

# Αστοχίες και Επιτυχίες Δομημάτων επί Ρήγματος: Περιστατικά από τον Σεισμό της Νικομήδειας 1999

## Failures and Successful Performance of Buildings Subjected to Fault Induced Displacement : Case Histories from the Kocaeli 1999 Earthquake

ΑΝΑΣΤΑΣΟΠΟΥΛΟΣ, Ι.  
ΓΚΑΖΕΤΑΣ, Γ.  
ΣΙΓΑΛΑΣ, Ι.Ν.  
ΠΑΥΛΙΔΗΣ, Σ.

Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Μεταδιδάκτωρ Ερευνητής Ε.Μ.Π.  
Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής Ε.Μ.Π.  
Πολιτικός Μηχανικός, Εργαστήριο Ωπλ. Σκυροδέματος, Ε.Μ.Π.  
Δρ. Γεωλόγος, Καθηγητής Α.Π.Θ.

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ :** Ο σεισμός  $M_w$ 7.4 της Νικομήδειας προκάλεσε κανονικές διαρρήξεις έως και 2.5 m στην λεκάνη διεφελκυσμού του Gölcük, οι οποίες επηρέασαν πλήθος κατασκευών στον οικισμό του Denizevler. Πολλές από αυτές κατέρρευσαν ή υπέστησαν σοβαρές βλάβες. Έκπληξη όμως προκάλεσε το γεγονός ότι αρκετές απλές κτιριακές κατασκευές “επιβίωσαν” των τεκτονικών μετακινήσεων ουσιαστικώς ανέπαφες. Το παρόν άρθρο παρουσιάζει και τεκμηριώνει τα εν λόγω ιστορικά περιστατικά με έμφαση στην Αλληλεπίδραση Διαρρήξεως–Εδάφους–Θεμελίου–Ανωδομής (ΑΔΕΘΑ). Κατόπιν, οι κατασκευές αναλύονται μία προς μία με χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων, προκειμένου να διερευνηθεί ο ρόλος της ΑΔΕΘΑ στην επιτυχή ή μη απόκρισή τους.

**ABSTRACT :** The  $M_w$ 7.4 Kocaeli earthquake caused normal fault ruptures of up to 2.5 m offset in the pull-apart basin of Gölcük. Some of these ruptures crossed several residential structures in the community of Denizevler. As expected, several structures collapsed or were severely damaged. Surprisingly however, some of them managed to survive the imposed tectonic displacements essentially unscathed. This article first presents and documents these case-histories with emphasis on Fault Rupture–Soil–Foundation–Structure Interaction (FR-SFSI). The structures are then analysed one by one utilizing finite element modeling, to reveal the role of FR-SFSI in their successful or unsuccessful performance.

### 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

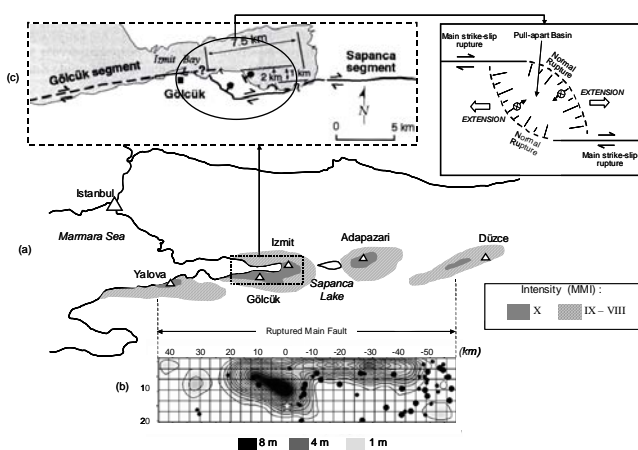
Ο καταστροφικός σεισμός  $M_w$ 7.4 της Νικομήδειας (Τουρκία) προκλήθηκε από επαν-ενεργοποίηση του ρήγματος οριζόντιας διάτμησης της Βόρειας Ανατολίας, προξενώντας κανονική διάρρηξη στην λεκάνη διεφελκυσμού του Gölcük. Αποτέλεσμα αυτής της διάρρηξης ήταν επιφανειακοί αναβαθμοί που έφτασαν σε ύψος σχεδόν τα 2.5 m. Η επιφανειακή εκδήλωση της διάρρηξης διέσχισε αρκετές κατασκευές. Όπως αναμένονταν, πολλές από αυτές είτε κατέρρευσαν ή υπέστησαν σοβαρές βλάβες. Έκπληξη προκάλεσε το γεγονός ότι αρκετές από αυτές επέζησαν της διαρρήξεως πρακτικά ανέπαφες.

Σε ορισμένες μάλιστα περιπτώσεις η διαδρομή της επιφανειακής διάρρηξης έδειχνε να εκτρέπεται προκειμένου να “αποφύγει” την κατασκευή. Σε άλλες περιπτώσεις οι βλάβες ήταν σημαντικές, παρότι η διάρρηξη εμφανίζονταν να έχει “απορροφηθεί” από τις επιφανειακές εδαφικές στρώσεις, μη δημιουργώντας καν ευδιάκριτο αναβαθμό. Η δυσκαμψία της θεμελίωσης φαίνεται ότι επηρέασε σημαντικά την απόκριση των διερευνηθέντων δομητικών συστημάτων. Είναι ενδιαφέρον ότι οι διερευνηθείσες κατασκευές ήταν θεμελιωμένες με ποικιλία τύπων θεμελίωσης, από μεμονωμένα πέδιλα, έως δύσκαμπτες κιβωτιοειδείς θεμελιώσεις, και πασσαλο-θεμελιώσεις.

Καταρχάς, το άρθρο παρουσιάζει την επί τόπου αναγνώριση που εκτελέσαμε στην περιοχή, την τεκμηρίωση των ιστορικών περιστατικών αλληλεπίδρασης ανάμεσα στην επιφανειακή διάρρηξη, το έδαφος, και την κατασκευή, καθώς και τα αποτελέσματα της γεωτεχνικής έρευνας και διερευνητικών ορυγμάτων. Στην συνέχεια κάθε ένα από τα ιστορικά περιστατικά αναλύεται αριθμητικά, ώστε να διαφανούν οι βασικές πτυχές της ΑΔΕΘΑ, αλλά και προκειμένου να αναπτυχθεί βαθύτερη κατανόηση των μηχανισμών που διέπουν την επιτυχή απόκριση κατασκευών επί ενεργών σεισμικών ρηγμάτων.

## 2. Ο ΣΕΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΝΙΚΟΜΗΔΕΙΑΣ

Ο σεισμός του 1999 προκλήθηκε από επαν-ενεργοποίηση τμήματος μήκους 125 km του Ρήγματος της Βόρειας Ανατολίας (ΡΒΑ). Με το επίκεντρό του μόλις 5 km νοτιοδυτικά της πόλης της Νικομήδειας, ο σεισμός έπληξε την βιομηχανοποιημένη ζώνη περί την Θάλασσα του Μαρμαρά, προξενώντας περισσότερους από 30.000 θανάτους. Μεταξύ της Yalova και του Düzce, πάνω από 100.000 κατασκευές υπέστησαν σοβαρές βλάβες ή κατέρρευσαν. Στις πόλεις Izmit, Gölcük, και Adapazarı περισσότερα από το ένα τρίτο των κτισμάτων κατέρρευσαν ή υπέστησαν ανεπανόρθωτες βλάβες, με την Κλίμακα Mercalli (MMI) να κυμαίνεται από VIII έως X (Σχ. 1a).



**Σχήμα 1.** Ο Σεισμός της Νικομήδειας 1999 :

(a) Ένταση βλαβών (MMI), (b) οριζόντια μετατόπιση κατά μήκος του ρήγματος, και (c) η λεκάνη διεφελκυσμού του Gölcük.

**Figure 1.** The 1999 Kocaeli Earthquake :

(a) Damage Intensity Distribution (MMI), (b) horizontal slip distribution on the vertical plane of the fault, and (c) the step-over mechanism.

Ο σεισμός προκάλεσε επιφανειακή διάρρηξη συνολικού μήκους >110 km, με μέγιστη δεξιόστροφη μετατόπιση έως και 5 m (Σχ. 1b). Δεδομένου του πληθυσμού της περιοχής, δεν προξενεί εντύπωση το ότι επιφανειακές διαρρήξεις διέσχισαν αρκετές αστικές περιοχές. Αντιθέτως, εντύπωση προκαλεί το γεγονός ότι υπήρξαν αρκετές κατασκευές οι οποίες επέζησαν της επιβληθείσας τεκτονικής μετακίνησης δίχως σημαντικές βλάβες. Παρότι ο βασικός μηχανισμός διάρρηξης του ΡΒΑ ήταν η οριζόντια διάτμηση, η έρευνά μας επικεντρώθηκε στην κανονική διάρρηξη που εμφανίσθηκε στην λεκάνη διεφελκυσμού του Gölcük, όπου η μετατόπιση του ΡΒΑ μετετρέπη τοπικά σε κανονική (προς τα κάτω) μετακίνηση.

Η λεκάνη διεφελκυσμού του Gölcük (Σχ.1c) ήταν η μία από τις τέσσερις που συνδέονται με τον σεισμό του 1999. Η διαφορική μετακίνηση του τμήματος του Gölcük δημιούργησε κανονικό ρήγμα 4 km ΒΔ-ΝΑ διεύθυνσης ανατολικά της ομώνυμης πόλης, διασχίζοντας την μικρή κοινότητα του Denizevler. Η μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση ανήλθε σε 2.4 m, συνοδευόμενη από δεξιόστροφη συνιστώσα 1.3 m. Η γεωμετρία των διαρρήξεων, καθώς και η γεωμορφολογία της περιοχής, σε συνδυασμό με παλαιο-σεισμικές μελέτες επιβεβαιώνουν την τεκτονική προέλευση του περιστατικού [Pavlidis et al, 2003].

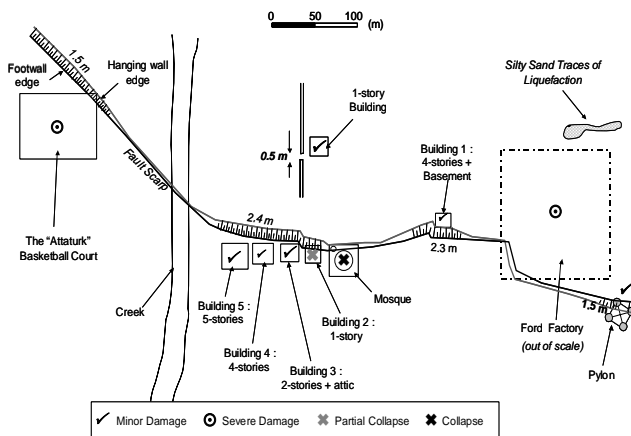
## 3. ΕΡΕΥΝΑ ΠΕΔΙΟΥ

Στην κοινότητα του Denizevler, η κανονική διάρρηξη “διέσχισε” αρκετές κτιριακές κατασκευές. Σε ακτίνα < 1 km, πέντε κτίρια κατοικίας, ένα τζαμί, ένα γήπεδο καλαθοσφαίρισης, τα δομήματα ενός εργοστασίου αυτοκινήτων, καθώς κι ένας πυλώνας ηλεκτρικού βρέθηκαν στην διαδρομή της διάρρηξης. Αν και η κατακόρυφη διαφορική μετακίνηση υπερέβη τα 2 m, ελάχιστες από τις κατασκευές αυτές κατέρρευσαν. Σε ορισμένες μάλιστα περιπτώσεις η επιφανειακή διάρρηξη εμφανίζονταν να παρεκκλίνει, ώστε να “αποφύγει” την κατασκευή.

Επειδή η θεμελίωση των εν λόγω κατασκευών περιλαμβάνει από μεμονωμένα πέδιλα έως κιβωτιοειδείς θεμελιώσεις και πασσαλομάδες, η δε σχετική θέση της διάρρηξης ως προς την κατασκευή διαφέρει από περίπτωση σε περίπτωση, το Denizevler μπορεί να ιδωθεί ως ένα πείραμα πραγματικής κλίμακας. Εξίσου ενδιαφέρον είναι το ότι οι

εδαφικές συνθήκες δεν διαφέρουν σημαντικά από θέση σε θέση. Ως εκ τούτου, οι διαφορές στην απόκριση μπορούν να αποδοθούν κατά κύριο λόγο στις διαφορές του τύπου και της δυσκαμψίας της θεμελίωσης, σε συνδυασμό με την σχετική θέση της διάρρηξης ως προς την κατασκευή.

Στο Σχ. 2 παρουσιάζεται σκαριφηματική κάτοψη της μελετηθείσας περιοχής. Γενικώς, η διάρρηξη αναδύθηκε στην επιφάνεια δημιουργώντας αναβαθμούς έως και 2.4 m. Αντιθέτως, σε ορισμένες περιπτώσεις δεν ήταν καν εύκολα αναγνωρίσιμη, μετατρέπόμενη σε εκτεταμένη διαφορική καθίζηση της επιφάνειας του εδάφους. Από την ανατολή προς δύση, μία πρώτη εντυπωσιακή επιτυχία ήταν αυτή ενός πυλώνα υψηλής τάσης. Στη συνέχεια, ένα από τα κτίρια του υπό κατασκευή εργοστασίου της Ford επίσης επέζησε της επιφανειακής διάρρηξης, με βλάβες όμως.



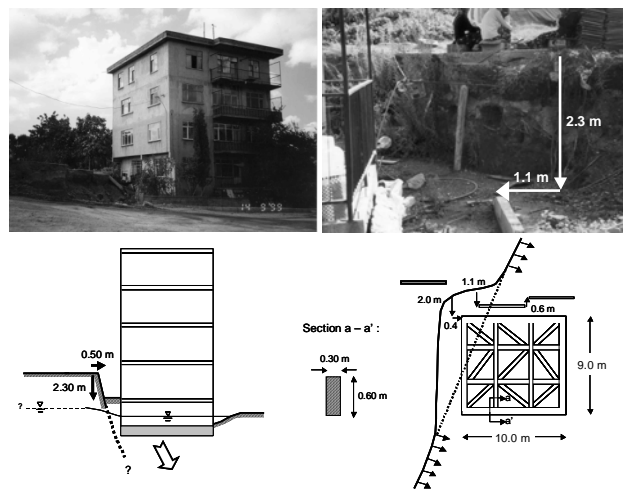
**Σχήμα 2.** Σκαρίφημα του Denizevler.  
**Figure 2.** Sketch of the region of Denizevler.

Προχωρώντας δυτικά, ένα 4-ώροφο κτίριο (1) δεν υπέστη την παραμικρή βλάβη. Αμέσως δυτικότερα, ένα Τζαμί υπέστη σοβαρότατες βλάβες, ενώ δίπλα του ένα μονώροφο κτίριο (2) κυριολεκτικά “εσχίσθη” στα δύο. Αμέσως δίπλα, ένα διώροφο κτίριο (3) παρέμεινε επί του “ανερχομένου” τεμάχους χωρίς να υποστεί οποιαδήποτε βλάβη. Άθικτα παρέμειναν και τα Κτίρια 4 και 5, ενώ το νεο-ανεγερθέν Κλειστό Γήπεδο “Attaturk”, παρά την “σοφιστευμένη” θεμελίωση με πασσάλους, υπέστη σοβαρότατες βλάβες.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα ευρήματα της διενεργηθείσας έρευνας πεδίου. Το ενδιαφέρον εστιάζεται στα Κτίρια 1, 2 και 3, και το Κλειστό Γήπεδο.

### 3.1 Κτίριο 1

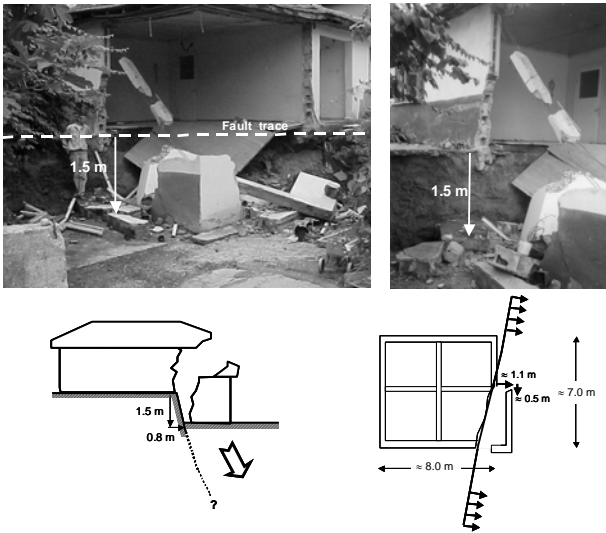
Πρόκειται περί 4-ωρόφου κτιρίου ωπλισμένου σκυροδέματος (ΩΣ) με υπόγειο, κατόψεως 9 m x 10 m (Σχ. 3). Η θεμελίωση αποτελείται από πεδילוδοκούς 0.6 m x 0.3 m (ύψος x πλάτος), συνδεδεμένες μεταξύ τους με συνδετήριες δοκούς αναλόγων διαστάσεων. Η επιφανειακή διάρρηξη εξετράπη, αφήνοντας την κατασκευή εντελώς άθικτη. Η καθίζηση έφτασε τα 2.3 m, συνοδευόμενη από οριζόντια συνιστώσα της τάξης του 1.1 m. Η μόνη προφανής βλάβη ήταν το πλημμύρισμα του υπογείου, λόγω τοπικής τροποποίησης του υδροφόρου ορίζοντα (Υ.Ο.).



**Σχήμα 3.** Κτίριο 1 : ουδεμία βλάβη.  
**Figure 3.** Building 1 : no damage.

### 3.3 Κτίριο 2

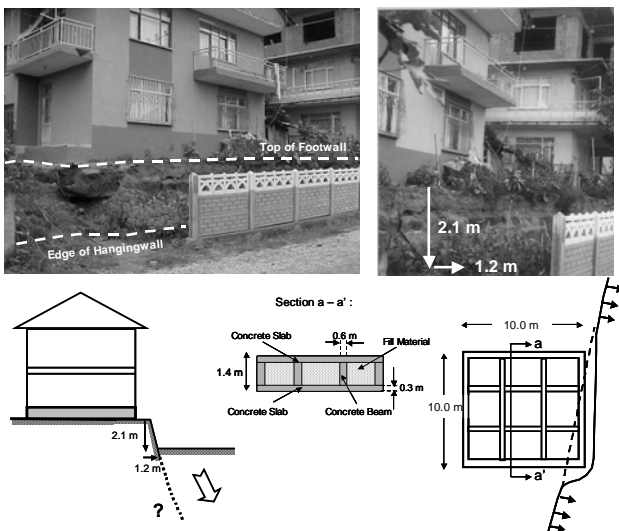
Το εν λόγω κτίριο (Σχ. 4) ήταν μια απλή χαμηλού κόστους μονώροφη κατασκευή. Η ξύλινη κεραμοσκεπή στηρίζονταν απευθείας επί τοίχων από τσιμεντόλιθους, με την παρεμβολή μιας ελαφρώς ωπλισμένης δοκού σκυροδέματος. Οι τσιμεντόλιθοι εδράζονταν απευθείας στο εδάφος, ουσιαστικά δίχως θεμελίωση. Μία τόσο πρόχειρη κατασκευή δεν θα περίμενε κανείς να αποκριθεί ικανοποιητικά σε επιβαλλόμενη μετατόπιση της τάξης του 1.5 m. Πράγματι, το κτίριο κυριολεκτικά “εσχίσθη” από την διάρρηξη. Παρόλα αυτά, δεν κατέρρευσε εντελώς, η δε μερική του κατάρρευση δεν συνοδεύτηκε από ανθρώπινες απώλειες. Η διάρρηξη διαπέρασε την βορειο-ανατολική γωνία του κτιρίου αποκολλώντας την από το υπόλοιπο.



**Σχήμα 4.** Κτίριο 2 : μερική κατάρρευση.  
**Figure 4.** Building 2 : partial collapse.

### 3.4 Κτίριο 3

Το 2-ώροφο (με σοφίτα) ΩΣ κτίριο, επέζησε της διάρρηξεως δίχως ορατές βλάβες. Όπως και στην περίπτωση του Κτ.1, η διάρρηξη εξετράπη. Όμως ενώ το Κτ.1 είναι θεμελιωμένο στο κατερχόμενο τέμαχος, εκτρέποντας την διάρρηξη προς το ανερχόμενο, το Κτ.3 είναι θεμελιωμένο στο ανερχόμενο τέμαχος, οπότε η 2.1 m διάρρηξη εξετράπη ελαφρώς προς το κατερχόμενο τέμαχος (Σχ. 5). Η κιβωτιοειδής θεμελίωση του κτιρίου είναι αρκετά δύσκαμπτη, αποτελούμενη από δοκούς ΩΣ (ύψους 0.5–0.6 m) εγκιβωτισμένες ανάμεσα στην κοιτόστρωση (πάχους 0.3 m) και την πλάκα δαπέδου. Τα κενά ανάμεσα στις δοκούς και τις πλάκες πληρούνται με αμμοχάλικο.



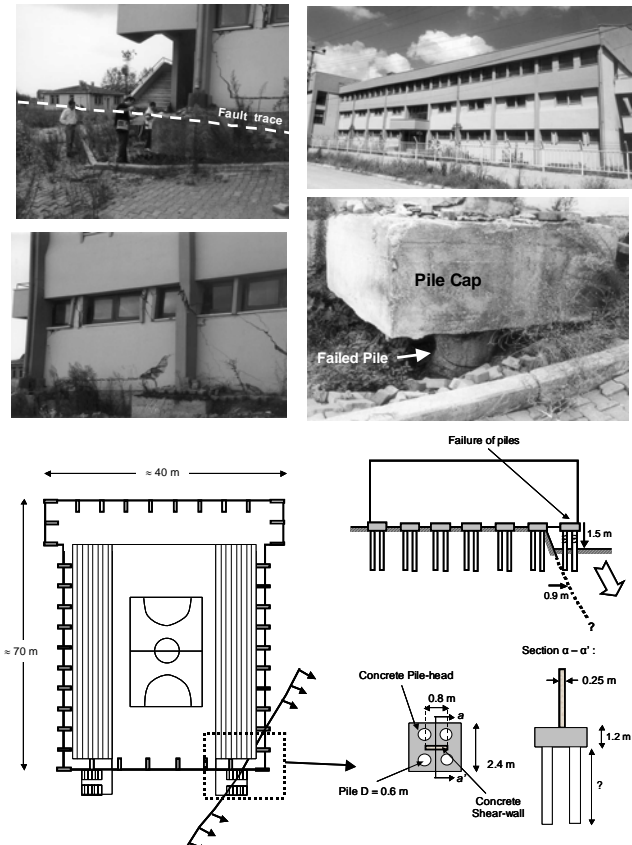
**Σχήμα 5.** Κτίριο 3 : ουδεμία βλάβη.  
**Figure 5.** Building 3 : no damage.

### 3.5 Το Κλειστό Γήπεδο Καλαθοσφαίρισης

Η διάρρηξη διέσχισε την ΒΑ γωνία του Γηπέδου προξενώντας σημαντικές βλάβες στην ΩΣ ανωδομή (Σχ. 6). Αντιθέτως, η νότια πλευρά του κτιρίου ουδεμία βλάβη υπέστη. Ως εκ τούτου, η αστοχία μπορεί να αποδοθεί αποκλειστικά στην τεκτονική μετατόπιση. Το δομητικό σύστημα αποτελείται από τοιχία κατόψεως 0.25 x 0.80 m, τοποθετημένα στην περίμετρο. Η θεμελίωση περιελάμβανε ομάδα 2 x 2 πασσάλων, διαμέτρου 0.6 m, με κεφαλόδεσμο 2.4 x 2.4 m, πάχους 1.2 m. Πολλά από τα φέροντα τοιχία αστόχησαν, οι δε μη φέροντες τοίχοι υπέστησαν διαγώνια ρηγμάτωση, υποδηλώνοντας εφελκυστική αστοχία υπό γωνίαν 45° λόγω διαφορεικής καθίζησης. Οι πάσσαλοι υπέστησαν σοβαρές βλάβες, έως αστοχία. Εάν δεν είχαν αστοχήσει η κατάσταση ενδέχεται να ήταν χειρότερη.

### 4. ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Στην περιοχή μελέτης πραγματοποιήσαμε μία (ομολογουμένως περιορισμένη) γεωτεχνική διερεύνηση, αποτελούμενη από τέσσερις γεωτρήσεις και ένα διερευνητικό όρυγμα διαστάσεων 6 x 4 x 4 m. Τα πρώτα 6 - 8 m



**Σχήμα 6.** Γήπεδο Μπάσκετ: σοβαρές βλάβες.  
**Figure 6.** Basketball Court : severe damage.

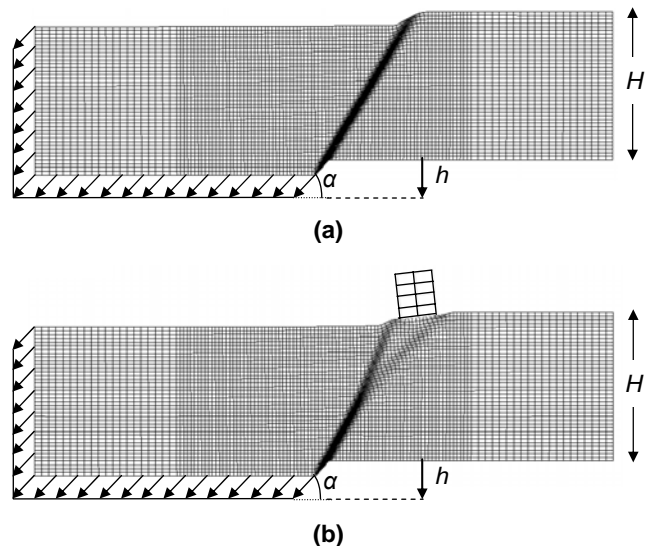
αποτελούνται από σχετικά χαλαρές, έως μέσης πυκνότητας εδαφικές στρώσεις, με τιμές  $N_{SPT}$  από 17 έως 33, ενώ βαθύτερα το έδαφος γίνεται σαφώς πιο δύσκαμπτο. Το εδαφικό προφίλ περιλαμβάνει εναλλαγές ιλυώδους άμμου, με πυκνή άμμο. Η παρουσία αργιλωδών υλικών περιορίζεται σε ορισμένες λεπτές ενδιαστρώσεις αργιλώδους ιλύος έως ιλυώδους άμμου με άργιλο. Στην γεωλογική τομή, πέρα από την πρόσφατη διάρρηξη ανακαλύψαμε και μία παλαιότερη [Γπαυλίδης, 2003]. Μάλιστα, αποδείχθηκε ότι το ρήγμα έχει ενεργοποιηθεί τουλάχιστον 3 φορές στο παρελθόν, σε συμφωνία με την λεπτομερή παλαιοσεισμική μελέτη των Klinger et al [2003].

## 5. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Στόχος μας είναι η ανάλυση του συνολικού φαινομένου της διάδοσης της διάρρηξης από το βραχύδες υπόβαθρο έως την επιφάνεια του εδάφους, και της αλληλεπίδρασης με τις υπερκείμενες κατασκευές. Προς τούτο πραγματοποιούμε διδιάστατες (2-Δ) αναλύσεις επίπεδης παραμόρφωσης. Βέβαια, η διάρρηξη είναι πάντα σημαντικά μεγαλύτερου μήκους απ' ό,τι μία κατασκευή, σπάνια δε την διασχίζει ακριβώς κάθετα στον άξονα της. Συνεπώς, η υπόθεση της επίπεδης παραμόρφωσης αποτελεί μία πρώτη πρακτική προσέγγιση.

Η ανάλυση διεξάγεται σε δύο βήματα (Σχ. 7). Καταρχήν αναλύεται η διάδοση της διάρρηξης στο ελεύθερο πεδίο, αγνοώντας την παρουσία της κατασκευής. Στην συνέχεια, η κατασκευή, προσομοιούμενη με χρήση στοιχείων δοκού, τοποθετείται επί του εδάφους ώστε να αναλυθεί η ΑΔΕΘΑ. Η έδραση γίνεται μέσω ειδικών στοιχείων “κενού”, τα οποία είναι άκαμπτα σε θλίψη, με μηδενική όμως εφελκυστική αντοχή. Η συμπεριφορά τους σε διάτμηση ακολουθεί το νόμο τριβής του Coulomb (απλός ολισθητήρας). Με τον τρόπο αυτόν η κατασκευή δεν “πακτώνεται” στο έδαφος, επιτυγχάνοντας έτσι ρεαλιστική προσομοίωση της ΑΔΕΘΑ, επιτρέποντας τόσο αποκόλληση όσο και σχετική ολίσθηση.

Το προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων (ΠΣ) αναφέρεται σε εδαφική στρώση  $H = 40$  m, στην βάση της οποίας κανονικό ρήγμα κλίσεως  $\alpha$ , παράγει βύθιση κατακορύφου ύψους  $h$ . Το προσομοίωμα έχει πλάτος  $B = 4H = 160$  m, ακολουθώντας την σύσταση του Bray [1990] ότι λόγος  $B : H = 4 : 1$  επαρκεί για την ελαχιστοποίηση “παρασιτικών” επιδράσεων των συνόρων. Η μετατόπιση εφαρμόζεται στο αριστερό ήμισυ, σε μικρά διαδοχικά βήματα.



**Σχήμα 7.** Μεθοδολογία ανάλυσης : (a) διάδοση της διάρρηξης στο ελεύθερο πεδίο, (b) ΑΔΕΘΑ.  
**Figure 7.** Analysis Methodology : (a) fault rupture propagation in free-field, (b) FR-SFSI.

Αρκετές πειραματικές και αριθμητικές μελέτες έχουν δείξει ότι η συμπεριφορά του εδάφους μετά την αστοχία είναι καθοριστική για την διάδοση της διάρρηξης. Οι Bray et al [1994], χρησιμοποιώντας την μέθοδο ΠΣ σε συνδυασμό με υπερβολικό μη-γραμμικώς ελαστικό καταστατικό νόμο, πέτυχαν καλή συμφωνία μεταξύ ανάλυσης και πειραμάτων. Εξίσου επιτυχημένες ήταν οι αναλύσεις των Roth et al [1982], Λουκίδης [1999], και Erickson et al [2001], οι οποίες πραγματοποιήθηκαν με χρήση της μεθόδου πεπερασμένων διαφορών (ΠΔ), σε συνδυασμό με ελαστοπλαστικό προσομοίωμα με ιστροπική χαλάρωση. Υιοθετήσαμε λοιπόν ένα παρόμοιο καταστατικό προσομοίωμα : κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb, με ιστροπικό νόμο χαλάρωσης για την συνοχή  $c$ , την γωνία τριβής  $\phi$ , και την διαστολικότητα  $\psi$ .

Παρότι ο στόχος μας δεν είναι η ανάλυση της διάδοσης της διάρρηξης στο ελεύθερο πεδίο, η ρεαλιστική προσομοίωσή της αποτελεί προϋπόθεση για το δεύτερο βήμα της μεθοδολογίας μας. Ως εκ τούτου, εκτελέστηκε παραμετρική διερεύνηση της διάδοσης της διάρρηξης στο ελεύθερο πεδίο [Αναστασόπουλος, 2005]. Τα αποτελέσματα έχουν συγκριθεί με ιστορικά περιστατικά, πειραματικές μελέτες, και προγενέστερες αριθμητικές αναλύσεις. Επιπροσθέτως, πραγματοποιήθηκαν γνήσιες “τυφλές” προβλέψεις πειραμάτων φυγοκεντριστή τα οποία εκτελέστηκαν στο Πανεπιστήμιο Dundee, ως μέρος του ερευνητικού

προγράμματος “QUAKER”. Η ποιοτική συμφωνία με τα ιστορικά περιστατικά και τις πειραματικές μελέτες από την βιβλιογραφία, σε συνδυασμό με τις επιτυχείς “τυφλές” προβλέψεις, μας παρέχει την απαιτούμενη αυτοπεποίθηση για την χρήση της αναπτυσσόμενης αριθμητικής μεθοδολογίας.

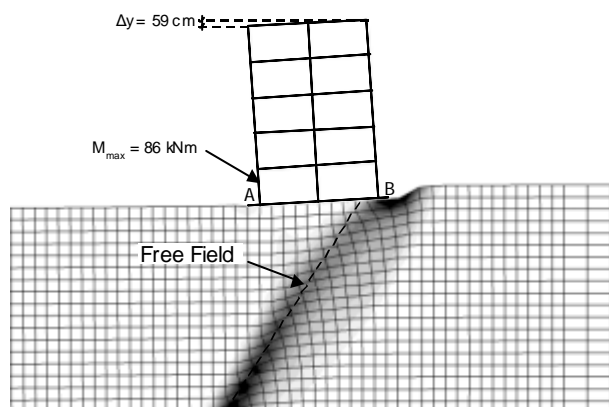
Όπως ήδη συζητήθηκε, οι εδαφικές συνθήκες στο Denizler δεν διαφέρουν σημαντικά από το ένα κτίριο στο άλλο. Δίχως να υποβαθμίζουμε την σημασία των λεπτομερειών της ανωδομής, αντιμετωπίζουμε όλες τις υπό ανάλυση κατασκευές ως “ισοδύναμες” από αυτήν την άποψη, αλλάζοντας μόνο τον αριθμό των ορόφων. Με τον τρόπο αυτόν διευκολύνεται η κατανόηση της επίδρασης του τύπου και της δυσκαμψίας της θεμελίωσης, καθώς και του φορτίου της ανωδομής στην ΑΔΕΘΑ. Προσομοιώνουμε τυπικό κτίριο πλάτους 10 m με κάρναβο υποστυλωμάτων 5 x 5 m, με δομητικά στοιχεία τετραγωνικής διατομής 50 cm.

## 6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται με την μορφή παραμορφωμένου κάρναβου ΠΣ και κατανομής πλαστικών παραμορφώσεων. Αναφέρεται επίσης η διαφορική καθίζηση  $\Delta y$ , και η μέγιστη αναπτυσσόμενη καμπτική ροπή  $M_{max}$  στην ανωδομή, προκειμένου να είναι δυνατή η ποιοτική εκτίμηση της καταπόνησης.

### 6.1 Κτίριο 1

Όπως δείχνεται στο Σχ. 8 η διάρρηξη εκτρέπεται προς το ανερχόμενο τέμαχος, παρατηρείται δε διάχυση της πλαστικής παραμόρφωσης στα τελευταία 10 m της διαδρομής της διάρρηξης. Το κτίριο υφίσταται διαφορική καθίζηση 59 cm, χωρίς όμως να

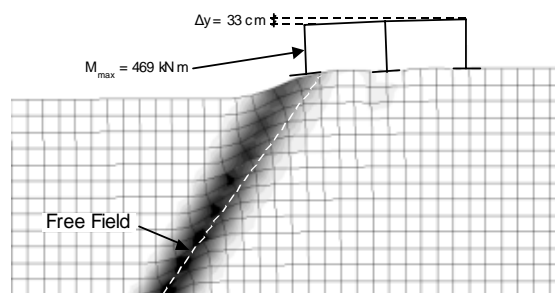


**Σχήμα 8.** Αποτελέσματα για το Κτίριο 1.  
**Figure 8.** Analysis results for Building 1.

καταπονείται σημαντικά : η μέγιστη καμπτική ροπή δεν ξεπερνά τα 86 kNm. Η δύσκαμπτη θεμελίωση όχι μόνον καταφέρνει να εκτρέψει σημαντικά την διάρρηξη, αλλά και επιτρέπει στο κτίριο να περιστραφεί ως στερεό σώμα, χωρίς σημαντική επιπόνηση. Παρότι η διαφορική καθίζηση είναι σημαντική (6%, αρκετά μεγαλύτερη από το συνήθως αποδεκτό 1/300), η ανάλυση δεν υποδεικνύει σημαντική επιπόνηση της ανωδομής, σε συμφωνία με την παρατηρηθείσα συμπεριφορά. Βέβαια, στην πραγματικότητα η διαφορική καθίζηση δεν ήταν τόσο μεγάλη. Εντοπίζουμε δύο πιθανές εξηγήσεις : (i) μετασεισμική στερεοποίηση του εδάφους στην δεξιά άκρη του κτιρίου λόγω των αυξημένων τάσεων επαφής στην περιοχή αυτή, και (ii) η διάρρηξη δεν διέσχισε την κατασκευή κάθετα στον άξονα της, όπως υπετέθη στην 2-Δ ανάλυση μας ; στην πραγματικότητα διέσχισε την γωνία του κτιρίου (βλ. Σχ. 3), κάτι προφανώς ευμενέστερο από την παραδοχή επίπεδης παραμόρφωσης.

### 6.2 Κτίριο 2

Το προσομοίωμα αποτελεί προσέγγιση της ανωδομής από τσιμεντόλιθους. Η διάρρηξη εκτρέπεται μόνον τοπικά προς το κατερχόμενο τέμαχος (Σχ. 9), αποφεύγοντας το αριστερό θεμέλιο του κτιρίου, ακολουθώντας πρακτικά την ίδια διαδρομή όπως στο ελεύθερο πεδίο. Το κτίριο περιστρέφεται προς το κατερχόμενο τέμαχος, με διαφορική καθίζηση που φτάνει τα 33 cm. Τμήμα της ακριανής στήριξης χάνει την επαφή του με το έδαφος. Παρά την μικρότερη διαφορική καθίζηση, σε σχέση με το Κτίριο 1, η  $M_{max}$  φτάνει τα 469 kNm. Προφανώς, μία τέτοια επιπόνηση δεν θα μπορούσε να παραληφθεί από την ανωδομή του εν λόγω κτιρίου. Παρά την αδρή προσομοίωση της ανωδομής, η ανάλυση είναι και πάλι σε συμφωνία με την παρατηρηθείσα συμπεριφορά.



**Σχήμα 9.** Αποτελέσματα για το Κτίριο 2.  
**Figure 9.** Analysis results for Building 2.



### 6.3 Κτίριο 3

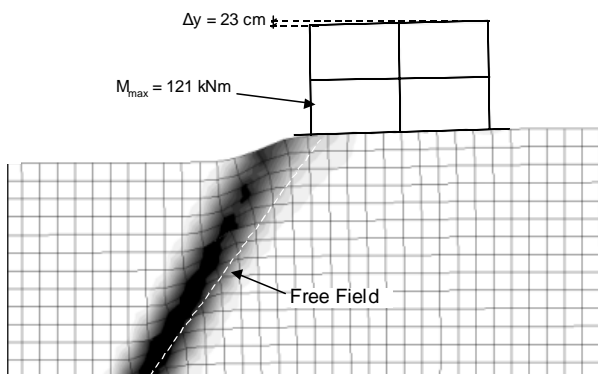
Όπως δείχνεται στο Σχ. 10, η διάρρηξη ακολουθεί την ίδια διαδρομή διάδοσης όπως στο ελεύθερο πεδίο μέχρις ότου φτάσει σε βάθος περίπου 12 m. Στο σημείο αυτό εκτρέπεται προς τα αριστερά του κτιρίου, προς το κατερχόμενο τέμαχος δηλαδή. Η πλαστική παραμόρφωση συγκεντρώνεται σε μια στενή ζώνη, σχηματίζοντας ευδιάκριτο αναβαθμό. Το κτίριο περιστρέφεται ελαφρώς προς το κατερχόμενο τέμαχος, με την διαφορική καθίζηση να φτάνει τα 23 cm. Όπως και στην περίπτωση του Κτιρίου 1, η δύσκαμπτη κιβωτιοειδής θεμελίωση όχι μόνο επιτυγχάνει εκτροπή της διάρρηξης, αλλά και “μετατρέπει” την διαφορική μετακίνηση σε στροφή στερεού σώματος. Παρά την σημαντική διαφορική καθίζηση ( $\approx 2\%$ ), το κτίριο δεν υφίσταται σημαντική επιπόνηση :  $M_{max} = 121$  kNm. Τονίζεται ότι παρά την γενικώς αποδεκτή τιμή μέγιστης αποδεκτής στροφής 1/300, κλίση της τάξης του 2% δεν γίνεται καν εύκολα αντιληπτή, όπως δε αναφέρεται στο άρθρο των Charles & Skinner [2004] δεν θα προκαλούσε δομητική επιπόνηση σε κτίρια επί δύσκαμπτων κοιτοστρώσεων. Η ανάλυση συμφωνεί ποιοτικά με την καταγεγραμμένη απόκριση του εν λόγω κτιρίου.

### 6.4 Το Κλειστό Γήπεδο Καλαθοσφαίρισης

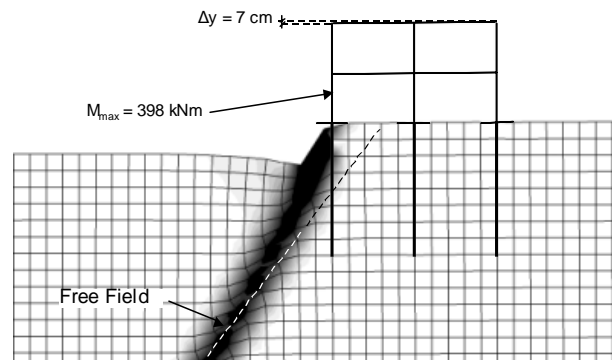
Η διάρρηξη ακολουθεί την διαδρομή διάδοσης ελεύθερου πεδίου μέχρι την περιοχή του γωνιακού πασσάλου, σε βάθος περίπου 10 m (Σχ. 11). Στο σημείο αυτό εκτρέπεται προς το κατερχόμενο τέμαχος, η δε πλαστική παραμόρφωση συγκεντρώνεται σε μία πολύ στενή ζώνη και ένας ευδιάκριτος αναβαθμός αναπτύσσεται δεξιά από τον πάσσαλο. Το κτίριο περιστρέφεται ελάχιστα προς το

κατερχόμενο τέμαχος με διαφορική καθίζηση  $\sim 7$  cm μόνον, ενώ παράλληλα ο αριστερός κεφαλόδεσμος χάνει την επαφή του με το έδαφος, σε συμφωνία με τις επί τόπου παρατηρήσεις μας (Σχ. 6). Προς γενική έκπληξη, παρά την περιορισμένη διαφορική καθίζηση, η επιπόνηση της ανωδομής είναι σημαντική :  $M_{max} \approx 400$  kNm. Αν και οι πάσσαλοι εκτρέπουν την διάρρηξη, ένα μέρος της προκαλούμενης διαφορικής καθίζησης και, το κυριότερο, οριζόντιος εφελκυσμός λαμβάνει χώρα μεταξύ των υποστυλωμάτων του γηπέδου. Σε αντίθεση με τα Κτίρια 1 και 3, οι πάσσαλοι δεν επιτρέπουν στην ανωδομή να περιστραφεί ως στερεό σώμα. Αντιθέτως της επιβάλλουν να “ακολουθήσει” την μικρή μεν αλλά όχι αμελητέα παραμόρφωση.

Πρέπει ωστόσο να τονίσουμε τον προσεγγιστικό χαρακτήρα της ανάλυσης μας ως προς την προσομοίωση των πασσάλων. Η υπόθεση επίπεδης παραμόρφωσης υποδηλώνει ότι οι “πάσσαλοι” είναι στην (υπολογιστική) πραγματικότητα συνεχείς “τοίχοι”. Τέτοιοι τοίχοι υπόκεινται σε υψηλότερες δράσεις (ανά μονάδα μήκους) του προς τα κάτω κινούμενου εδάφους, απ’ ότι μεμονωμένοι πάσσαλοι. Αυτό συμβαίνει διότι: (i) το έδαφος μπορεί να “ρέει” γύρω από τους πασσάλους, όχι όμως γύρω από τον επίπεδο “τοίχο”, (ii) η αντοχή σε τριβή της διεπιφάνειας πασσάλου-εδάφους δεν είναι απεριόριστη, όπως υπετέθη σιωπηρά στο προσομοίωμά μας, διευκολύνοντας έτσι περαιτέρω την “ροή” του εδάφους, και (iii) στην πραγματικότητα οι γωνιακοί πάσσαλοι αστόχησαν σε εφελκυσμό, μειώνοντας έτσι την επιπόνηση της ανωδομής. Παρόλα αυτά, σε ποιοτικούς όρους τα αποτελέσματα της (ομολογουμένως ατελούς) ανάλυσης μας συμφωνούν ικανοποιητικά με τις επί τόπου παρατηρήσεις μας.



**Σχήμα 10.** Αποτελέσματα για το Κτίριο 3.  
**Figure 10.** Analysis results for Building 3.



**Σχήμα 11.** Αποτελέσματα για το Γήπεδο.  
**Figure 11.** Results for the Basketball Court.

## 7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα βασικά συμπεράσματα της μελέτης μας συνοψίζονται ως εξής :

- [1] Ο τύπος και η δυσκαμψία της θεμελίωσης έχουν προφανή επίδραση στην απόκριση κατασκευών επί ρήγματος. Κτίρια επί δύσκαμπτης κοιτόστρωσης ή κιβωτιοειδούς θεμελίωσης συμπεριφέρονται σαφώς καλύτερα απ' ό,τι κτίρια επί μεμονωμένων θεμελίων ή πασσάλων.
- [2] Κτίρια επί δύσκαμπτης κιβωτιοειδούς θεμελίωσης προκαλούν εκτροπή της διάρρηξης. Ακόμα κι αν η εκτροπή είναι μερική, η δυσκαμψία της θεμελίωσης επιτρέπει στην κατασκευή να περιστραφεί ως στερεό σώμα, δίχως να υποστεί σημαντική καταπόνηση. Η κατασκευή ενδέχεται να αποκολληθεί τοπικά από το έδαφος, ανακουφιζόμενη κατ' αυτόν τον τρόπο από τις επιβαλλόμενες μετακινήσεις. Κτίρια ωπλισμένου σκυροδέματος μπορούν να αποκριθούν ως πρόβολοι ή ως αμφιέρριστες δοκοί, γεφυρώνοντας τα τοπικά "μικρά" κενά, εφόσον εδράζονται επί δύσκαμπτης θεμελίωσης. Τα Κτίρια 1 και 3 αποτελούν πραγματικά παραδείγματα.
- [3] Κτίρια επί μεμονωμένων θεμελίων δεν εκτρέπουν την διάρρηξη, η οποία συνήθως αναδύεται εντός των ορίων της κατασκευής επιβάλλοντας διαφορικές μετακινήσεις και καταστροφική δομητική επιπόνηση. Το Κτίριο 2 και το Τζαμί αποτελούν απόδειξη της χειρότερης απόκρισης κτιρίων επί μεμονωμένων θεμελίων σε σύγκριση με κατασκευές επί συνεχούς θεμελίωσης.
- [4] Κτίρια επί πασσάλων καταπονούνται σημαντικά από την διάρρηξη. Αν και η θεμελίωση με πασσάλους θα μπορούσε να εκτρέψει την διάρρηξη, τείνει να εξαναγκάσει την ανωδομή να ακολουθήσει την επιβαλλόμενη παραμόρφωση : η κατασκευή δεν δύναται να "ανακουφιστεί" χάνοντας επαφή με την παραμορφούμενη εδαφική επιφάνεια, όπως θα συνέβαινε με κοιτόστρωση ή κιβωτιοειδή θεμελίωση. Αυτό προκαλεί σημαντική επιπόνηση της ανωδομής, όπως μαρτυράται από την σχετικά πτωχή απόκριση του Γηπέδου.
- [5] Κατασκευές στην γειτονία ενεργού ρήγματος μπορούν να σχεδιαστούν κατά τρόπο ώστε να ανταπεξέλθουν των επιβαλλόμενων μετακινήσεων. Η παρούσα ερευνητική εργασία αποτελεί ένα πρώτο βήμα για την ανάπτυξη μίας μεθοδολογίας ανάλυσης προς αυτήν την κατεύθυνση.

## 8. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία αποτελεί μέρος του ερευνητικού προγράμματος "X-SOILS" (ΔΠ23), το οποίο χρηματοδοτείται από την Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας.

## 9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Αναστασόπουλος, Ι. (2005), "Αλληλεπίδραση Επιφανειακής Διαρρήξεως – Εδάφους – Θεμελίωσης – Ανωδομής", Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα, σελ. 570.
- Bray, J.D. (1990), "The effects of tectonic movements on stresses and deformations in earth embankments", Ph.D. Dissertation, University of California, Berkeley.
- Bray, J.D., Seed, R.B., Cluff, L.S., and Seed, H.B. (1994), "Earthquake Fault Rupture Propagation through Soil", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 120, No.3, March, pp. 543-561.
- Charles, J.A., and Skinner, H.D., (2004), "Settlement and tilt of low-rise buildings", Geotechnical Engineering, Vol. 157, Issue GE2, pp. 65-75.
- Erickson, S.G., Staryer, L.M., and Suppe, J. (2001), "Initiation and reactivation of faults during movement over a thrust-fault ramp : Numerical mechanical models", Journal of Structural Geology, Vol. 23, pp. 11-23.
- Klinger, Y., Sieh, K., Altunel, E., Akoglu, A., Barka, A., Dawson, T., Gonzalez, T., Meltzner, A., and Rockwell, T. (2003), "Paleoseismic evidence of characteristic slip on the western segment of the North Anatolian fault, Turkey", BSSA, Vol. 93, No. 6, December 2003, pp. 2317-2332.
- Λουκίδης, Δ. (1999), "Διάδοση Ενεργού Ρήγματος Διαμέσου Εδαφικού Στρώματος", Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα.
- Παυλίδης, Σ. (2003), Παλαιοσεισμική Έρευνα στο Gölcük, Τεχνική Έκθεση.
- Pavlidis, S., Tutkun, Z., Chatzipetros, A., Özaksoy, V., and Doğan, B. (2003), "Trenching along the Gölcük 1999 normal fault: evidence for repeated recent seismic activity", Int. Workshop on the N. Anatolian, E. Anatolian and Dead Sea Fault Systems: Recent Progress in Tectonics and Paleoseismology, and Field Training Course in Paleoseismology.
- Roth, W.H., Scott, R.F., and Austin, I. (1981), "Centrifuge modelling of fault propagation through alluvial soils", Geophysical Research Letters, Vol.8, No.6, pp. 561-564.