault segment emerged on surface with 1.52 m maximum vertical displacement and 0.30 m right-lateral component. The co-seismic surface rupture was mapped in detail, while two trenches were opened at Düzitiz Evler site near Gölcük (September 2001). Preliminary results from the latter trench (8x40m) show that Pliocene sedimentation type and ages are similar to that resulted from two previous trenches dug on the 1989 earthquake fault traces at Ağaçyuvack (June 2000), 5.980 ± 1.240 and 1.150 yr (C-ages). Sedimentation type and ages are similar to that resulted from the penultimate event had displaced the same sediments 0.70 m and a previous event 0.20 m. Displacement is not characteristic, as the fault associated soft recent detritic deposits and the fault itself is not a co-seismic fault, but a secondary accommodation structure in geometrical consistency with the right-lateral main displacement zone. These data have been combined from similar data and results raised from Ağaçyuvack-Yaylak-Ağısu between Izmit and Sapanca lake. The same fault segment seems to be activated and produced surface ruptures during recent historical events.



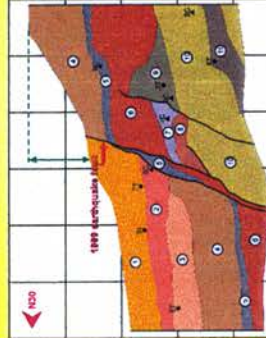
Surface rupture (red) of the 1999 Izmit earthquake.



Map of the Gölcük normal fault, originally mapped in 1:20,000 scale. The diagram at the lower left corner shows the lower hemisphere equal-area projection of the focal mechanism solution (M02). It is a secondary normal structure activated during the 1999 earthquake as a gravitational rather than a tectonic structure.

Paleoseismology along Gölcük fault

Trenching at Düzitiz Evler site along the Gölcük fault zone (NW-SE striking, NE dipping), has revealed that two paleoearthquakes have been produced by the same fault, according to the total cumulative vertical displacement, which largely exceeds the 1999 one, as well as the existence of older faults that do not reach the surface and have not been activated during the recent earthquake.



Log of the stratigraphic column of the Düzitiz Evler site along the Gölcük fault zone. The column is divided into layers labeled 1 to 10. The 1999 earthquake fault is indicated by a red line passing through layers 1 to 10. Sample 1C is located in layer 10.



Photograph of the fault zone at the Düzitiz Evler site. The image shows a cross-section of the fault zone with layers labeled 1 to 10. A scale bar indicates 0 to 10 m.

Stratigraphy of DE-1 trench
The trench was opened at the Düzitiz Evler site along the Gölcük fault zone. The trench is 12 m long and 1.5 m wide. The stratigraphic column is divided into layers labeled 1 to 10. The 1999 earthquake fault is indicated by a red line passing through layers 1 to 10.

Morphotectonic features along Gölcük fault

The surface ruptures along the Gölcük fault zone had a vertical displacement that reached up to 2 meters (1.5 m at Düzitiz Evler site), while it was minimized towards its both edges. Along its length, the fault produced features such as en echelon surface fissures, steep fresh scarp faces, pods, tilted trees, etc.



Photograph of the surface rupture along the Gölcük fault. The image shows a cross-section of the fault zone with layers labeled 1 to 10. A scale bar indicates 0 to 10 m.

5.4 Παράρτημα Δ'

International Workshop on the North Anatolian, East Anatolian and Dead Sea Fault Systems: Recent Progress in Tectonics and Paleoseismology, and Field Training Course in Paleoseismology, Ankara, Turkey, 31 August – 12 September 2003

Trenching Along the Gölcük 1999 Normal Fault: Evidence for Repeated Recent Seismic Activity

Spyros Pavlides¹, Zeki Tutkun², Alexandros Chatzipetros^{1,*}, Volkan Özaksoy³ & Bülent Doğan⁴

¹ Aristotle University, GR-54124 Thessaloniki, Greece

² Çanakkale 18 Mart University, TR-17020 Çanakkale, Turkey

³ MTA, TR-06520, Ankara, Turkey

⁴ İ.T.Ü., Istanbul, Turkey

The 1999 seismic fractures of both Izmit and Duzce earthquakes covered a large area in north-western Turkey, being aligned in a more or less E-W to NE – SW astrike. However, at its westernmost end, the Izmit earthquake fracture system formed a prominent normal fault scarp just east of the city Gölcük. This normal fault had a vertical displacement of up to two metres, featuring an almost pure normal displacement vector and causing major damage in buildings and infrastructures.

Döniz Evler site is located at about the middle of Gölcük normal fault, east of Kavaklı. At this site the fault scarp had a 1.5 m displacement. Trenching at this site revealed that the stratigraphy consisted of fluvial sediments at the top, switching to lake deposits at the bottom of the trench. Evidence for three prior events is present in the trench, each one displacing the layers by less than the 1999 one. Most of the displacement took place in the main fault zone, which is the same that produced the 1999 one, but there were also faults that died up, indicating that they were activated only once. Analysis of the microstratigraphy has shown that there is an abrupt change of facies at the footwall (lake – fluvial) possibly connected with an earthquake event at the main fault.

Trenching in other sites along the 1999 Izmit earthquake fractures, such as Aşağı Yuvacık, Yaylacık (west of Kullar) and Acısü, has shown that along its entire length this seismic fault has been reactivated in the past, regardless of the nature of displacement (strike-slip, reverse or normal). Pottery fractures found in several deformed layers in various trenches, indicate that the same faults were activated in historical times.

It is concluded that three events have preceded the 1999 one in Gölcük area, while in other places along the 1999 Izmit earthquake fracture there was evidence for at least one paleoearthquake during historical times.

Keywords: paleoseismology; north Anatolian fault zone; normal fault; Izmit earthquake; western Turkey

* Presenting author.

E-mail address: ac@geo.auth.gr (A. Chatzipetros).