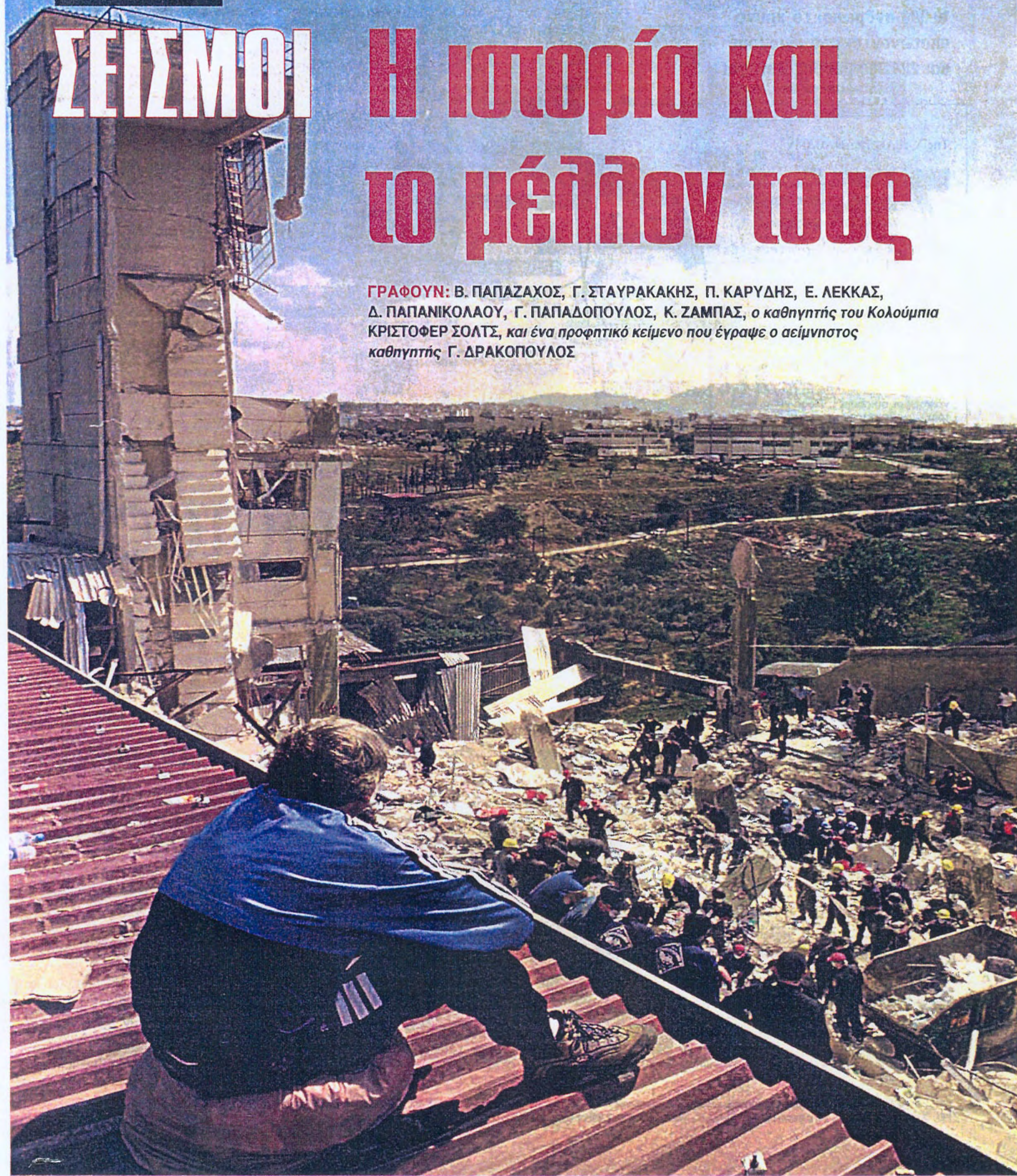


αφιέρωμα

Σάββατο 18 Σεπτεμβρίου 1999

# ΣΕΙΣΜΟΙ Η ιστορία και το μέλλον τους

**ΓΡΑΦΟΥΝ:** Β. ΠΑΠΑΖΑΧΟΣ, Γ. ΣΤΑΥΡΑΚΑΚΗΣ, Π. ΚΑΡΥΔΗΣ, Ε. ΛΕΚΚΑΣ, Δ. ΠΑΠΑΝΙΚΟΛΑΟΥ, Γ. ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ, Κ. ΖΑΜΠΑΣ, ο καθηγητής του Κολούμπια ΚΡΙΣΤΟΦΕΡ ΣΟΛΤΣ, και ένα προφητικό κείμενο που έγραψε ο αείμνηστος καθηγητής Γ. ΔΡΑΚΟΠΟΥΛΟΣ





**Ο καθηγητής Ευθύμιος Λέκκας αναλύει τα γεωλογικά φαινόμενα**

# Τι συμβαίνει στη γη την ώρα του σεισμού



Τα ρήγματα ενεργοποιούνται πριν από την γένεση ενός σεισμού

**Κ**ατά τη διάρκεια σεισμικών δονήσεων εκδηλώνεται ταυτόχρονα ή αμέσως μετά τη σεισμική κίνηση ένας αριθμός γεωδυναμικών φαινομένων, τα οποία βρίσκονται σε άμεση συσχέτιση και είναι άμεσο αποτέλεσμα της σεισμικής διέγερσης. Τέτοια φαινόμενα είναι ο ρευστοποίησης εδαφών, οι κατολισθήσεις - καταπτώσεις, οι χιονοστιβάδες, οι μεταθέσεις ακτογραμμών, η εμφάνιση εδαφικών διαρρηξιών και τα τσουνάμι. Συνήθως ονομάζονται και συνοδά σεισμικά γεωδυναμικά φαινόμενα, δεδομένου ότι πολλές φορές προκαλούν ζημιές πολύ μεγαλύτερες από τις ζημιές που προκαλεί η ίδια η σεισμική δόνηση που τα διέγειρε. Μαζί με τα προηγούμενα φαινόμενα, συνήθως παρατίθενται και οι πυρκαγιές, οι οποίες προκαλούνται από την ανάφλεξη καύσιμων υλικών ή από τη δημιουργία βραχυκυκλωμάτων που ολοκληρώνουν με τη σειρά τους το καταστροφικό έργο των προηγούμενων.

Η εκδήλωση συνοδών γεωδυναμικών φαινομένων είναι ιδιαίτερα συχνή στον ελληνικό χώρο και αναφέρεται με αρκετά μεγάλη σαφήνεια και σε σωζόμενα ιστορικά κείμενα που περιγράφουν καταστροφικούς σεισμούς. Όμως η σημασία και συμβολή της στην ανάπτυξη και κατανομή των βλαβών συνειδητοποιήθηκε μόλις τα τελευταία χρόνια, με αποτέλεσμα να αρχίσει μια μεγάλη προσπάθεια και σε διεθνές επίπεδο, επιστημονικής κατανόησης και γε-

ωγραφικού εντοπισμού των φαινομένων. Ήδη σε μεγάλους σεισμούς στο διεθνή χώρο (π.χ. San Francisco, Los Angeles, Kobe) και στον ελληνικό χώρο (π.χ. Πύργος, Γρεβενά, Αίγιο), έγιναν λεπτομερείς έρευνες, με αποτέλεσμα να αποκτηθεί μια σημαντική εμπειρία, η οποία οδηγεί στη μείωση των επιπτώσεών τους μέσα από την εφαρμογή ειδικών μέτρων και ρυθμίσεων.

## Ρευστοποιήσεις εδαφών

Ένα από τα πλέον σοβαρά φαινόμενα που εμφανίζονται κατά τη διάρκεια σεισμικών κινήσεων, είναι η δημιουργία ρευστοποιήσεων. Οι ρευστοποιήσεις λαμβάνουν χώρα σε χαλαρά λεπτομερή ιζήματα (ίλυς, άμμος) με παρουσία νερού όταν αυτά υπόκεινται σε επαναλαμβανόμενες διατημητικές φορτίσεις που μπορεί να αντιστοιχιστούν με ένα σεισμικό κύμα. Κατά τις ρευστοποιήσεις, οι γεωλογικοί σχηματισμοί χάνουν τη διατημητική αντοχή τους με αποτέλεσμα να μετατρέπεται η στερεά φάση σε υγρή και τελικά να αποκτήσουν παροδικά συμπεριφορά βαρέως ρευστού.

Όπως είναι σαφές η απώλεια της διατημητικής αντοχής και η μετατροπή από τη στερεά στην υγρή φάση των συγκεκριμένων γεωλογικών σχηματισμών έχει ως αποτέλεσμα την απώλεια στήριξης των υπερκείμενων κατασκευών ή των τεχνικών

έργων, τα οποία στην κυριολεξία βυθίζονται, ανατρέπονται ή καταρρέουν. Κύριες ενδείξεις των ρευστοποιήσεων στην επιφάνεια είναι η παρουσία εκτεταμένων αποθέσεων ιλυωδών ή αμμούχων σχηματισμών, οι οποίοι εκχύνονται στην επιφάνεια μέσω συστημάτων οπών και διαρρηξιών στα υπερκείμενα στρώματα. Επίσης, ένδειξη ρευστοποιήσεων αποτελεί η δημιουργία κυματοειδών παραμορφώσεων ή βυθίσεων στην ελεύθερη επιφάνεια, πέραν βέβαια της απώλειας στήριξης και της βύθισης των υπερκείμενων σχηματισμών που είναι θεμελιωμένες στους πιθανώς ρευστοποιηθέντες σχηματισμούς. Αντίθετα, οι κατασκευές οι οποίες είναι θεμελιωμένες σε βαθύτερους γεωλογικούς σχηματισμούς που δεν ρευστοποιήθηκαν δεν διατρέχουν κίνδυνο, πέρα των προβλημάτων που προκαλούνται στους παρακείμενους ελεύθερους χώρους.

Αντιπροσωπευτικά σύγχρονα παραδείγματα εκδήλωσης μεγάλων ρευστοποιήσεων αποτελούν ο σεισμός στο San Francisco το 1989 στην περιοχή Bay, όπου εκδηλώθηκαν και οι μεγαλύτερες βλάβες καθώς επίσης και ο σεισμός στο Kobe το 1995, όπου ολόκληρη η παράλια περιοχή, το σύγχρονο λιμάνι και οι εμπορικές περιοχές καλύφθηκαν από εκατομμύρια τόνους ρευστοποιηθέντων υλικών που εξήλθαν στην επιφάνεια προκαλώντας ταυ-

τόχρονα τεράστιες ζημιές. Στον ελληνικό χώρο το πρόβλημα των ρευστοποιήσεων είναι υπαρκτό και σε άλλες μεν περιοχές έχει μόνο επιστημονικό ενδιαφέρον, ενώ σε άλλες προκαλεί έντονα προβλήματα.

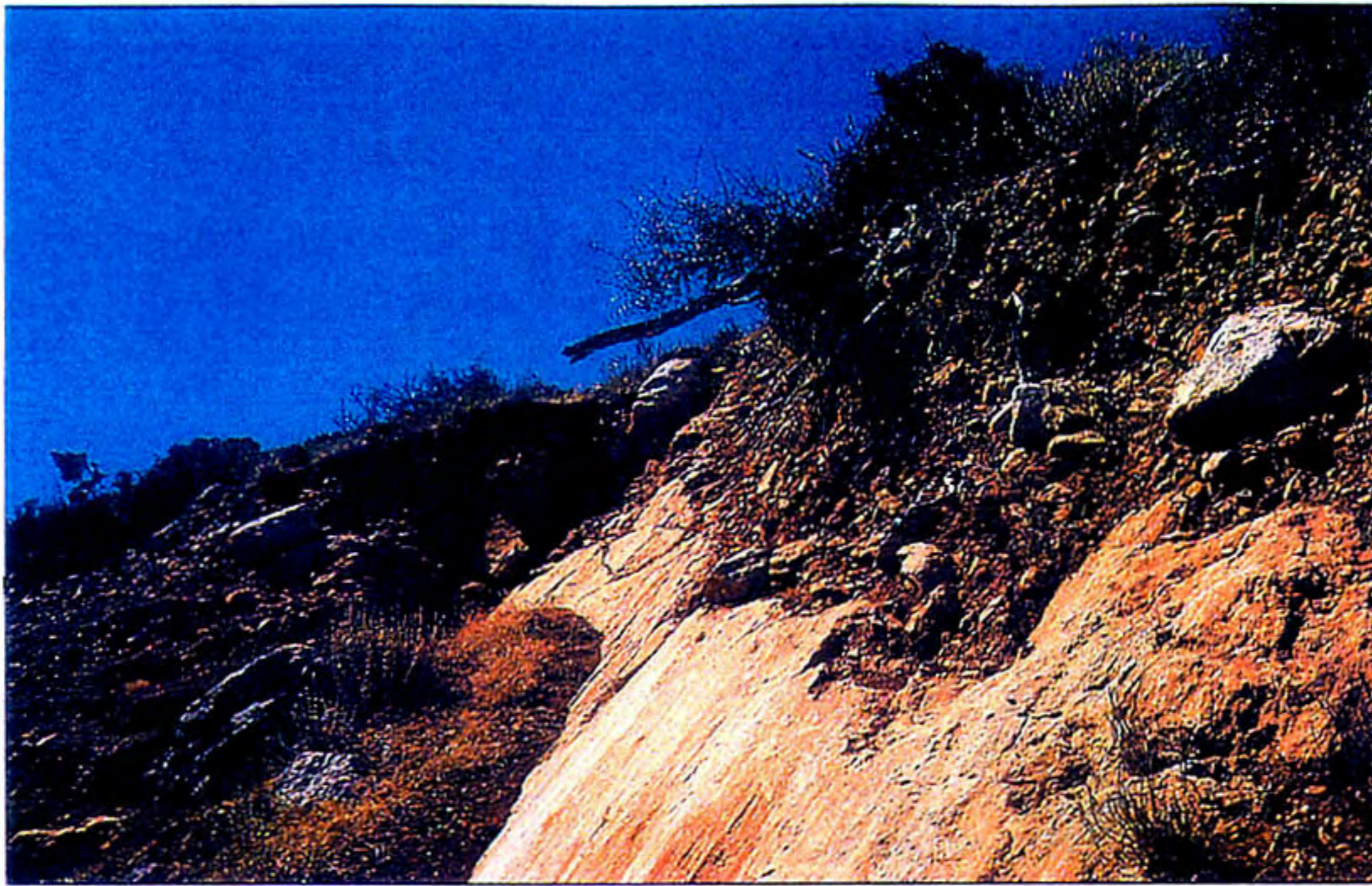
Ιδιαίτερα σημαντική είναι η εκδήλωση ρευστοποιήσεων σε περιοχές του ελληνικού χώρου που πλήττονται από σεισμούς και δομούνται από σχετικά πρόσφατους και χαλαρούς σχηματισμούς, όπως για παράδειγμα οι πεδινές και παραθαλάσσιες περιοχές στις οποίες όμως υπάρχει η μεγαλύτερη και εντονότερη ανάπτυξη. Κατά τους σεισμούς της Κυλλήνης το 1988, του Πύργου το 1993 και του Αιγίου το 1995, οι ρευστοποιήσεις συνέβαλαν ουσιαστικά στην ενίσχυση των καταστροφών.

## Μεταθέσεις ακτογραμμών

Ένα σημαντικό γεωδυναμικό φαινόμενο είναι οι μεταθέσεις των ακτογραμμών. Προκαλούνται είτε από γενικευμένες ανοδικές ή καθοδικές κινήσεις λόγω των κινήσεων των ρηξιτεμαχών εκατέρωθεν του σεισμικού ρήγματος, είτε λόγω υποχωρήσεων - μετακινήσεων των χαλαρών σχηματισμών της παραλιακής ζώνης. Και στις δύο περιπτώσεις είναι δυνατό να προκαλέσουν εκτεταμένες καταστροφές σε κατασκευές, σε λιμενικά ή λοιπά τεχνικά έργα, σε εγκαταστάσεις τουριστικών δραστηριοτήτων ή, τέλος, ακόμη και περιβαλλοντολογικές καταστροφές που συσχετίζονται με το φυσικό κάλλος του τοπίου και την ισορροπία των περιβαλλοντικών παραμέτρων.



Του ΕΥΘΥΜΙΟΥ ΛΕΚΚΑ\*



Κοντινή λήψη του ρήγματος μετά τον σεισμό

Σημαντικές σύγχρονες μεταθέσεις ακτογραμμών προκλήθηκαν στον ελληνικό χώρο κατά το σεισμό των Αλκυονίδων το 1981, στην περιοχή Περαχώρας Λουτρακίου, στους σεισμούς της Κυλλήνης το 1988 και τέλος κατά το σεισμό του Αιγίου το 1995. Σε όλες τις περιπτώσεις οι μεταθέσεις των ακτογραμμών προκάλεσαν σημαντικά προβλήματα, ενώ η δυσκολία αντιμετώπισης έγκειται στο γεγονός ότι είναι δύσκολο να προβλεφθεί και να οριοθετηθεί εκ των προτέρων κάποια τέτοια μεταβολή έτσι ώστε να υπάρξει κάποια δέσμη μέτρων προστασίας.

### Τσουνάμι

Τα σεισμικά θαλάσσια κύματα ή τσουνάμι αποτελούν από τα πλέον χαρακτηριστικά δευτερογενή σεισμικά φαινόμενα. Η λέξη tsunami προέρχεται από δύο ιαπωνικές λέξεις, τη λέξη tsu που σημαίνει λιμάνι και τη λέξη nami που σημαίνει κύμα ή θάλασσα. Η σύνδεση αυτών των δύο λέξεων είναι καθοριστικής σημασίας αφού τα κύματα τσουνάμι πλήττουν κύρια τις παραλιακές περιοχές. Τα περισσότερα τσουνάμι οφείλονται σε τεκτονικές μετακινήσεις του συνοδευόμενου από μικρού εστιακού βάρους σεισμούς ενώ μπορεί να προκληθούν και από ηφαιστειακές εκρήξεις (π.χ. Κρακατοά, 1883) καθώς και από υποθαλάσσιες κατολισθήσεις μέσα σε κλειστούς κόλπους. Από τα τσουνάμι απειλούνται περί τις 22 χώρες στην περι-Ειρηνική περιοχή. Τα τελευταία 100 χρόνια, πάνω από 10.000 κάτοικοι παραθαλάσσιων περιοχών έχουν χάσει τη ζωή τους από την εκδήλωση τσουνάμι. Σύμφωνα με μελέτες, περίπου 170 τσουνάμι έχουν πλήξει την περι-Ειρηνική περιοχή τα έτη 1900-1980. Η πλέον ενεργή περιοχή είναι το νησιωτικό τόξο Ιαπωνίας-Ταϊβάν όπου σημειώθηκαν το 1/4 περίπου όλων των γεγονότων εκδήλωσης τσουνάμι.

Η Ιαπωνία αποτελεί μια περιοχή ιδιαίτερα ευαίσθητη στα τσουνάμι. Στο ανατολικό τμήμα της νήσου Honsu, ένα κύμα τσουνάμι ύψους 10 μέτρων έχει περίοδο επανάλιψης 10 περίπου χρόνια. Το κύμα τσουνάμι που έπληξε την ακτή Sanriku το 933, προκλήθηκε από υποθαλάσσιο σεισμό μεγέθους 8,5 R. Τα κύματα που προκλήθηκαν είχαν ύψος μέχρι και 24 μέτρα ενώ η περίοδος επανάλιψης του φαινομένου είναι 1/70 χρόνια. Ο απολογισμός ήταν 1.008 θάνατοι, 1.152 τραυματισμοί, 2.917 οικίες παρασύρθηκαν από τα κύματα και

άλλες 2.346 καταστράφηκαν ολοσχερώς.

Κατά τη διάρκεια του 20ού αιώνα, πάνω από 350 άτομα έχουν σκοτωθεί ενώ περίπου 500 εκατομμύρια δολάρια είναι το κόστος των καταστροφών σε ιδιοκτησίες από τα τσουνάμι στις ΗΠΑ. Οι μεγαλύτερες απώλειες σημειώθηκαν κατά το τσουνάμι που προκλήθηκε από το σεισμό του 1964 στην Αλάσκα. Η πόλη Crescent της Καλιφόρνια υπέστη υλικές ζημιές ύψους 7 εκατομμυρίων δολαρίων ενώ επλήγη από κύματα ύψους 6 μέτρων πάνω από το χαμηλό πλημμυρικό επίπεδο. Τα κύματα αυτά εισχώρησαν περί τα 500 μέτρα στην ξηρά, πλημμυρίζοντας 30 οικοδομικά τετράγωνα και καταστρέφοντας τις περισσότερες από τις παραθαλάσσιες κατασκευές.

Στον ελλαδικό χώρο ο κίνδυνος εκδήλωσης τσουνάμι είναι γενικά μικρός. Στο παρελθόν και με βάση ιστορικά κείμενα έχει εκδηλωθεί ένας αριθμός κυμάτων τσουνάμι σε αντιστοιχούς σεισμούς. Η πλέον χαρακτηριστική περίπτωση εκδήλωσης τσουνάμι αποτελεί ο σεισμός του 373 π.Χ. στην αρχαία Ελίμη στο Αίγιο κατά τον οποίο κύμα τσουνάμι κατέστρεψε την πόλη, παράλληλα με την εκδήλωση και άλλων γεωδυναμικών φαινομένων. Κύμα τσουνάμι χωρίς όμως καταστροφικά αποτελέσματα εκδηλώθηκε και στο σεισμό του 1995 στην ίδια περιοχή, στην οποία έλαβαν χώρα και υποθαλάσσιες κατολισθήσεις.

### Εδαφικές διαρρήξεις

Οι εδαφικές διαρρήξεις αποτελούν ένα σύνθετο φαινόμενο που συνοδεύει τις σεισμικές κινήσεις. Δεν έχει καμία σχέση με τις σεισμικές διαρρήξεις οι οποίες αποτελούν άμεση εκδήλωση του σεισμικού ρήγματος στην επιφάνεια. Αντίθετα, οι εδαφικές διαρρήξεις είναι το αποτέλεσμα της σεισμικής κίνησης στην επιφάνεια, η οποία συνήθως δομείται από χαλαρούς σχηματισμούς. Οι εδαφικές διαρρήξεις που προκαλούνται στους επιφανειακούς σχηματισμούς και έχουν περισσότερο βάθος που σπάνια υπερβαίνει τα μερικά μέτρα, ενώ αντίθετα το μήκος τους μπορεί να φθάσει τα μερικές δεκάδες μέτρα. Οι διευθύνσεις τους είναι ποικίλες και συνήθως ελέγχονται από διάφορους παράγοντες, όπως η γεωμετρία του πρσανούς, η διάταξη των στρώσεων των λεπτομερών και των αδρομερών φάσεων, η παρουσία μορφολογικών ασυνεχειών και η γειτνίαση με κοίτες ποταμών και ακτογραμμών. Τα κύρια αίτια εκδήλωσης των εδαφικών διαρρήξεων εί-

ναι η διαφορική σεισμική απόκριση μεταξύ των διάφορων επιφανειακών σχηματισμών και η ρευστοποίηση υποκείμενων σχηματισμών. Σε πολλές μάλιστα περιπτώσεις οι εδαφικές διαρρήξεις και οι ρευστοποιήσεις εκδηλώνονται ταυτόχρονα και τα ρευστοποιηθέντα υλικά ανέρχονται στην επιφάνεια διά μέσου των εδαφικών διαρρήξεων. Αντιπροσωπευτικό παράδειγμα αποτελούν και τα φαινόμενα που παρατηρήθηκαν κατά το σεισμό του Αιγίου του 1995, ενώ σε πολυάριθμες ακόμη περιπτώσεις στον Ελληνικό και διεθνή χώρο αναφέρονται αντίστοιχα παραδείγματα.

Οι εδαφικές διαρρήξεις συνήθως δεν προκαλούν σημαντικές βλάβες στα κύρια δεδομένου ότι η εκδήλωσή τους περιορίζεται στα επιφανειακά στρώματα και πολύ πιο πάνω από το σύνθετο επίπεδο θεμελίωσης των κατασκευών. Προκαλούν όμως σημαντικές βλάβες σε κατασκευές, οι οποίες θεμελιώνονται στα επιφανειακά στρώματα καθώς επίσης και σε έργα οδοποιίας, διαμόρφωσης χώρων, εξωραϊστικά έργα κ.λπ.

### Κατολισθητικά φαινόμενα

Ο γενικός όρος κατολισθητικά φαινόμενα περιλαμβάνει όλες τις εδαφικές ή βραχώδεις μετακινήσεις και ειδικότερα τις κατολισθήσεις, τις καθιζήσεις και τις καταπτώσεις, ενώ μια ειδική κατηγορία είναι και οι χιονοστιβάδες, οι οποίες παρασύρουν και εδαφικά υλικά. Αρκετά συχνά, κατά τη διάρκεια των σεισμικών κινήσεων, παρατηρούνται οι ανωτέρω μετακινήσεις λόγω κυρίως της αστάθειας που προκαλείται από τη σεισμική ώθηση. Ο βασικότερος λόγος πρόκλησης κατολισθητικών φαινομένων είναι η υπερνίκηση των υφιστάμενων δυνάμεων που προϋπάρχουν και αντιτίθεται στην ολίσθηση, οι οποίες, όπως έχει αναφερθεί, καλούνται παθητικές δυνάμεις.

Οι κατολισθήσεις και οι καταπτώσεις αποτελούν τα πλέον συνήθη φαινόμενα που συνοδεύουν κάποια δραστηριότητα, ενώ σε λιγότερες περιπτώσεις εκδηλώνονται χιονοστιβάδες, εκεί φυσικά που οι κλιματολογικές συνθήκες είναι ευνοϊκές. Οι μεγαλύτερες των κατολισθήσεων προκαλούνται όταν εκδηλώνονται σεισμοί μεγέθους μεγαλύτερου των 6 R, ενώ σπάνια προκαλούνται κατολισθήσεις από σεισμούς με μεγέθη μικρότερα των 4 R. Φυσικά, στην εκδήλωση ή όχι ενός κατολισθητικού φαινομένου καθώς επίσης και στα μεγέθη τό-

σο των υλικών όσο και της μετακίνησης, κυρίαρχο ρόλο παίζουν οι μορφολογικές συνθήκες και ειδικότερα οι μορφολογικές κλίσεις και οι μορφολογικές ασυνέχειες, ο προσανατολισμός του πρσανούς, η φύση των γεωλογικών σχηματισμών και η αλληλουχία τους καθώς και οι υπάρχουσες τεκτονικές ασυνέχειες. Σημαντικό επίσης στοιχείο για την εκδήλωση των κατολισθήσεων είναι και ο βαθμός της ανθρώπινης παρέμβασης στο πρσανές, ενώ κατά περίπτωση, ενδεχομένως να υποβοηθούν στην εκδήλωση και άλλα αίτια.

Για παράδειγμα, στο σεισμό του Κοβέ της Ιαπωνίας, το 1995, διαπιστώθηκε ότι η κύρια αιτία εκδήλωσης ενός πολύ μεγάλου αριθμού κατολισθήσεων εκτός οικιστικού χώρου ήταν η κλίση του πρσανούς και ο προσανατολισμός του σε σχέση με τη σεισμική εστία, ενώ αντίθετα η κύρια αιτία εντός του οικιστικού χώρου ήταν οι ανθρώπινες παρεμβάσεις.

Η μεγαλύτερη καταστροφική κατολισθήση που συνέβη ποτέ σημειώθηκε το 1970 από σεισμό μεγέθους 7,7 R στην περιοχή του όρους Nevados Huascarán στο Περού. Ο σεισμός προκάλεσε την πτώση τεράστιων όγκων χιονιού και λίθων από τα απότομα πρσανή του όρους, το οποίο με υψόμετρο 6.654 μέτρα αποτελεί την υψηλότερη κορυφή των Περουβιανών Άνδεων. Τα πολύ απότομα πρσανή του έχουν δώσει κατά καιρούς πολλές καταστροφικές ολίσθησεις, συμπεριλαμβανομένης της κατολισθήσεως του 1962, όπου σημειώθηκε μετακίνηση υλικών όγκου 13x106 κυβικών μέτρων, προκαλώντας το θάνατο σε 4.000 ανθρώπους. Το 1970, η τυρβώδης ροή λάσπης και χαλικιών, όγκου περί τα 50-100x106 κυβικά μέτρα, διέσχισε τις κοιλάδες Rio Shaschs και Santra. Το ύψος του κύματος της ροής ήταν περί τα 30 μέτρα, ενώ η ταχύτητα μετακίνησής του ήταν 270-360 χιλιόμετρα την ώρα στα πρώτα 9 χιλιόμετρα της διαδρομής του. Το κύμα αυτό της ροής λάσπης και χαλικιών κάλυψε με υλικά ύψους 10 μέτρων τις πόλεις Yungay και Ranrahirca καθώς και πολλά χωριά, ενώ σημειώθηκαν περίπου 18.000 θάνατοι. Το τεράστιο ποσό της κινηματικής ενέργειας που απαιτήθηκε για τη μεταφορά των υλικών αυτού του όγκου και σε αυτές τις αποστάσεις, προήλθε από την αρχική πτώση στα απότομα πρσανή του όρους, ενώ από την αρχική διάρρηξη μέχρι την τελική καταστροφή μεσολάβησαν μόλις τέσσερα λεπτά.

Στον ελληνικό χώρο, οι κατολισθήσεις κατά τη διάρκεια σεισμικών κινήσεων είναι ένα πολύ συχνό φαινόμενο ιδιαίτερα στην περίπτωση σεισμών με μεγέθη μεγαλύτερα των 6 R. Για παράδειγμα αναφέρονται οι σεισμοί των Αλκυονίδων το 1981 που προκάλεσαν εκτεταμένες κατολισθήσεις στην περιοχή της Περαχώρας, ο σεισμός της Καλαμάτας το 1986 με εκτεταμένες καταπτώσεις στον Ταύγετο, οι σεισμοί της Μήλου το 1992 με κατολισθήσεις στον όρμο Προβατά, οι σεισμοί του Πύργου το 1993 με καταπτώσεις στην περιοχή Βούναργου και τέλος οι σεισμοί των Γρεβενών το 1995 με κατολισθήσεις στο χωριό Κέντρο. Οι επιπτώσεις από τις κατολισθήσεις είναι ιδιαίτερα μεγάλες και στον ελληνικό χώρο και αντιπροσωπεύονται κυρίως από καταστροφές τεχνικών έργων, οδοστρωμάτων κ.ά. Ο κύριος λόγος εκδήλωσης κατολισθήσεων κατά τη διάρκεια σεισμών στον ελληνικό χώρο είναι οι έντονες μορφολογικές κλίσεις, η καταπόνηση των γεωλογικών σχηματισμών από την τεκτονική παραμόρφωση, η σύνθετη λιθοστρωματογραφική διάρθρωση κ.λπ.

Ο ΕΥΘΥΜΙΟΣ ΛΕΚΚΑΣ είναι αν.πλ. καθηγητής της Δυναμικής Τεκτονικής Εφαρμοσμένης Γεωλογίας του Πανεπιστημίου Αθηνών