

# Ο Σεισμός της Αχαΐας-Ηλείας ( $M_w=6.4$ ) της 8-6-2008: Επισκόπηση & Γεωτεχνικά Χαρακτηριστικά

## The Achaia-Elia ( $M_w=6.4$ ), 8-6-2008 Earthquake: Overview & Geotechnical Characteristics

ΑΘΑΝΑΣΟΠΟΥΛΟΣ, Γ.Α.	Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Παν. Πατρών
ΜΑΡΓΑΡΗΣ, Β. Ν.	Δρ Σεισμολόγος, Δ/ντης Ερευνών ΙΤΣΑΚ
ΚΛΗΜΗΣ, Ν. Σ.	Αναπλ. Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δ.Π.Θ.
ΜΥΛΩΝΑΚΗΣ, Γ.Α.	Αναπλ. Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Παν. Πατρών.
ΘΕΟΔΟΥΛΙΔΗΣ, Ν.	Δρ Σεισμολόγος, Δ/ντης Ερευνών ΙΤΣΑΚ.
ΠΑΠΑΙΩΑΝΝΟΥ, Χ.	Δρ Σεισμολόγος, Κύριος Ερευνητής ΙΤΣΑΚ
ΣΑΒΒΑΙΔΗΣ, Α.	Δρ Γεωφυσικός, Εντεταλμένος Ερευνητής ΙΤΣΑΚ
ΕΥΘΥΜΙΑΔΟΥ, Β.	MSc Πολιτικός Μηχανικός, Παν. Πατρών.
ΒΛΑΧΑΚΗΣ, Β. Σ.	Πολιτικός Μηχ/κος, Μ.Δ.Ε., Τμ. Πολιτικών Μηχανικών Παν. Πατρών
ΠΑΠΑΝΤΩΝΟΠΟΥΛΟΣ, Κ.	Επίκ. Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Παν. Πατρών
STEWART, J. P.	Professor, University of California, Los Angeles, CA, USA

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Ο σεισμός της Αχαΐας-Ηλείας της 8<sup>ης</sup> Ιουνίου 2008 εκδηλώθηκε σε δεξιόστροφο κατακόρυφο ρήγμα και είχε μέγεθος σεισμικής ροπής  $M_w = 6.4$ . Ο κύριος σεισμός καταγράφηκε από 27 όργανα ισχυρής κίνησης σε αποστάσεις 15 έως 350km από το ίχνος του ρήγματος. Τα δεδομένα καταδεικνύουν ταχύτερη εξασθένηση της ισχυρής κίνησης σε σχέση με τις προβλέψεις των υπαρχουσών σχέσεων για τον Ελληνικό χώρο. Εξετάζονται η πιθανότητα παρουσίας φαινομένων κατευθυντικότητας της πηγής, καθώς επίσης και μια σειρά από φαινόμενα γεωτεχνικού ενδιαφέροντος όπως η απουσία επιφανειακής διάρρηξης, η απουσία εδαφικών αστοχιών σε περιοχές με έντονα ισχυρή κίνηση, εδαφικές αστοχίες λόγω ρευστοποίησης / εδαφικής εξάπλωσης, κατολισθήσεων και καταπτώσεων βράχων.

**ABSTRACT:** The Achaia-Elia (Greece) earthquake on 8 June 2008 was a right lateral strike slip event on a nearly vertical fault having  $M_w=6.4$ . The mainshock was recorded by 27 strong motion instruments at distances ranging approximately from 15 to 350 km from the surface projection of the fault. The data demonstrate faster distance attenuation than predicted by existing Greek GMPEs. We show the possible presence of rupture directivity as well as a number of geotechnical phenomena as: absence of ground ruptures, absence of ground failures in strong motion regions and ground failures associated with liquefaction / lateral spreading, landslides and rock-falls.

### 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο σεισμός της Αχαΐας-Ηλείας της 8<sup>ης</sup> Ιουνίου 2008 εκδηλώθηκε σε δεξιόστροφο κατακόρυφο ρήγμα και είχε μέγεθος σεισμικής ροπής  $M_w = 6.4$ . Αντίστροφες αναλύσεις σε συνδυασμό με τη γεωλογική δομή και την κατανομή των επικέντρων των μετασεισμών καταδεικνύουν προσανατολισμό μη-χαρτογραφημένου ρήγματος ίσο περίπου, με  $210^\circ$ . Η διάρρηξη φαίνεται να επικεντρώθηκε σε βάθος 10-25km, με μέση μετατόπιση της τάξης του 0.5m, η οποία δεν διέρρηξε την επιφάνεια. Το βόρειο όριο της διάρρηξης φαίνεται να αντιστοιχεί σε ρήγμα διεύθυνσης ΒΑ κοντά στην παραλιακή ζώνη της Κάτω Αχαΐας. Ο κύριος σεισμός

καταγράφηκε από 27 όργανα ισχυρής κίνησης σε αποστάσεις από το ίχνος του ρήγματος από 15 μέχρι 350km. Οι μετρημένες επιταχύνσεις ξεπέρασαν τα 0.12g στην πόλη της Πάτρας και φαίνεται ότι ήταν πολλαπλάσιες σε κοντινότερες αποστάσεις από το ρήγμα. Τα δεδομένα καταδεικνύουν ταχύτερη εξασθένηση της ισχυρής κίνησης σε σχέση με τις προβλέψεις των υπαρχουσών σχέσεων για τον Ελληνικό χώρο. Παρά το γεγονός ότι οι 8 σταθμοί στην πόλη της Πάτρας καλύπτουν μεγάλο εύρος εδαφών, η επίδραση των τοπικών εδαφικών συνθηκών δεν είναι ορατή στα φάσματα απόκρισης. Εξετάζεται η πιθανότητα παρουσίας φαινομένων κατευθυντικότητας της πηγής στο βόρειο άκρο της

αμφίπλευρης διάρρηξης, και η απουσία κατευθυντικότητας στο νότιο άκρο. Εξετάζονται επίσης μια σειρά από φαινόμενα γεωτεχνικού ενδιαφέροντος όπως: (1) η απουσία επιφανειακής διάρρηξης, (2) η απουσία εδαφικών αστοχιών σε περιοχές με έντονα ισχυρή κίνηση, (3) οι παρατηρηθείσες εδαφικές αστοχίες λόγω συμπίεσης, καταβύθισης, ή ρευστοποίησης/εδαφικής εξάπλωσης και (4) κατολισθήσεις και βραχοπτώσεις.

## 2. ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Ο ισχυρός σεισμός της Β.Δ Πελοποννήσου (8/6/2008) συνέβη σε μία περιοχή ενεργού τεκτονικής στην οποία επικρατεί το μεγάλο μήκους δεξιόστροφο σεισμικό ρήγμα διεύθυνσης (CTF) εκτός των ακτών της νήσου Κεφαλονιάς. Το CTF καθορίζει το ΒΔ όριο της τεκτονικής πλάκας του Αιγαίου με ένα μέσο ρυθμό σεισμικής ολίσθησης  $\sim 3\text{cm/yr}$  (Scordilis et al., 1985, Papazachos and Kiratzi, 1996), χαρακτηρίζοντας την περιοχή ως μία από τις πλέον σεισμικά ενεργές του Ελληνικού χώρου. Στην ευρύτερη εξεταζόμενη περιοχή συνέβη σεισμός  $M_w=6.0$  το 1988, ενώ ένας σημαντικός αριθμός ενδιαμέσου μεγέθους σεισμών  $M_w=5.0-5.6$  έχει επίσης καταγραφεί στην συγκεκριμένη περιοχή (Margaris et al., 2008).

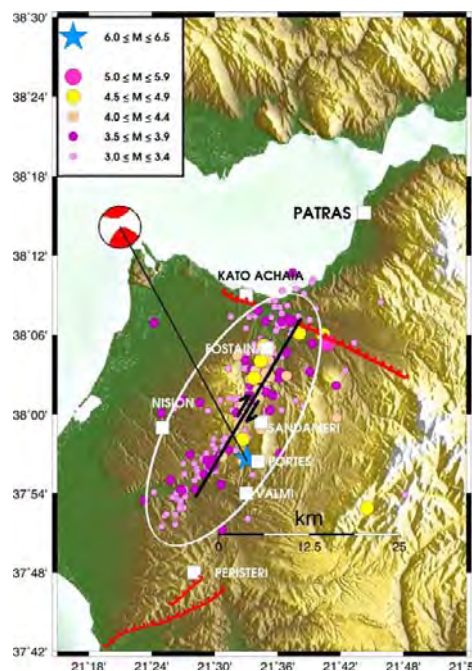
Το επίκεντρο του σεισμού εντοπίστηκε από τα σεισμολογικά δίκτυα (NOA & ΑΠΘ) με την χρήση των καταγραφών των επιταχυνσιογράφων στην επικεντρική περιοχή (Βαρθολομίο και Ζάκυνθο) στην περιοχή, με γεωγραφικές συντεταγμένες  $37.944^\circ \text{B}$  και  $21.551^\circ \text{A}$ . Στο Σχήμα 1 δίνεται η κατανομή των επικέντρων των μετασεισμών με μεγέθη  $3.0 \leq M \leq 5.0$  με βάση τον κατάλογο των σεισμών του Σεισμολογικού Σταθμού του ΑΠΘ μέχρι τα τέλη Ιουλίου 2008 (Παραϊοαννου, 2008). Στο ίδιο σχήμα δίνεται και ο μηχανισμός γένεσης του σεισμού όπως καθορίστηκε από το HRV. Η κατανομή των επικέντρων παρουσιάζει συγκέντρωση σε μία ζώνη με διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ, η οποία βρίσκεται σε καλή συμφωνία με τον μηχανισμό γένεσης. Στο Σχ. 1, το μπλε άστρο δείχνει την θέση του επίκεντρου ενώ τα άσπρα τετράγωνα τις θέσεις των οικισμών στους οποίους παρατηρήθηκαν βλάβες. Η μαύρη γραμμή παριστάνει το ρήγμα του σεισμού της 08-06-2008 όπως προκύπτει από τη κατανομή των επικέντρων, το μέγεθος του σεισμού και παρατηρήσεις της μορφολογίας της περιοχής.

Αν λάβουμε υπόψη ότι το μέσο μέγεθος του σεισμού ήταν 6.4 τότε με βάση τη σχέση την οποία έχει προτείνει ο Παπαζάχος (1989), προκύπτει μήκος ρήγματος 26km, εκτίμηση η οποία είναι σε καλή συμφωνία με την κατανομή των επικέντρων.

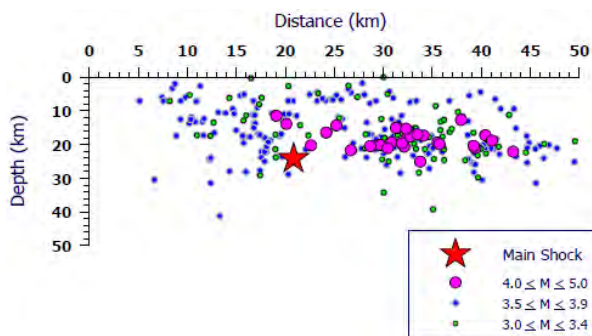
Στο Σχήμα 2 φαίνεται εγκάρσια τομή με τις θέσεις των μετασεισμών κατά μήκος του σεισμικού ρήγματος. Οι οριζόντιες αποστάσεις έχουν υπολογισθεί από το ΝΔ άκρο της ζώνης διάρρηξης ( $37.8^\circ \text{N}$ ,  $21.4^\circ \text{A}$ ). Είναι χρήσιμο να τονισθεί στο σημείο αυτό ότι οι μεγαλύτεροι μετασεισμοί ( $M \geq 4.0$ ) έχουν υποκεντρικά βάθη μεγαλύτερα από 10km. Καταβλήθηκε ιδιαίτερη προσπάθεια με κύριο στόχο τον εντοπισμό επιφανειακών διαρρήξεων στην επικεντρική περιοχή, χωρίς όμως αυτό να γίνει τελικά δυνατό.

## 3. ΙΣΧΥΡΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΚΙΝΗΣΗ

Η ισχυρή σεισμική κίνηση του σεισμού της



Σχήμα 1. Γεωγραφική κατανομή των επικέντρων των μετασεισμών μέχρι 20.06.2008 με μέγεθος  $3.0 \leq M \leq 5.0$ . Το επίκεντρο του σεισμού παριστάνεται με άστρο ενώ δίνεται επίσης και ο μηχανισμός γένεσης. Figure 1. Aftershock distribution up to 20.06.2008 with magnitude  $3.0 \leq M \leq 5.0$ . The epicentre is shown by a star symbol, as well as the focal mechanism.



Σχήμα 2. Κατανομή των μετασεισμών προβαλλόμενων στο κατακόρυφο επίπεδο της διεύθυνσης του σεισμικού ρήγματος. Ο κύριος σεισμός και οι μέγιστοι μετασεισμοί έχουν συμβεί σε βάθος 10-25 km.

Figure 2. Distribution of aftershocks projected on to vertical plane through fault strike. The mainshock and the strongest aftershocks occurred within a depth range of 10-25km.

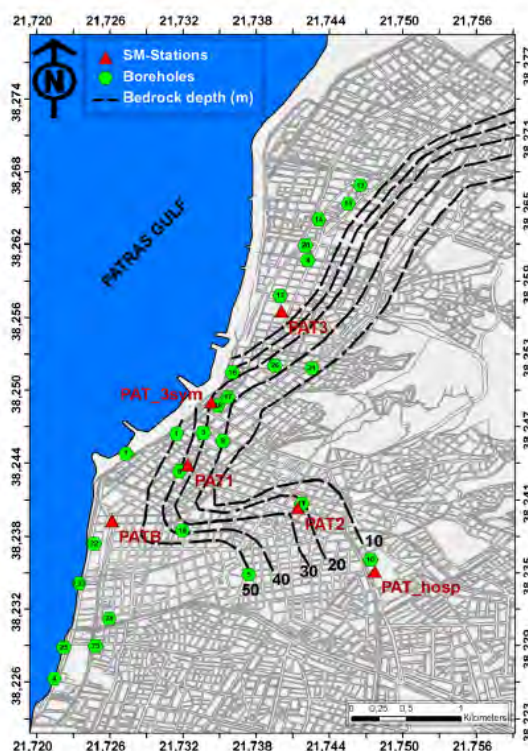
Αχαΐας-Ηλείας καταγράφηκε από 27 όργανα. Από τους 27 σταθμούς καταγραφής οι 6 βρίσκονται μέσα στο πολεοδομικό συγκρότημα της πόλης των Πατρών. Οι επιταχυνσιογράφοι αυτοί ανήκουν σε 3 διαφορετικούς φορείς (1) το ΙΤΣΑΚ: Ινστ. Τεχν. Σεισμ. Αντ. Κατ., (2) ΓΙ-ΕΑΑ: Γεωδυν. Ινστ. Εθν. Αστερ. Αθηνών και (3) Τμήμα Πολ. Μηχ. Παν. Πατρών (Margaris et al., 2010). Στα Σχήματα 3 και 4 παρουσιάζονται οι θέσεις εγκατάστασης των οργάνων που καταγράφουν την ισχυρή κίνηση του σεισμού τόσο στον ευρύτερο Ελληνικό χώρο όσο και στο πολεοδομικό συγκρότημα της πόλης των Πατρών, καθώς και οι προσεγγιστικές ισοβαθείς του υποβάθρου της περιοχής. Πληροφορίες σχετικές με τα όργανα καταγραφής, τις γεωγραφικές τους συντεταγμένες, τον χαρακτηρισμό των θέσεων εγκατάστασης, την ανάλυση - διόρθωση των καταγραφών, τα εφαρμοζόμενα ψηφιακά φίλτρα και τις μέγιστες τιμές των εδαφικών επιταχύνσεων και ταχυτήτων έχουν παρουσιαστεί από τους Margaris et al. (2010).

Στο Σχήμα 5 παρουσιάζονται οι μέγιστες τιμές των καταγεγραμμένων εδαφικών επιταχύνσεων και ταχυτήτων καθώς και φασματικών επιταχύνσεων με 5% απόσβεση ( $T_0=1.0$  sec) σε συνάρτηση με την απόσταση για μέση ανεξάρτητη διεύθυνση της οριζόντιας εδαφικής κίνησης (GMrot150). Οι τιμές αυτές συγκρίνονται με τις αντίστοιχες μέσες  $\pm 1$  τυπική απόκλιση Ελληνικές εμπειρικές σχέσεις πρόβλεψης (a: Skarlatoudis et al., 2003; Danciu and Tselentis 2007) και (b: Boore and Atkinson 2008).



Σχήμα 3. Θέσεις εγκατάστασης των οργάνων που κατέγραψαν την ισχυρή κίνηση του κύριου σεισμού της Αχαΐας-Ηλείας.

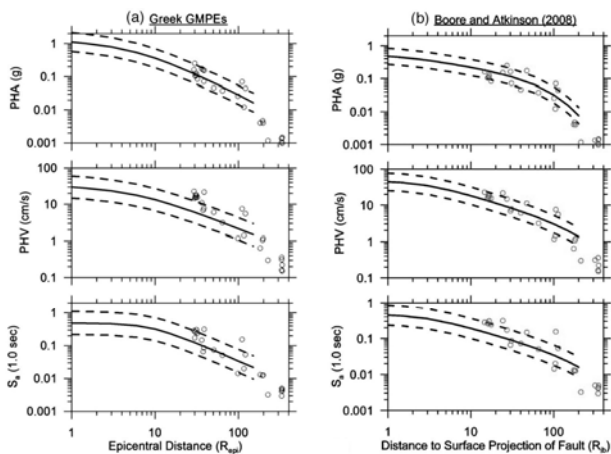
Figure 3. Location of strong motion instruments that recorded the Achaia-Elia mainshock.



Σχήμα 4. Τμήμα του πολεοδομικού συγκροτήματος της Πάτρας με τις θέσεις των οργάνων καταγραφής, τις ισοβαθείς του υποβάθρου και τις θέσεις των γεωτρήσεων από τις οποίες αντλήθηκαν στοιχεία (Koukis 1994; Athanasopoulos et al., 1998).

Figure 4. Part of Patras map showing instrument locations, approximate sediment depths and locations of boreholes which provided stratigraphy data (Koukis et al., 1994; Athanasopoulos et al., 1998).





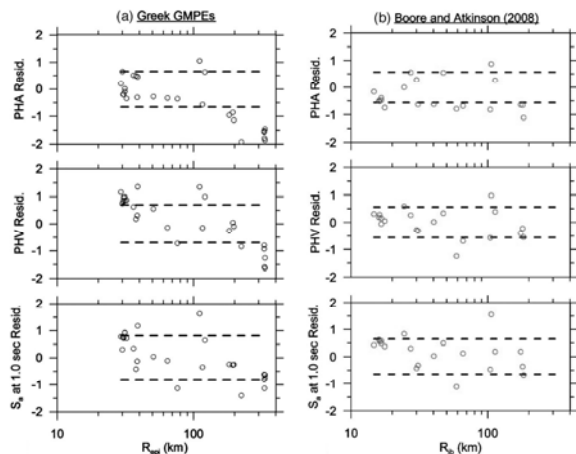
Σχήμα 5. Σύγκριση των σεισμικών εντάσεων των παρατηρημένων τιμών σε σχέση με τις προβλέψεις (a: Skarlatoudis et al., 2003; Danciu and Tselentis 2007) και (b: Boore and Atkinson 2008,  $V_{s30}=760$  m/sec).

Figure 5. Comparison of intensity measures from recorded ground motions to predictions of (a: Skarlatoudis et al., 2003; Danciu and Tselentis, 2007) and (b: Boore and Atkinson, 2008,  $V_{s30}=760$  m/sec).

Στο Σχήμα 6 δίνονται οι συγκρίσεις του μεγέθους των “υπόλοιπων” (παρατηρημένες μείον εμπειρικές τιμές) σε σύγκριση με (α) τις Ελληνικές εμπειρικές σχέσεις πρόβλεψης και (β) των Boore and Atkinson 2008, (NGA). Με βάση το Σχήμα 6 εξάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Τα PHA “υπόλοιπα” με βάση τις Ελληνικές εμπειρικές σχέσεις πρόβλεψης δεν παρουσιάζουν σημαντικές αποκλίσεις για τις αποστάσεις στις οποίες εφαρμόζεται το προσομοίωμα. Οι αντίστοιχες τιμές για PHV και  $S_a(1.0s)$  έχουν αρνητική κλίση με την απόσταση, η οποία μπορεί να οφείλεται στην γρηγορότερη απόσβεση των δεδομένων σε σχέση με το προσομοίωμα.
- Τα “υπόλοιπα” με βάση τις σχέσεις των BA, 2008 (NGA) δεν παρουσιάζουν σημαντικές κλίσεις με την απόσταση εκτός και αν περιληφθούν δεδομένα από μακρινές αποστάσεις (π.χ. Βόλβη  $R_{jb}=315-350$  km).

Στα πλαίσια της μελέτης της εδαφικής κίνησης του σεισμού Αχαΐας-Ηλείας 2008 (Margaris et al., 2010), έγινε προσπάθεια να μελετηθούν θέματα επίδρασης της κατευθυντικότητας της σεισμικής διάρρηξης. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν 4 καταγραφές: δύο προερχόμενες από την περιοχή BA της σεισμικής διάρρηξης (PYR και PYRA) και δύο (AMAA και VAR1) από

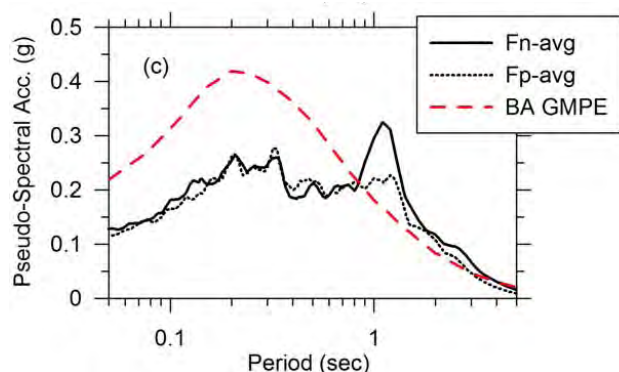


Σχήμα 6. “Υπόλοιπα” των σεισμικών εντάσεων από παρατηρημένες τιμές σε σχέση με τις προβλέψεις (α) των Ελληνικών εμπειρικών σχέσεων και (β) BA-08 GMPEs.

Figure 6. Residuals of intensity measures from recorded ground motions compared to predictions of (a) Greek GMPE, and (b) BA-08 GMPEs.

την περιοχή ΝΔ της διάρρηξης. Η απόσταση όλων των καταγραφών είναι μικρότερη των 40km από την επιφανειακή προβολή του σεισμικού ρήγματος. Με βάση τις πραγματοποιηθείσες αναλύσεις (Margaris et al., 2010) φάνηκε ότι μία μονο-κατευθυντική διάρρηξη προς τα ΒΑ παρουσιάζει εντονότερη επίδραση στην ισχυρή κίνηση απ’ ότι μία αμφι-κατευθυντική ή μονο-κατευθυντική διάρρηξη προς τα ΝΔ. Οι επιδράσεις αυτές της κατευθυντικότητας εκδηλώνονται με τη μορφή παλμών 1.0 sec οι οποίοι πολώνονται σε κάθετη προς το σεισμικό ρήγμα διεύθυνση (Margaris et al., 2010). Στο Σχήμα 7 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές των έξι καταγραφών της Πάτρας με τη μορφή των συνιστωσών FN (συνιστώσα κάθετη προς το ρήγμα) και FP (συνιστώσα παράλληλη προς το ρήγμα). Οι ανωτέρω συνιστώσες συγκρίνονται με τη μέση τιμή της νέας σχέσης εξασθένησης (NGA) των Boore and Atkinson (2008), η οποία αναφέρεται ως σχέση BA GMPE, και η οποία δεν λαμβάνει υπόψη της θέματα κατευθυντικότητας. Η σημαντική απόκλιση μεταξύ πρόβλεψης και καταγραφής, είναι ιδιαίτερα εύγλωττη και αιτιολογείται πιθανόν λόγω κατευθυντικότητας της σεισμικής διάρρηξης προς τα ΒΑ, καθώς (α) τα φασματικά σχήματα των επιταχύνσεων των καταγραφών δεν δικαιολογούνται από τις εδαφικές τομές στις θέσεις καταγραφής του σεισμού στην Πάτρα, με βάση τη μονοδιάστατη ανάλυση εδαφικής απόκρισης, και (β) δεν

παρατηρείται κάτι ανάλογο προς τη ΝΔ πλευρά της προβολής του σεισμικού ρήγματος. Βεβαίως, στο παρόν στάδιο δεν μπορεί να αποκλειστεί πλήρως και η περίπτωση επιρροής των τοπικών εδαφικών συνθηκών με τη μορφή πλευρικών ετερογενειών ή άλλων φαινομένων, τα οποία δεν μπορούν να συμπεριληφθούν και να εξεταστούν στα πλαίσια της μονοδιάστατης απόκρισης των εδαφικών σχηματισμών.



Σχήμα 7. Μέσα φάσματα επιταχύνσεων της παράλληλης και της κάθετης προς το σεισμικό ρήγμα συνιστώσας από τις θέσεις καταγραφής στην Πάτρα. Το φάσμα “BA GMPE” αποτελεί τον Μ.Ο. των μέσων φασμάτων επιτάχυνσης των έξι θέσεων στην Πάτρα.

Figure 7. Fault normal (FN) and fault parallel (FP) ground motions in Patras region. The “BA GMPE” spectrum is the average of the medians of the six site locations in Patras.

#### 4. ΕΔΑΦΙΚΕΣ ΑΣΤΟΧΙΕΣ

Στην παρούσα εργασία το ενδιαφέρον σχετικά με τις εδαφικές αστοχίες επικεντρώνεται κυρίως σε δύο θέματα: α) στα φαινόμενα ρευστοποίησης και πλευρικής εδαφικής εξάπλωσης, και β) στη σεισμική συμπεριφορά των πρηνών στην πλειόσειστη περιοχή.

##### 4.1 Ρευστοποίηση – Πλευρική εξάπλωση

Οι παρατηρήσεις πεδίου, οι οποίες έλαβαν χώρα τις επόμενες ημέρες του σεισμού της 8-6-2008 κατά ένα τμήμα τους επικεντρώθηκαν σε θέματα εδαφικών αστοχιών με έμφαση στην αναζήτηση θέσεων ρευστοποίησης ή πλευρικής εδαφικής εξάπλωσης ή και δυναμικών καθιζήσεων. Στην περιοχή της Κ. Αχαΐας εντοπίστηκαν δύο γειτονικές θέσεις (Θέση I και Θέση II) με έκδηλα τα φαινόμενα της ρευστοποίησης, Σχήμα 10. Οι ανωτέρω θέσεις βρίσκονται στην παραλιακή ζώνη της Κ.

Αχαΐας προς το BA-A τμήμα αυτής σε απόσταση περίπου 600m από τον Σιδηροδρομικό Σταθμό. Η περιοχή διαθέτει επίπεδη μορφολογία με πολύ ήπια κλίση προς τη θάλασσα (λιγότερο από 0,5%). Στη Θέση I εντοπίστηκαν κρατήρες αμμώδους – αμμοιλυώδους υλικού τεφρού ή πολύ ανοικτού καφέ - μπεζ χρώματος (Σχήμα 8).



Σχήμα 8. Κρατήρες άμμου στην παραλιακή ζώνη της Κ. Αχαΐας (Θέση I: ανατολικό τμήμα) μετά το σεισμό της 8-6-2008.

Figure 8. Sand craters in the coastal zone of K. Achaia (Site I: east part) following the 8-6-2008 earthquake.

Από εργαστηριακές δοκιμές κατάταξης του αναδυθέντος υλικού, προέκυψε ότι το υλικό τεφρού χρώματος είναι ιλυώδης άμμος (SM, Σχήμα 8α) ενώ το υλικό πολύ ανοικτού καφέ-μπεζ χρώματος είναι καθαρή ομοιόμορφη λεπτόκοκκη άμμος (SP, Σχήμα 8β).

Στην περιοχή της Θέσης I διαπιστώθηκε ότι υπήρχαν επίσης τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα της πλευρικής εξάπλωσης, δηλαδή η ανάπτυξη επιφανειακών ρωγμών ανοίγματος 2 έως 10cm περίπου, σε απόσταση έως 200m περίπου από την ακτογραμμή (Σχήμα 9). Η γενική τάση των ρωγμών υποδεικνύει εδαφική μετακίνηση προς την ακτογραμμή. Η συνολική μετακίνηση προς B-BBA κατεύθυνση υπολογίστηκε της τάξης των 30cm, αθροίζοντας τα πλάτη των ρωγμών κατά μήκος ενός νοητού άξονα NND – BBA, κάθετου στην ακτογραμμή.



Σχήμα 9. Χαρακτηριστική επιφανειακή ρωγμή στην παραλιακή ζώνη της Κ. Αχαΐας (Θέση I: ανατολικό τμήμα) μετά το σεισμό της 8-6-2008, υποδεικνύοντας μετακίνηση με κατεύθυνση BBA .

Figure 8. Characteristic surficial crack in the coastal zone of K. Achaia (Site I: east part) following the 8-6-2008 earthquake, indicating the main direction of the displacement NNE

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα έκδηλα χαρακτηριστικά γνωρίσματα της ρευστοποίησης και της πλευρικής εξάπλωσης εμφανίστηκαν σε συγκεκριμένο τμήμα της παραλιακής ζώνης (Θέση I) στο οποίο, σύμφωνα με τη μαρτυρία του ιδιοκτήτη της έκτασης, τα αμμοχαλικώδη υλικά μέχρι βάθους

5-6m είχαν απομακρυνθεί προ 10ετίας και αντικαταστάθηκαν από χαλαρές τεχνητές επιχωματώσεις υλικών αμμώδους-αμμοίλυδους σύστασης, παρόμοιων με τα αναδυθέντα υλικά από τους κρατήρες που δημιουργήθηκαν.

Στη Θέση II, η οποία βρίσκεται 350m, περίπου δυτικά της Θέσης I, εντοπίστηκαν σημάδια ρευστοποίησης σε περιορισμένη έκταση και με τη μορφή μικρότερων κρατήρων άμμου, χωρίς όμως να εντοπιστούν αντίστοιχα σημάδια πλευρικής εξάπλωσης, καθώς οι εδαφικές ρωγμές ήταν της τάξης των λίγων mm έως 1cm, κατά μέγιστο.

Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι σε μικρή απόσταση (100m περίπου) νότια από τη Θέση I, κατά τη διάρκεια του κύριου σεισμού παρατηρήθηκε η ανατροπή (και πτώση προς τα δυτικά) πλαστικού βαρελιού, ύψους 0.77m και διαμέτρου 0,40m, γεμάτου με νερό και εδραζόμενου στην επιφάνεια του εδάφους. Τέλος, σύμφωνα με τη μαρτυρία του ιδιοκτήτη της περιοχής στη Θέση I, ήταν αδύνατη η παραμονή ανθρώπου σε όρθια (αλλά ακόμα και σε καθήμενη) στάση κατά τη διάρκεια της σεισμικής δόνησης.

Στην εξεταζόμενη περιοχή της Κ. Αχαΐας δεν υπάρχει διαθέσιμη καταγραφή του κύριου σεισμού από επιταχυνσιογράφο ισχυρής εδαφικής κίνησης και γι' αυτό η τιμή της αναπτυχθείσας επιτάχυνσης εκτιμήθηκε με βάση τη σχέση εξασθένησης των Boore and Atkinson (2008). Η ανωτέρω, πρόσφατα αναπτυχθείσα σχέση εξασθένησης ανήκει στην ομάδα σχέσεων της "επόμενης γενιάς" (NGA) και διαπιστώθηκε ότι περιγράφει ικανοποιητικά τις καταγραφείσες τιμές της εδαφικής κίνησης κατά το σεισμό της Αχαΐας-Ηλείας (Margaris et al., 2010).

Από τις σχέσεις εξασθένησης BA GMPE, προκύπτει ότι, για την τιμή της απόστασης της εξεταζόμενης περιοχής ρευστοποίησης από το σεισμικό ρήγμα ( $R_{jb} \approx 6\text{km}$ ), η μέση τιμή (γεωμετρικός μέσος) της κορυφαίας οριζόντιας εδαφικής επιτάχυνσης είναι  $a_{\max} = (1/3)g$ , ενώ η περιοχή που αντιστοιχεί στο εύρος  $\pm 1\sigma$  είναι: 0.20g έως 0.60g. Η ανωτέρω περιοχή τιμών βρίσκεται σε συμφωνία με τις παρατηρήσεις πεδίου στις οποίες περιλαμβάνεται η ανατροπή βαρελιού και η απώλεια της ισορροπίας όρθιων (αλλά ακόμα και καθήμενων) ανθρώπων κατά τη διάρκεια του σεισμικού κραδασμού της 8-6-2008. Μικρής κλίμακας ρευστοποίηση εντοπίστηκε και στην παραλιακή περιοχή της Μανωλάδας, 18km BA της Ανδραβίδας και περίπου 20km απόσταση



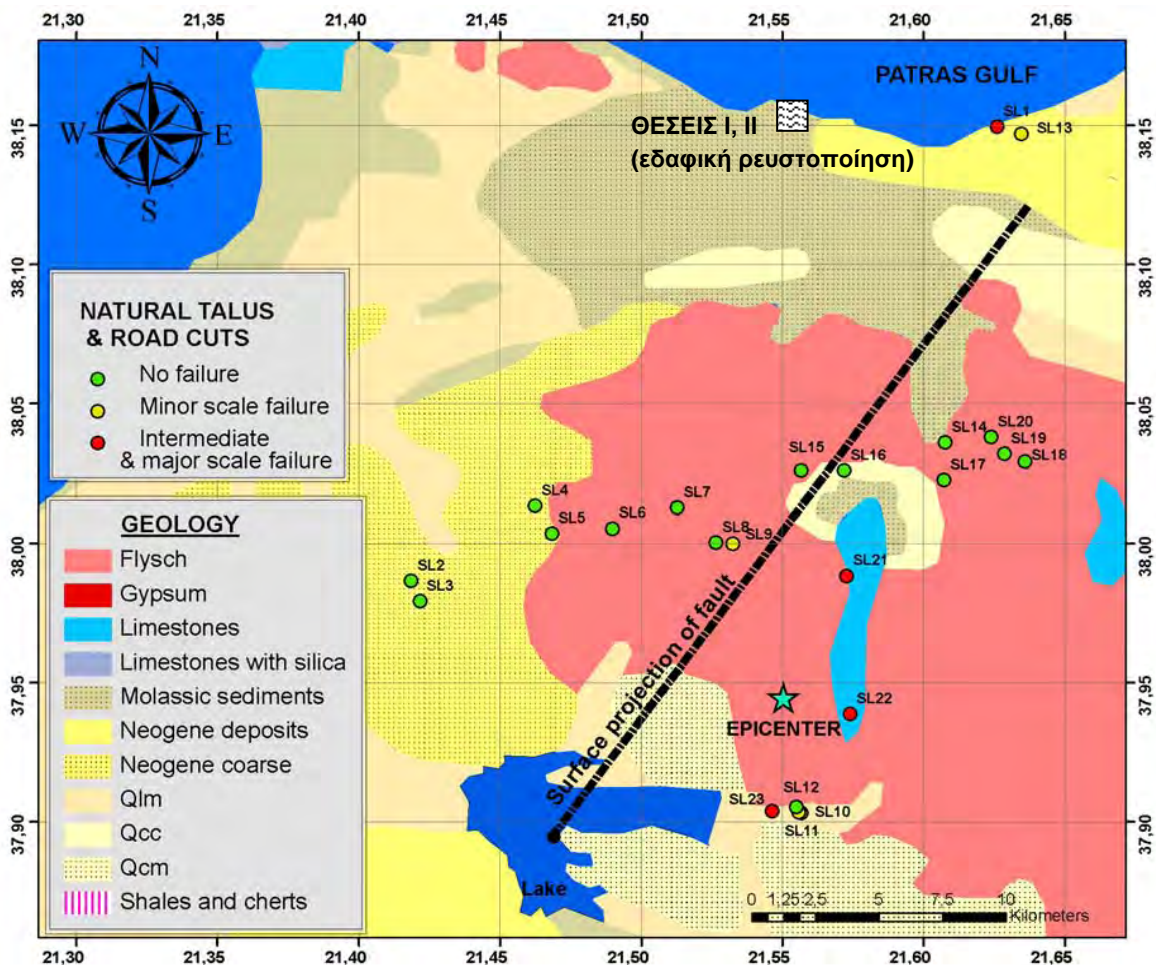
από το σεισμικό ρήγμα (συντεταγμένες: 38.061<sup>0</sup>, 21.3276<sup>0</sup>). Η ρευστοποίηση εμφανίστηκε με τη μορφή μικρών κρατήρων καθαρής άμμου σε απόσταση 50m από τη θάλασσα, χωρίς ίχνη πλευρικής εξάπλωσης.

#### 4.2 Σεισμική Συμπεριφορά Πρανών

Ο σεισμός της Αχαΐας-Ηλείας ( $M_W=6.4$ , 8-6-2008), προκάλεσε έναν αριθμό κατολισθήσεων εδαφικών πρανών και αποκολλήσεων - καταπτώσεων βράχων στην

πλειόσειστη περιοχή. Συνολικά, εξετάστηκαν 23 θέσεις εδαφικών-βραχωδών πρανών, ορισμένα εκ των οποίων υπέστησαν αστοχίες ενώ τα υπόλοιπα παρέμειναν ευσταθή ή εμφάνισαν αστοχίες μικρής έκτασης, και παρουσιάζονται στο Σχήμα 10.

Με βάση τη γεωλογία της περιοχής, στα εξετασθέντα πρανή συναντώνται 3 διαφορετικές ενότητες: (1): εναλλαγές αργιλικών, ιλυωδών και αμμωδών σχηματισμών με περισσότερο ή λιγότερο



Σχήμα 10. Χάρτης με τις θέσεις των 23 πρανών της πλειόσειστης περιοχής που ελέγχθηκαν. Το πράσινο χρώμα συμβολίζει τα φυσικά και τεχνητά πρανή που δεν αστόχησαν, ενώ το κίτρινο χρώμα υποδηλώνει αστοχίες μικρής κλίμακας( π.χ. λίγα βραχώδη τεμάχια σχετικά μικρού όγκου σε μικρές αποστάσεις από τον πόδα του πρανού ή μικρούς κώνους κορημάτων στον πόδα του πρανού). Αντίθετα, τα σύμβολα με κόκκινο χρώμα αναφέρονται σε αστοχίες μέσης ή μεγάλης κλίμακας (είτε με τη μορφή μεγάλου όγκου κορημάτων στον πόδα του πρανού, είτε ως σημαντικός αριθμός μέσου ή μεγάλου όγκου βραχώδη τεμάχια σε μεγάλες αποστάσεις από τον πόδα του πρανού).

Figure 10. Map showing the 23 slopes investigated in the meizoseismal area. The green color denotes the natural talus and the road cuts that did not fail; the yellow color is for failures of minor scale (either a few small boulders at a small fall distance, or a small volume of scree deposits at the toe of the slope); the red color points out failures of intermediate and major scale (either a large volume of debris, or a few large boulders with medium to big fall distances).

συγκολλημένα κροκαλοπαγή “σχηματισμός Βάλμης”, (2): φλύσχης με ορίζοντες ψαμμίτη και κροκαλοπαγών, και (3): ασβεστόλιθοι ή δολομιτικοί ασβεστόλιθοι. Τα πρηνή που ελέγχθηκαν, κατατάσσονται στις ακόλουθες κατηγορίες: (i) ορύγματα στις γεωλογικές ενότητες 1 και 2, (ii) φυσικά πρηνή των γεωλογικών ενοτήτων 1 και 2, και (iii) φυσικά βραχώδη πρηνή από ασβεστόλιθο (γεωλογική ενότητα 3). Η πλειονότητα των εξετασθέντων πρηνών δεν έδειξαν ίχνη αστοχίας μετά από τη σεισμική διέγερση. Ένας μικρός αριθμός αστοχιών καταγράφηκε σε μικρή απόσταση ( 5 έως 6km) από την προβολή του σεισμικού ρήγματος. Οι αστοχίες που καταγράφηκαν σε ορύγματα παρουσιάστηκαν κυρίως με τη μορφή επιδερμικών ολισθήσεων και συσσώρευση του εδαφικού ή και βραχώδους υλικού κακής ποιότητας με τη μορφή κώνου στον πόδα του ορύγματος μικρού ύψους και κλίση πρηνών  $\alpha:\beta=1:1$ . Στα φυσικά πρηνή οι αστοχίες που καταγράφηκαν ήταν κυρίως 2 τύπων: (α) συνδυασμένη δράση αποκόλλησης και ανατροπής βράχων πάνω από ασθενέστερο υλικό το οποίο επιδερμικά ήταν διαβρωμένο και υποχώρησε με τη μορφή επιδερμικής ολίσθησης, αφαιρώντας το έρεισμα στα υπερκείμενα υγιέστερα βραχώδη τμήματα, και (β) καθαρές περιπτώσεις αποκόλλησης και ανατροπής υγιών τεμαχών ασβεστολίθων όγκου κυμαινόμενου από 0.5 έως και 7m<sup>3</sup>.

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΙΚΑ ΣΧΟΛΙΑ

Ο σεισμός της Αχαΐας – Ηλείας ( $M_w=6.4$ , 8-6-2008) αν και είχε «οδυνηρές» συνέπειες, έδωσε την ευκαιρία για τη συλλογή πολύτιμων δεδομένων και την αξιοποίησή τους για την αύξηση των γνώσεων σχετικά με (α)τη σεισμική πηγή, (β)τα χαρακτηριστικά της ισχυρής εδαφικής κίνησης που καταγράφηκε σε 27 διαφορετικά σημεία, μέχρι και σε απόσταση 350km, (γ)την επίδραση της κατευθυντικότητας, (δ)την επιρροή των τοπικών εδαφικών συνθηκών, (ε)τις εδαφικές αστοχίες τύπου ρευστοποίηση-πλευρική εξάπλωση, και (στ)κατολισθήσεις εδαφικών πρηνών ή καταπτώσεις βραχωδών τεμαχών.

## 6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Athanasopoulos G.A., Pelekis, P.C., Leonidou, E.A. 1998. «Effects of Site Conditions on Seismic Ground Response in the City of Patras», Greece, Technical Report to

- Earthquake Planning and Protection Organization, Greece, 108 pages.
- Boore, D.M. and G.M. Atkinson 2008. «Ground motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods between 0.01 and 10.0s», *Earthquake Spectra*, **24**, 99-138.
- Danciu, L. and G-A. Tselentis 2007. «Engineering ground-motion parameters attenuation relationships for Greece», *Bull Seismol. Soc. Am.* **97**, 162-183.
- Koukis, G. 1994. "Geotechnical Investigation of the Greater Area of the City of Patras", Technical Report to Water Supply and Sewer Division, Patras Municipality.
- Margaris, B., G. Athanasopoulos, G. Mylonakis, C. Papaioannou, N. Klimis, N. Theodoulidis, A. Savvaidis, V. Eftymiadou, and J. P. Stewart, 2010. « $M_w=6.4$  Achaia-Elia (Greece) earthquake on 8 June 2008: Source Characteristics, Ground Motions, and Ground failure», *Earthquake Spectra*, vol. 26, No 2, pp. 399-424, May 2010.
- Papaioannou C. (2008) «Information on the fault at NW Peloponnesus which caused the  $M_w=6.4$  earthquake on 8 June 2008». Pres. XXXI ESC Gen. Ass., Hersonissos Crete, 7-12 Sept. 2008, (abstr. vol.), 324.
- Papazachos, C.B. and A.A. Kiratzi, (1996). «A detailed study of the active crustal deformation in the Aegean and surrounding area». *Tectonophysics*, 253, 129-154.
- Scordilis, E.M., G.F. Karakaisis, B.G. Karakostas, D.G. Panagiotopoulos, P.E. Comninakis and B.C. Papazachos, (1985). «Evidence for transform faulting in the Ionian Sea. The Cephalonia island earthquake sequence of 1983». *Pure Appl. Geophys.*, 123, 388-397.
- Skarlatoudis, A.A., C. B. Papazachos, B. N. Margaris, N. Theodoulidis, Ch. Papaioannou, I. Kalogeras, E. M. Scordilis, and V. Karakostas, 2003. «Empirical peak ground-motion predictive relations for shallow earthquakes in Greece». *Bull Seismol. Soc. Am.* **93**, 2591-2603.