

Διερεύνηση της επίδρασης της διάρκειας της εδαφικής κίνησης σε κατασκευές μεσαίων και μεγάλων περιόδων Investigation of the strong motion duration effect on medium and long period structures

Ιωάννης ΤΑΦΛΑΜΠΑΣ¹, Χαρίλαος ΜΑΝΙΑΤΑΚΗΣ², Κωνσταντίνος ΣΠΥΡΑΚΟΣ³

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Στην παρούσα εργασία προτείνεται ένας νέος ορισμός της διάρκειας της ισχυρής εδαφικής κίνησης που συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των γνωστών ορισμών της οριοθετημένης (bracketed) και της σημαντικής (significant) διάρκειας. Βάσει του χρονικού ολοκληρώματος της απόλυτης τιμής της εδαφικής ταχύτητας, προσδιορίζεται δείκτης που χαρακτηρίζεται σαν αθροιστική απόλυτη μετακίνηση (cumulative absolute displacement) $CAD(t)$. Ο δείκτης χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της προτεινόμενης διάρκειας της ισχυρής εδαφικής κίνησης. Ο νέος ορισμός της διάρκειας παρουσιάζει ιδιαίτερα καλή συσχέτιση με το ισχυρό τμήμα της εδαφικής καταγραφής, ιδιαίτερα στην περίπτωση του κοντινού πεδίου. Η προτεινόμενη διάρκεια και ο δείκτης της αθροιστικής απόλυτης μετακίνησης χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση δύο κανονικοποιημένων παραμέτρων. Η πρώτη παράμετρος σχετίζεται με την φασματική μεγέθυνση της ταχύτητας και η δεύτερη με τον ισοδύναμο αριθμό κύκλων φόρτισης. Οι ανωτέρω παράμετροι συσχετίζονται καλύτερα με τις ακραίες φασματικές τιμές στην περιοχή μεσαίων και μεγάλων περιόδων σε σχέση με γνωστούς δείκτες της εδαφικής κίνησης.

ABSTRACT : This study presents a new definition of the strong motion duration, combining the alternative bracketed and significant duration definitions. Based on the time integral of the absolute ground velocity, a new index is defined, as the cumulative absolute displacement $CAD(t)$. The index is used in order to evaluate the strong motion duration. The proposed bracketed-significant duration is well correlated with the strong motion part of the records, especially in the case of near-source events. The duration and the $CAD(t)$ index are correlated with the structural behaviour of medium-to-long period structures. Two normalized parameters representing the amplification of structural response and the number of equivalent loading cycles are determined in terms of the proposed duration and $CAD(t)$ indices. The proposed parameters appear to be better correlated with the structural response than other well-known indices.

¹ Πολιτικός Μηχανικός, Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, email: taflan@central.ntua.gr

² Πολιτικός Μηχανικός ΥΔ, Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, email: chmaniat@mail.ntua.gr

³ Καθηγητής, Δ/ντης Εργαστηρίου Αντισεισμικής Τεχνολογίας, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, email: spyrakos@hol.gr

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ισχυρή εδαφική κίνηση αποτελεί ένα σύνθετο φυσικό φαινόμενο το οποίο σχετίζεται με την απότομη έκλυση ενέργειας κατά την διάρρηξη του γενεσιουργού ρήγματος. Η ένταση του σεισμικού γεγονότος περιγράφεται, βάσει των αισθητών αποτελεσμάτων της εδαφικής κίνησης, σύμφωνα με διάφορες εν χρήσει κλίμακες. Η αξιοποίηση των καταγραφών της εδαφικής κίνησης επιτρέπει την εκτίμηση ποσοτικών δεικτών της έντασης της σεισμικής διέγερσης βάσει του εύρους, της διάρκειας και του συχνοτικού περιεχομένου κάθε καταγραφής.

Οι πιο συνηθισμένοι δείκτες της έντασης της εδαφικής κίνησης είναι η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση και ταχύτητα των καταγραφών, η σημαντική διάρκεια, και οι τιμές που αντιστοιχούν σε χαρακτηριστικές περιόδους των φασμάτων απόκρισης. Ήδη στην πρωτοποριακή του εργασία, ο Housner (1975) προτείνει τον συνδυασμό δύο παραμέτρων προκειμένου να προσδιορισθεί ένας αντιπροσωπευτικός δείκτης για την ένταση της εδαφικής κίνησης. Στην συγκεκριμένη εργασία, προτείνονται ως κατάλληλες παράμετροι, η διάρκεια και ο μέσος ρυθμός έκλυσης της ενέργειας της εδαφικής κίνησης που αντιστοιχούν στο πιο ισχυρό τμήμα της. Σύμφωνα με τον Housner (1975), το τμήμα αυτό αντιστοιχεί στην περιοχή του χρονικού ολοκληρώματος του Arias (1970) με την πιο έντονη κλίση. Η μέση κλίση αυτού του έντονου τμήματος χαρακτηρίζεται ως «ισχύς» της εδαφικής κίνησης και, σε συνδυασμό με την αντίστοιχη διάρκεια, θεωρείται ότι προσδιορίζει την ένταση του σεισμού στην εξεταζόμενη θέση.

Κλασσική παραμένει η δημοσίευση των Trifunac and Brady (1975), στην οποία διατυπώνεται η έννοια της σημαντικής (significant) διάρκειας. Ο δείκτης αυτός ορίζεται σαν το χρονικό διάστημα ανάμεσα στα όρια του 5% και του 95% της έντασης που εκτιμάται από το ολοκλήρωμα του Arias. Για τον προσδιορισμό των κατάλληλων ορίων προτείνεται τα φάσματα απόκρισης για την προκύπτουσα σημαντική διάρκεια να μην έχουν τιμές μικρότερες του 90% των φασμάτων της συνολικής διάρκειας της καταγραφής. Σε πιο πρόσφατη δημοσίευση, οι Bommer and Martinez-Pereira (1999) έδωσαν τον ορισμό της δρώσας (effective) διάρκειας που οριοθετείται από καθορισμένες τιμές του ολοκληρώματος του Arias. Ακόμη, έχουν προταθεί διάφοροι ορισμοί της οριοθετημένης (bracketed) διάρκειας, που βασίζονται στην εκτίμηση του χρονικού διαστήματος ανάμεσα στην πρώτη και την τελευταία εμφάνιση ενός καθορισμένου, απόλυτου ή σχετικού, ορίου της εδαφικής επιτάχυνσης (Kawashima and Aizawa, 1989).

Κατά περιόδους, έχουν προταθεί διάφοροι δείκτες έντασης της εδαφικής κίνησης που συνδυάζουν παραμέτρους της εδαφικής κίνησης και σχετίζονται με την απόκριση των κατασκευών. Ενδεικτικά, μεταξύ των πλέον διαδεδομένων δεικτών είναι:

- οι μέσες τετραγωνικές (mean square) και οι μέσες ριζικές (root mean square) τιμές των χρονικών ολοκληρωμάτων του τετραγώνου της εδαφικής επιτάχυνσης, ταχύτητας ή μετακίνησης κατά την σημαντική διάρκεια της αντίστοιχης καταγραφής (Riddel, 2007),

- η διαφορική ταχύτητα (incremental velocity) IV και μετακίνηση (incremental displacement) ID, που υπολογίζονται με την ολοκλήρωση των παλμών της εδαφικής επιτάχυνσης και ταχύτητας αντίστοιχα (Anderson and Bertero, 1987),
- η αθροιστική απόλυτη ταχύτητα (cumulative absolute velocity) CAV, που εκτιμάται από το ολοκλήρωμα της απόλυτης τιμής της επιτάχυνσης κατά την συνολική διάρκεια της καταγραφής (EPRI, 1991),
- η χαρακτηριστική ένταση (characteristic intensity) CI που προτείνεται από τον Ang (1990) και δίδεται από την σχέση:

$$CI = a_{rms}^{1.5} \cdot t_d^{0.5} \quad (1)$$

όπου a_{rms} είναι η μέση ριζική (root mean square) εδαφική επιτάχυνση και t_d είναι η σημαντική διάρκεια που ορίζεται από τους Trifunac και Brady (1975), και τέλος,

- ο δείκτης έντασης που προτείνεται από τους Fajfar *et al.* (1990), με την μορφή:

$$FI = pgv \cdot t_d^{0.25} \quad (2)$$

όπου pgv είναι η μέγιστη εδαφική ταχύτητα (peak ground velocity).

Οι ανωτέρω δείκτες συνδυάζουν παραμέτρους του εύρους και της διάρκειας προκειμένου να ορίσουν την ένταση της εδαφικής κίνησης. Σύμφωνα με τους Cabañas *et al.* (1997), η εκτίμηση της απόκρισης των κατασκευών είναι πιο αποτελεσματική όταν λαμβάνεται υπ' όψιν ο συνδυασμός εύρους και διάρκειας. Συγκρίσεις μεταξύ των παραμέτρων της εδαφικής κίνησης και συσχέτισή τους με τους δείκτες βλάβης των κατασκευών έχουν πραγματοποιηθεί από πολλούς ερευνητές (Koliopoulos *et al.*, 1998, Elenas, 2000, Nanos and Elenas, 2006).

Πρέπει, τέλος, να σημειωθεί ότι οι περισσότεροι δείκτες έντασης στηρίζονται σε συνήθεις καταγραφές που αντιστοιχούν σε μεγάλες αποστάσεις από το κοντινό πεδίο. Η αυξημένη πύκνωση των δικτύων επιταχυνσιογράφων έχει επιτρέψει την συλλογή καταγραφών με διακριτά χαρακτηριστικά κοντινού πεδίου, όπως είναι οι ισχυροί παλμοί μεγάλης περιόδου στη χρονοϊστορία της εδαφικής ταχύτητας. Οι παλμοί που αντιστοιχούν στο φαινόμενο της πρόσω κατευθυντικότητας (forward directivity) είναι άμεσα συσχετισμένοι με την ένταση της εδαφικής κίνησης και τις επιπτώσεις της σε κατασκευές μεσαίας και μεγάλης περιόδου (Spyrakos *et al.*, 2008). Η διάρκεια της εδαφικής ταχύτητας, εκφρασμένη σαν αριθμός παλμών ή ισοδύναμων κύκλων, έχει πιο σαφή φυσική σημασία από την διάρκεια της υψίσυχνης εδαφικής επιτάχυνσης που σχετίζεται περισσότερο με συστήματα μικρής ιδιοπεριόδου.

ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΙ ΟΡΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ

Προτεινόμενη Διάρκεια Ισχυρής Εδαφικής Κίνησης

Στην παρούσα εργασία, δίνεται έμφαση στην περιοχή μεσαίων και μεγάλων περιόδων του φάσματος ταχυτήτων, η οποία σχετίζεται με το εύρος και το συχνοτικό περιεχόμενο της εδαφικής ταχύτητας σύμφωνα με τους Nau and Hall (1984), Matsumura (1992), Akkar and Özen (2005). Ακόμη, η ένταση της εδαφικής κίνησης κοντινού πεδίου σχετίζεται με το εύρος και τον αριθμό των παλμών της εδαφικής ταχύτητας (Mavroeidis and Papageorgiou, 2003).

Δεδομένου ότι η εδαφική ταχύτητα είναι συνδεδεμένη με την έκλυση ενέργειας, προτείνεται η συσχέτιση της σημαντικής διάρκειας με το χρονικό διάστημα κατά το οποίο το ολοκλήρωμα της απόλυτης τιμής της εδαφικής ταχύτητας παρουσιάζει μεγάλη κλίση. Η τρέχουσα πρακτική, αντίθετα, χρησιμοποιεί την κλίση του χρονικού ολοκληρώματος του Arias (1970) που σχετίζεται με την εδαφική επιτάχυνση. Η παρούσα εργασία εισάγει την έννοια της αθροιστικής απόλυτης μετακίνησης (cumulative absolute displacement) $CAD(t)$, σε αναλογία με την ήδη χρησιμοποιούμενη έννοια της αθροιστικής απόλυτης ταχύτητας (cumulative absolute velocity) CAV. Η αθροιστική απόλυτη μετακίνηση ορίζεται με βάση το ολοκλήρωμα της απόλυτης τιμής της εδαφικής ταχύτητας κατά την διάρκεια της καταγραφής και δίνεται από την σχέση:

$$CAD(t) = \int_0^t |v_g| dt \quad (3)$$

Η χρήση της αθροιστικής απόλυτης μετακίνησης $CAD(t)$ επιτρέπει τον συνδυασμό των γνωστών εννοιών της οριοθετημένης (bracketed) και της σημαντικής (significant) διάρκειας. Δεδομένου ότι η κλίση του χρονικού ολοκληρώματος της $CAD(t)$ ισούται με την απόλυτη τιμή της ταχύτητας, είναι δυνατός ο προσδιορισμός ενός ορίου εδαφικής ταχύτητας ώστε η αντίστοιχη οριοθετημένη διάρκεια να συμπίπτει με την σημαντική διάρκεια που περιέχει την απότομη κλίση του χρονικού ολοκληρώματος της $CAD(t)$.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε ένα δείγμα από γνωστές καταγραφές της εδαφικής κίνησης, προκειμένου να αξιολογηθεί η προτεινόμενη μέθοδος. Για κάθε καταγραφή προσδιορίσθηκε το κατάλληλο όριο της εδαφικής ταχύτητας, προκειμένου η προτεινόμενη οριοθετημένη-σημαντική (bracketed - significant) διάρκεια t_{bs} να περιλαμβάνει την απότομη κλίση της $CAD(t)$. Το όριο της εδαφικής ταχύτητας επελέγη ώστε το αντίστοιχο φάσμα απόκρισης να έχει τιμές μεγαλύτερες από το 90% του φάσματος της συνολικής διάρκειας. Είναι χαρακτηριστικό ότι το ίδιο κριτήριο χρησιμοποιήθηκε από τους Trifunac και Brady (1975) για τον προσδιορισμό της σημαντικής διάρκειας t_d .

Η συσχέτιση της έντασης της εδαφικής κίνησης με την προτεινόμενη διάρκεια έγινε μέσω ενός καθοριστικού δείκτη της απόκρισης των κατασκευών μεσαίων και μεγάλων περιόδων. Ο δείκτης που προτείνεται είναι η φασματική ταχύτητα που αντιστοιχεί στη δεσπόζουσα περίοδο T_{d-p} της φασματικής μετακίνησης. Η περίοδος T_{d-p} συσχετίζεται με την περίοδο των παλμών της εδαφικής ταχύτητας, όπως παρατηρούν οι Mavroeidis *et al.* (2004). Δεδομένου ότι η περίοδος T_{d-p} βρίσκεται κοντά στο όριο μεταξύ των περιοχών σταθερής φασματικής

ταχύτητας και μετακίνησης, η φασματική ταχύτητα SV_{Td-p} θεωρείται ικανοποιητικός δείκτης της απόκρισης των κατασκευών μεσαίας και μεγάλης περιόδου.

Συσχέτιση Προτεινόμενης Διάρκειας και Απόκρισης: Παράμετροι P_1 και P_2 .

Η παρούσα εργασία αξιοποιεί την προτεινόμενη από τον Housner (1975) χρήση δύο παραμέτρων για να διευκρινίσει τις επιπτώσεις της διάρκειας και του εύρους της διέγερσης. Η συσχέτιση μεταξύ των χαρακτηριστικών της εδαφικής κίνησης και του δείκτη απόκρισης SV_{Td-p} διατυπώθηκε μέσω δύο κανονικοποιημένων παραμέτρων P_1 και P_2 . Οι παράμετροι αυτές συσχετίζονται μεταξύ τους με βάση την παραδοχή ότι η απόκριση των κατασκευών συνδέεται με τον αριθμό των κύκλων της διέγερσης.

Η παράμετρος P_1 σχετίζεται με την διάρκεια και αντιστοιχεί στον ισοδύναμο αριθμό κύκλων της ιστορίας της εδαφικής ταχύτητας. Η παράμετρος εκτιμήθηκε με βάση την δεσπόζουσα περίοδο της φασματικής μετακίνησης που προσεγγίζει την τιμή T_{d-p} . Λαμβάνεται υπόψιν η παρατήρηση του Rodriguez-Marek (2000) ότι η μέση περίοδος των κύκλων της εδαφικής ταχύτητας έχει πολύ καλή συσχέτιση με την περίοδο που αντιστοιχεί στο μέγιστο παλμό. Χρησιμοποιώντας την έμμεση μέθοδο υπολογισμού (indirect counting method) (Hancock and Bommer, 2005), ο ισοδύναμος αριθμός κύκλων P_1 μπορεί να εκτιμηθεί από το πηλίκο της οριοθετημένης σημαντικής διάρκειας t_{bs} προς την περίοδο T_{d-p} :

$$P_1 = \frac{t_{bs}}{T_{d-p}} \quad (4)$$

Η σχέση μεταξύ της διάρκειας της εδαφικής κίνησης και της απόκρισης των κατασκευών είναι συνυφασμένη με τη μέση τιμή των ευρών της εδαφικής κίνησης κατά τη σημαντική διάρκεια. Σύμφωνα με τον Housner (1975), η μέση τιμή των ευρών χαρακτηρίζεται σαν «ισχύς» του ισχυρού τμήματος της καταγραφής. Στην παρούσα εργασία, σαν μέτρο της εδαφικής ταχύτητας ορίσθηκε μία μέση ή δρώσα (effective) τιμή V_{mean} της ταχύτητας. Η V_{mean} προκύπτει ως η μέση τιμή του χρονικού ολοκληρώματος της $CAD(t)$ κατά την οριοθετημένη-σημαντική διάρκεια t_{bs} από την ακόλουθη σχέση:

$$V_{mean} = \frac{\int_0^{t_{bs}} |v_g| \cdot dt}{t_{bs}} \quad (5)$$

Η δεύτερη κανονικοποιημένη παράμετρος P_2 συνδέει την απόκριση στην εδαφική κίνηση με την δρώσα ή μέση τιμή της ταχύτητας V_{mean} . Η παράμετρος προκύπτει από το πηλίκο της φασματικής ταχύτητας SV_{Td-p} προς την μέση ταχύτητα V_{mean} . Ο λόγος αυτός αποτελεί μία μορφή συντελεστή φασματικής μεγέθυνσης. Η προκύπτουσα παράμετρος δίνεται από την σχέση:

$$P_2 = \frac{SV_{Td-p}}{V_{mean}} \quad (6)$$

Μεθοδολογία Ανάλυσης Καταγραφών

Η μεθοδολογία εκτίμησης των προαναφερθεισών παραμέτρων ακολούθησε τα παρακάτω στάδια:

- αρχικά υπολογίσθηκαν για κάθε καταγραφή τα φάσματα ταχυτήτων και μετακινήσεων, για 5% απόσβεση, προκειμένου να εκτιμηθεί η δεσπόζουσα περίοδος T_{d-p} και η αντίστοιχη φασματική ταχύτητα SV_{Td-p} ,
- στην συνέχεια εκτιμήθηκε το χρονικό ολοκλήρωμα της $CAD(t)$ και εξετάσθηκαν διαφορετικά όρια εδαφικής ταχύτητας προκειμένου να καθοριστεί η προτεινόμενη οριοθετημένη-σημαντική διάρκεια t_{bs} και να ικανοποιηθεί το κριτήριο που τέθηκε σχετικά με τις αντίστοιχες φασματικές τιμές,
- από την αθροιστική απόλυτη μετακίνηση $CAD(t)$ και την διάρκεια t_{bs} εκτιμήθηκε η μέση τιμή V_{mean} και, μέσω των εξισώσεων 4 και 6, υπολογίσθηκαν οι κανονικοποιημένες παράμετροι P_1 και P_2 ,
- τέλος, από το δείγμα των τιμών των P_1 και P_2 , εκτιμήθηκε η καμπύλη που συνδέει τη φασματική τιμή SV_{Td-p} με τα χαρακτηριστικά της εδαφικής κίνησης.

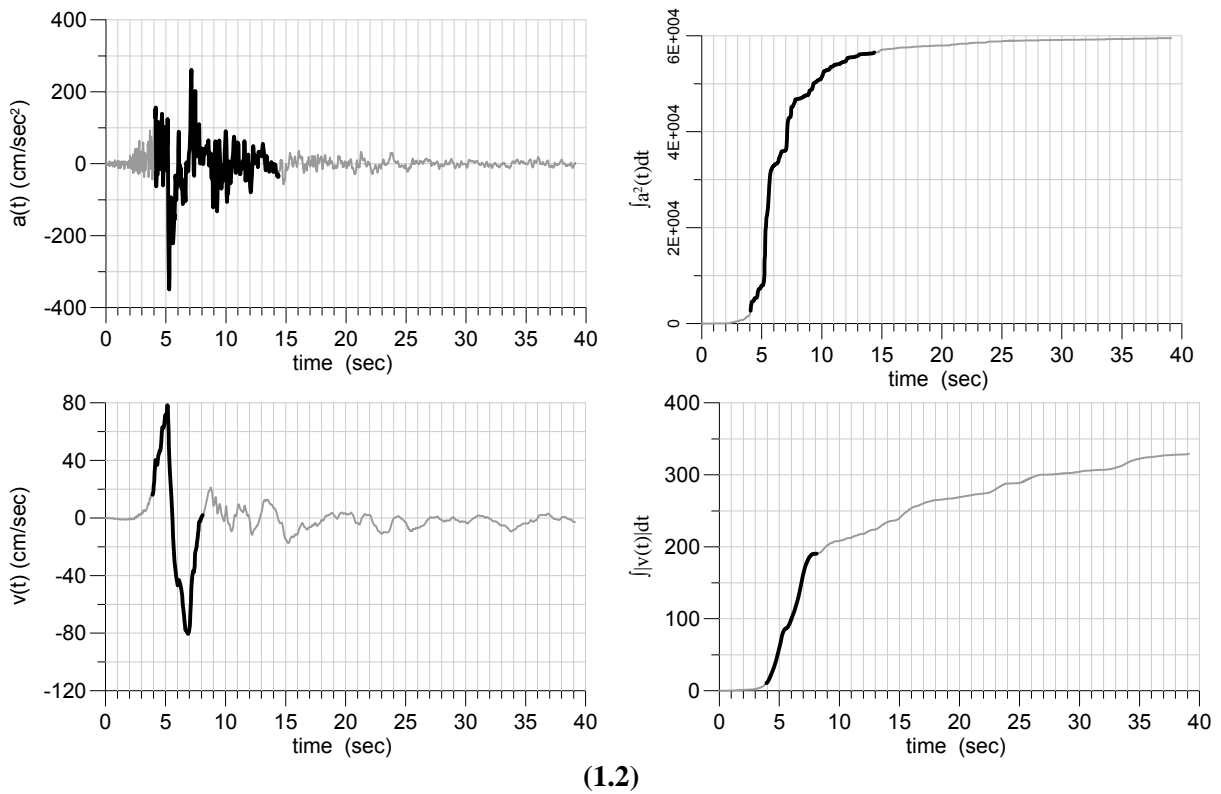
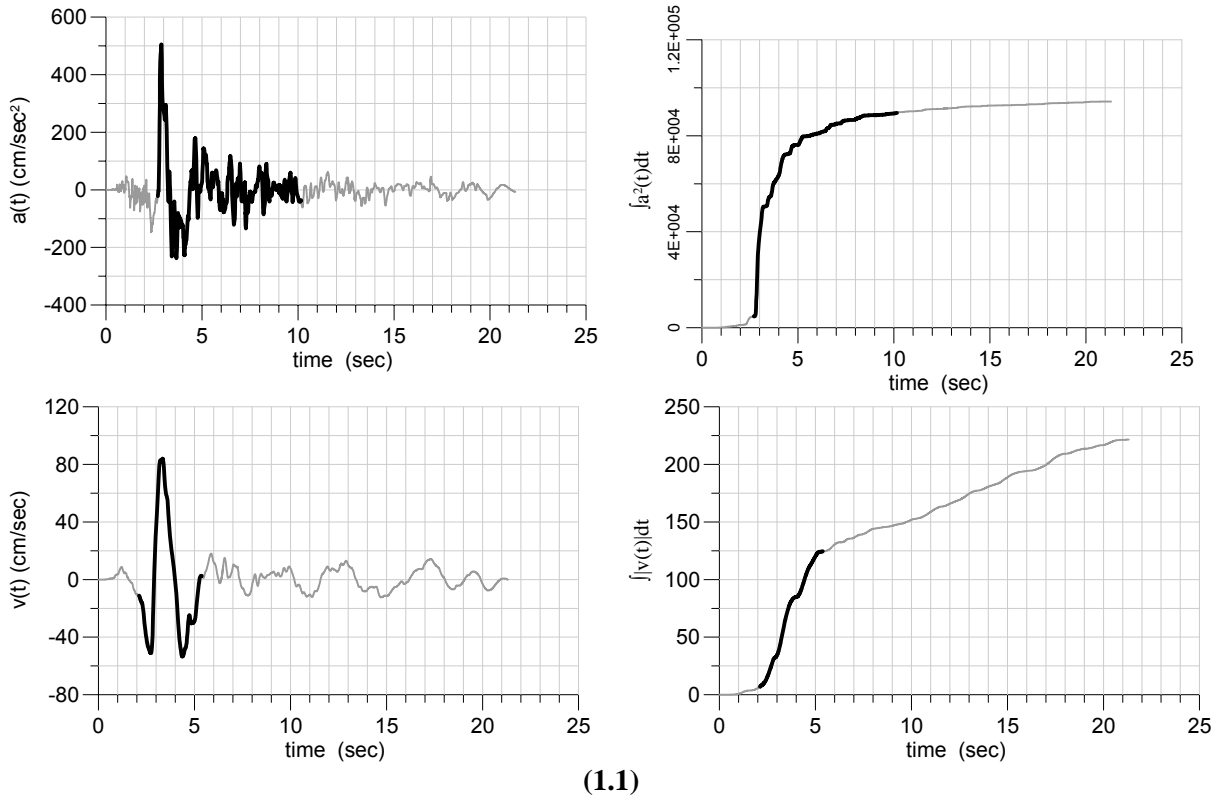
Οι προτεινόμενοι δείκτες P_1 και P_2 συνδυάζουν πληροφορίες σχετικά με το εύρος, την διάρκεια και το συχνотικό περιεχόμενο των εξεταζόμενων καταγραφών.

ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε δείγμα 54 καταγραφών που επελέγη από τις βάσεις δεδομένων COSMOS και PEER με τα ακόλουθα κριτήρια:

- οι καταγραφές προέρχονται από σημαντικά σεισμικά γεγονότα διαφόρων περιοχών, ώστε να αποφεύγεται η συσχέτισή τους με συγκεκριμένες σεισμικές πηγές
- τα σεισμικά γεγονότα είναι μεσαίου και μεγάλου μεγέθους
- οι καταγραφές προέρχονται από θέσεις με διαφορετικές εδαφικές συνθήκες και αποστάσεις από την πηγή
- η σημαντική διάρκεια των καταγραφών ποικίλει και, τέλος,
- λαμβάνονται υπ' όψιν φαινόμενα πρόσω (forward) και όπισθεν (backward) κατευθυντικότητας.

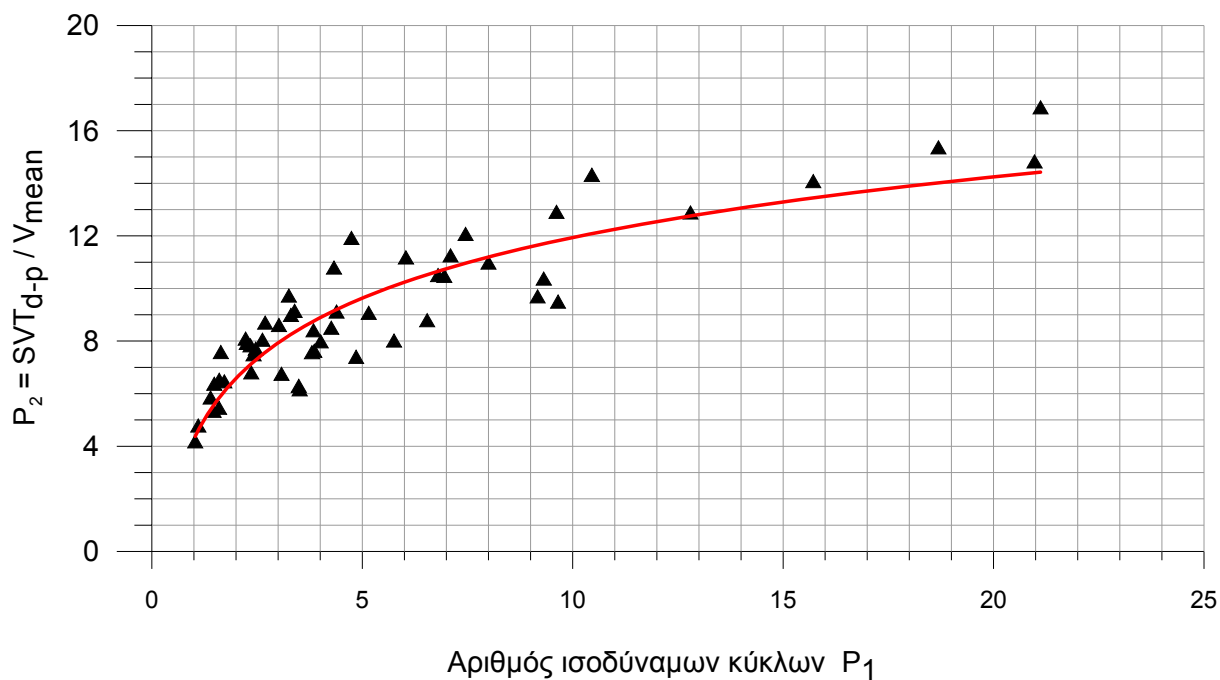
Οι καταγραφές προέρχονται από γνωστά γεγονότα, όπως οι σεισμοί του Northridge (USA,1994), του Kobe (Japan,1995) και του Chi-Chi (Taiwan,1999). Επίσης συμπεριλαμβάνεται ο σεισμός του San Salvador του 1986, προκειμένου να συνεκτιμηθούν καταγραφές κοντινού πεδίου, με επίδραση κατευθυντικότητας, που προέρχονται από μεσαίου μεγέθους σεισμικά γεγονότα. Συμπεριλήφθηκε επίσης ο σεισμός της Λευκάδας του 2003, προκειμένου να ενισχυθεί το δείγμα με καταγραφές μεγάλης διάρκειας.



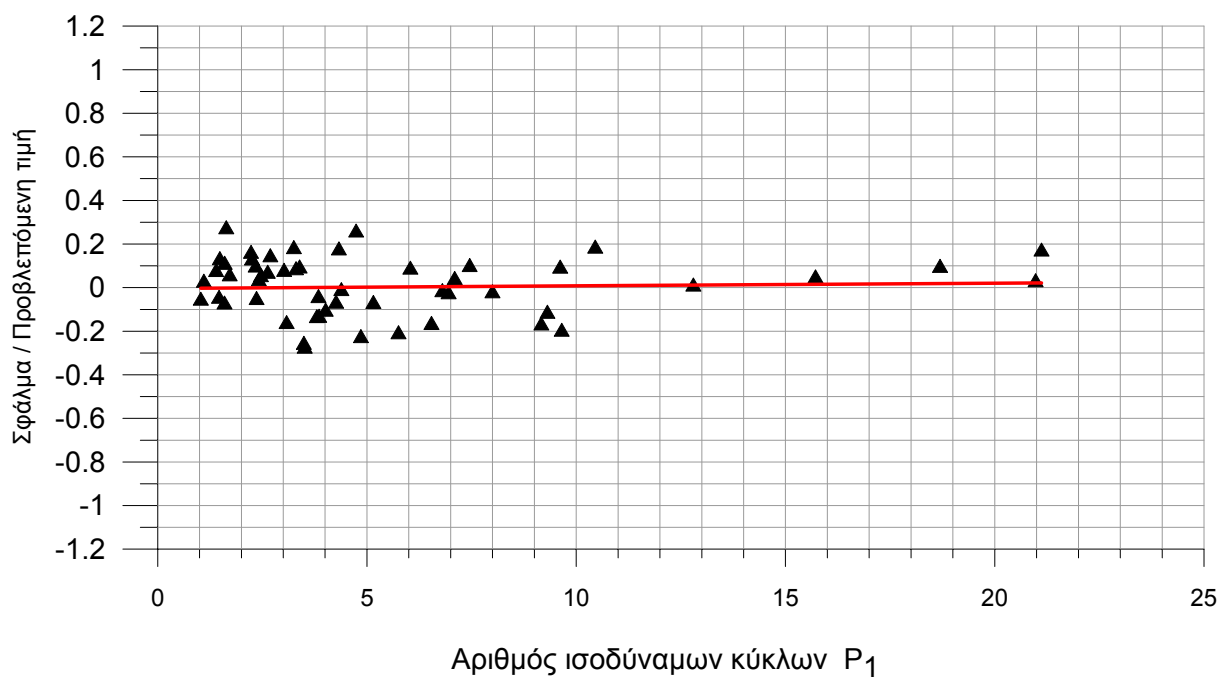
Σχήμα 1. Με έντονη γραμμή επισημαίνεται η σημαντική διάρκεια, t_d , των Trifunac και Brady (1975) στη χρονοϊστορία της επιτάχυνσης και στο ολοκλήρωμα του Arias (1970) και η οριοθετημένη σημαντική διάρκεια, t_{bs} , στη χρονοϊστορία της ταχύτητας και στο ολοκλήρωμα $CAD(t)$.

(1.1) Συσιστώσα ERZ-000 (Erzincan, Turkey, 1992).

(1.2) Συσιστώσα E04-230 (Imperial Valley, USA, 1979)



(2.1)



(2.2)

Σχήμα 2.

(2.1) Δείγμα τιμών παραμέτρων P_1 , P_2 και προκύπτουσα καμπύλη ελαχίστων τετραγώνων.

(2.2) Συσχέτιση σφάλματος και αριθμού ισοδύναμων κύκλων.

Στοιχεία των καταγραφών, όπως το μέγεθος, ο σταθμός και ο προσανατολισμός της συσκευής καταγραφής, η ποιότητα του εδάφους και η απόσταση από το ρήγμα δίνονται στον

Πίνακα 1. Χρησιμοποιήθηκαν οι διορθωμένες καταγραφές, όπως δίνονται στις βάσεις δεδομένων και δεν έγινε καμία περαιτέρω διόρθωση.

Για καταγραφές κοντινού πεδίου, που χαρακτηρίζονται από λίγους ισχυρούς παλμούς, η οριοθετημένη σημαντική διάρκεια t_{bs} φαίνεται να προσεγγίζει καλύτερα την διάρκεια των σημαντικών κύκλων της εδαφικής ταχύτητας από τη διάρκεια t_d . Στο **Σχήμα 1** παρουσιάζονται σαν χαρακτηριστικά παραδείγματα οι καταγραφές ERZ-000 (Erzincan, Turkey, 1992) και E04-230 (Imperial Valley, USA, 1979), όπου η οριοθετημένη σημαντική διάρκεια είναι σημαντικά βραχύτερη από την διάρκεια των Trifunac και Brady (1975).

Μία σημαντική παρατήρηση αφορά στο όριο (threshold) της εδαφικής ταχύτητας για την εκτίμηση της οριοθετημένης-σημαντικής διάρκειας. Το όριο αυτό ανέρχεται, κατά μέσο όρο, στο 30% της μέγιστης εδαφικής ταχύτητας και μπορεί να θεωρηθεί σαν κριτήριο για τον προσδιορισμό του ισχυρού τμήματος της εδαφικής κίνησης.

Στο **Σχήμα 2** παρουσιάζεται η καμπύλη που προκύπτει από την συσχέτιση των παραμέτρων P_1 και P_2 . Είναι εμφανές ότι η φασματική μεγέθυνση P_2 τείνει σε μία ασυμπτωτική τιμή με την αύξηση του αριθμού των ισοδύναμων κύκλων της εδαφικής ταχύτητας P_1 . Το φαινόμενο είναι ανάλογο της μεγέθυνσης της απόκρισης μονοβαθμίων συστημάτων κάτω από αυξανόμενο αριθμό κύκλων φόρτισης. Η καμπύλη παρουσιάζει ένα συντελεστή συσχέτισης της τάξης του 90% και το μέγιστο σφάλμα είναι μικρότερο του 30% της προβλεπόμενης τιμής. Η καμπύλη δίνεται από τη σχέση

$$P_2 = 3.33 \times \ln(P_1) + 4.28 \quad (7)$$

Οι τιμές της κανονικοποιημένης παραμέτρου P_1 είναι μικρές όταν σχετίζονται με καταγραφές που χαρακτηρίζονται από φαινόμενα πρόσω κατευθυντικότητας (forward directivity), με δύο ή τρεις σημαντικούς κύκλους εδαφικής ταχύτητας. Οι μεγάλες τιμές της παραμέτρου προκύπτουν για περιπτώσεις καταγραφών που χαρακτηρίζονται από φαινόμενα όπισθεν (backward) κατευθυντικότητας, με μεγάλο αριθμό ισοδύναμων κύκλων εδαφικής κίνησης και σχετικά μικρό εύρος, όπως είναι οι καταγραφές ELC-180 (Imperial Valley, USA, 1940), HAL-150 (Morgan Hill, USA, 1984) και JSH-000, JSH-090 (Landers, USA, 1992).

Προκειμένου να αξιολογηθεί η συσχέτιση που προκύπτει ανάμεσα στους προτεινόμενους δείκτες, διερευνήθηκε η σχέση μεταξύ της φασματικής τιμής SV_{Td-p} και ευρύτατα χρησιμοποιούμενων δεικτών, όπως είναι η μέγιστη εδαφική ταχύτητα rgv και ο προτεινόμενος από τους Fajfar *et al.* (1990) δείκτης (βλ. Εξίσωση 2). Στα **Σχήματα 3** και **4** εμφανίζονται οι τιμές που προέκυψαν και οι ευθείες ελαχίστων τετραγώνων που εκτιμήθηκαν. Οι συντελεστές συσχέτισης είναι παρεμφερείς και δεν υπερβαίνουν το 90%. Παρά τους συγκρίσιμους συντελεστές συσχέτισης, το μέγιστο σφάλμα υπερβαίνει το 50% της προβλεπόμενης τιμής, ειδικά για τις καταγραφές που επηρεάζονται από φαινόμενα όπισθεν κατευθυντικότητας. Ακόμη, παρατηρείται συσχέτιση του σφάλματος με τον ισοδύναμο αριθμό κύκλων της εδαφικής διέγερσης. Η συσχέτιση αυτή είναι μικρότερη στη περίπτωση του δείκτη των Fajfar *et al.* (1990), δεδομένου ότι συνεκτιμά τη σημαντική διάρκεια της εδαφικής κίνησης.

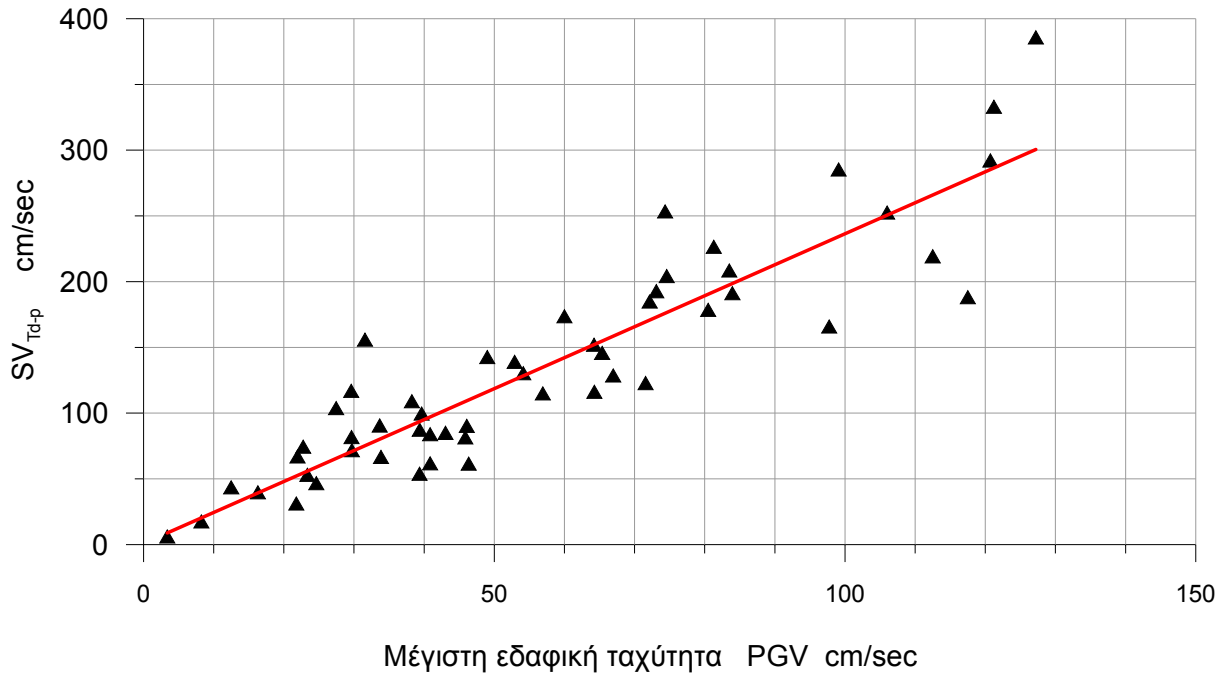
Πίνακας 1. Δείγμα Καταγραφών.

α/α	Σεισμικό Γεγονός	Ημερομηνία	Μηχανισμός	Mw	Σταθμός	Οριζόντιες Συνιστώσες	Έδαφος	Απόσταση
1	Imperial Valley, CA, USA	19-05-1940	Strike-slip ^b	6.2-6.4	El Centro-ELC	180-270	SL	8.0 ^{ft}
2	Parkfield, CA, USA	27-06-1966	Strike-slip	6.4	Cholame Array 5-C05	355-085	SL	5.2 ^{ft}
3	San Fernando, CA, USA	09-02-1971	Reverse	6.5-6.7	Pacoima Dam-PCD	164-254	HR	3.0 ^{fr}
4	Gazli, USSR	17-05-1976	Reverse	6.7-6.9	Karakyr Point-KAR	000-090	SR	3.0 ^{hc}
5	Tabas, Iran	16-09-1978	Reverse	7.1	Tabas-TAB	344-074	SL	1.2 ^{ft}
6	Coyote Lake, CA, USA	08-06-1979	Strike-slip	5.6	Gilroy Array 1-GA1	230-320	HR	9.0 ^{ft}
7	Imperial Valley, CA, USA	15-10-1979	Strike-slip	6.4-6.6	El Centro Array 2-E02	140-230	SL	10.4 ^{fr}
8	"	"	"	"	El Centro Array 4-E04	140-230	SL	6.0 ^{ft}
9	Morgan Hill, CA, USA	24-04-1984	Strike-slip ^b	6.2	Halls Valley-HAL	150-240	SL	2.0 ^{ft}
10	Nahanni, Canada	23-12-1985	Reverse	6.7	Iverson –SITE1	010-280	HR	9.4 ^{fp}
11	San Salvador	10-10-1986	Strike-slip	5.6	Geol. Invest. Center, Channel 1-CIG	180-270	SR	4.0 ^{ec}
12	Whittier Narrows, CA, USA	10-10-1987	Reverse	6.0	Alhambra, Fremont Sc.-ALF	180-270	SL	13.1 ^{fp}
13	Superstition Hills, CA, USA	24-11-1987	Strike-slip	6.4-6.6	El Centro-ELC	000-090	SL	13.6 ^{ft}
14	Loma Prieta, USA	17-10-1989	Obverse	6.8-7.0	Gilroy Array 1-G01	000-090	SR	10.1 ^{fp}
15	Erzincan, Turkey	13-03-1992	Strike-slip	6.6	Erzincan-ERZ	000-090	SL	2.0 ^{ft}
16	Landers, CA, USA	28-06-1992	Strike-slip ^b	7.1-7.3	Joshua Tree-JSH	000-090	SL	11.6 ^{ft}
17	Northridge, CA, USA	17-01-1994	Reverse	6.7-6.8	Jensen Filtration Plant-JFA	292-022	SL	5.2 ^{fp}
18	"	"	"	"	Arleta Fire Station-SFY	000-090	SL	8.0 ^{fp}
19	"	"	"	"	Sylmar Converter Station-SCH	281-011	SL	5.0 ^{fp}
20	"	"	"	"	Canoga Park Church-CPC	196-106	SL	13.7 ^{fp}
21	"	"	"	"	Sun Valley Grace Church-SVG	000-090	SL	9.3 ^{fp}
22	Hanshin (Kobe), Japan	17-01-1995	Strike-slip	6.8-6.9	Takatori-TAK	000-090	SL	1.1 ^{ft}
23	"	"	"	"	Japanese Meteorological Agency-KJM	000-090	SL	0.6 ^{fr}
24	Chi-Chi, Taiwan	20-09-1999	Reverse	7.5-7.8	CHY024	000-090	SL	7.7 ^{fp}
25	"	"	"	"	CHY028	000-090	SL	2.3 ^{fp}
26	Duzce, Turkey	12-11-1999	Obverse	7.1	Duzce-DZC	180-270	SL	8.3 ^{ft}
27	Lefkada, Greece	19-08-2003	Strike-slip	6.2-6.4	City of Lefkas-LEF1	Long-Trans	SL	10.0 ^{ec}

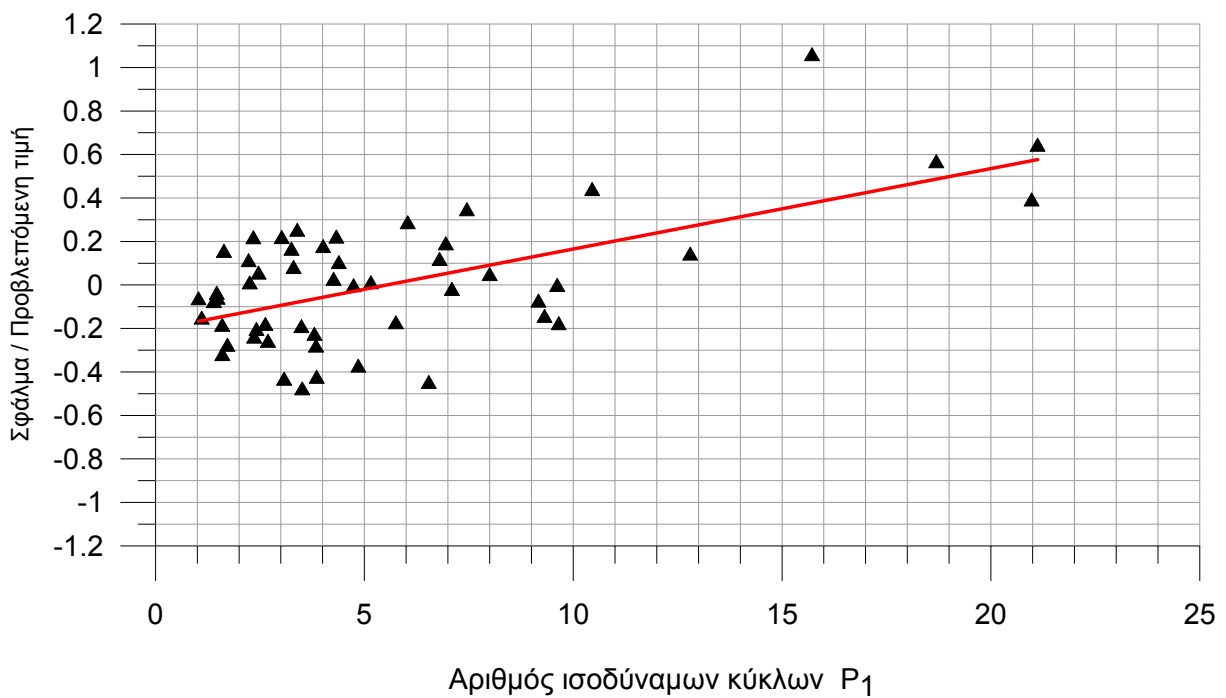
* ο άνω δείκτης - **b** υποδηλώνει επίδραση όπισθεν κατευθυντικότητας

** οι άνω δείκτες στην στήλη της απόστασης υποδηλώνουν: -**ft**, απόσταση από το ίχνος του ρήγματος, - **fr**, απόσταση από τη διάρρηξη, -**fp**, απόσταση από την επιφάνεια του ρήγματος, - **ec**, επικεντρική απόσταση, - **hc**, υποκεντρική απόσταση,

*** τα σύμβολα των εδαφικών τύπων υποδηλώνουν: - **SL**, έδαφος και αλλουβιακές αποθέσεις, - **SR**, ιζηματογενής και κροκαλοπαγής βράχος, - **HR**, σκληρό βραχώδες έδαφος



(3.1)

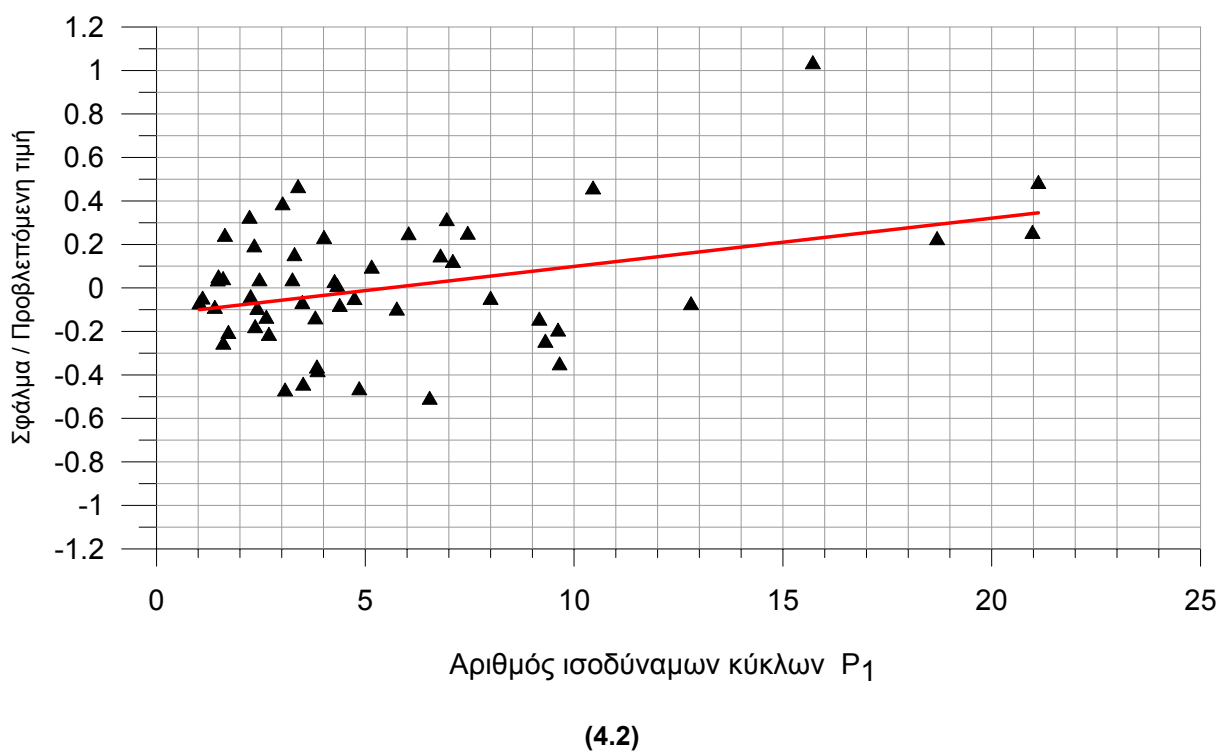
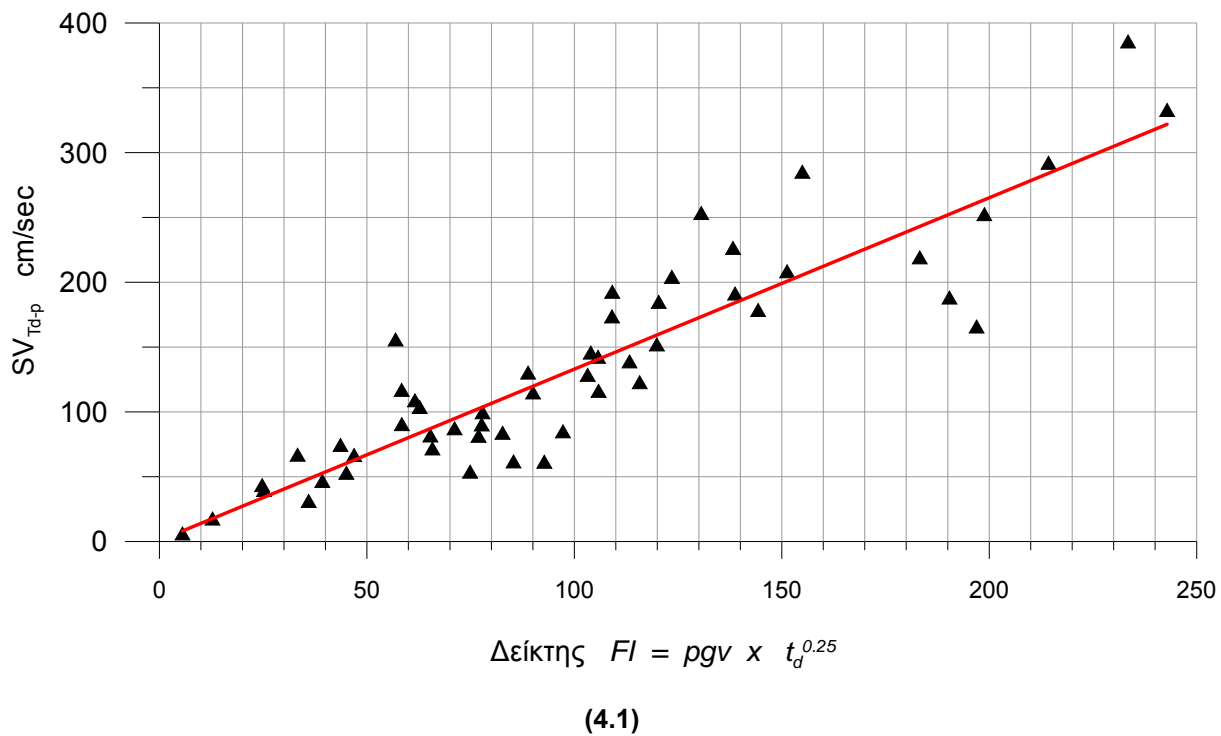


(3.2)

Σχήμα 3.

(3.1) Δείγμα τιμών φασματικής και εδαφικής ταχύτητας με την προκύπτουσα ευθεία ελάχιστων τετραγώνων.

(3.2) Συσχέτιση σφάλματος και αριθμού ισοδύναμων κύκλων.



Σχήμα 4.

(4.1) Δείγμα τιμών φασματικής ταχύτητας και δείκτη FI με την προκύπτουσα ευθεία ελαχίστων τετραγώνων.

(4.2) Συσχέτιση σφάλματος και αριθμού ισοδύναμων κύκλων.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα εργασία εισάγει ένα νέο ορισμό της διάρκειας της ισχυρής εδαφικής κίνησης, συνδυάζοντας τις γνωστές έννοιες της οριοθετημένης και της σημαντικής διάρκειας. Η διάρκεια ορίζεται βάσει του χρονικού ολοκληρώματος της απόλυτης τιμής της εδαφικής ταχύτητας, οριζόμενου ως αθροιστική απόλυτη μετακίνηση $CAD(t)$, αντί του συνήθως χρησιμοποιούμενου ολοκληρώματος του Arias.

Η προτεινόμενη διάρκεια συσχετίζεται καλύτερα με το ισχυρό τμήμα της εδαφικής κίνησης από την σημαντική διάρκεια των Trifunac και Brady, ειδικά για καταγραφές που χαρακτηρίζονται από φαινόμενο πρόσω (forward) κατευθυντικότητας. Το όριο για την εκτίμηση της προτεινόμενης διάρκειας ανέρχεται, κατά μέσο όρο, στο 30% της μέγιστης εδαφικής ταχύτητας και μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα γενικό κριτήριο για τον προσδιορισμό του ισχυρού τμήματος της εδαφικής κίνησης.

Σαν δείκτης της απόκρισης των κατασκευών μεσαίας και μεγάλης περιόδου θεωρείται η φασματική ταχύτητα SV_{Td-p} που αντιστοιχεί στη δεσπόζουσα περίοδο της φασματικής μετακίνησης. Με βάση την SV_{Td-p} και χαρακτηριστικά της εδαφικής κίνησης, όπως είναι η προτεινόμενη διάρκεια, το χρονικό ολοκλήρωμα $CAD(t)$ και η χαρακτηριστική περίοδος T_{d-p} , ορίζονται δύο κανονικοποιημένες παράμετροι P_1 και P_2 που συνδέουν την απόκριση στην περιοχή μεσαίων και μεγάλων περιόδων με τα χαρακτηριστικά της εδαφικής κίνησης.

Η προκύπτουσα σχέση μεταξύ των παραμέτρων P_1 και P_2 περιορίζει σημαντικά το σφάλμα εκτίμησης της απόκρισης των κατασκευών μεσαίας και μεγάλης περιόδου, όπως αυτή προκύπτει βάσει γνωστών δεικτών έντασης της εδαφικής κίνησης. Η βελτίωση του σφάλματος είναι ιδιαίτερα ικανοποιητική για καταγραφές μεγάλης διάρκειας, που χαρακτηρίζονται από το φαινόμενο της όπισθεν (backward) κατευθυντικότητας.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ο Χ.Α. Μανιατάκης ευχαριστεί θερμά το Κοινωνικό Ίδρυμα Αλέξανδρος Σ. Ωνάσης για την οικονομική υποστήριξη που του παρέχει με υποτροφία για εκπόνηση διδακτορικής διατριβής.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Akkar S., and Özen Ö. (2005), "Effects of peak ground velocity on deformation demands for SDOF systems", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 34(13), pp. 1551-1571.
- Anderson J.C., and Bertero V.V. (1987), "Uncertainties in establishing design earthquakes", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 113, pp. 1709-1724.
- Ang A.H.S. (1990), "Reliability bases for seismic safety assessment and design", *Proceedings, Fourth National Conference on Earthquake Engineering*, EERI, Palm Springs, 1, pp. 29-45.
- Arias A. (1970), A measure of earthquake intensity. In: Hansen R.J, editor. *Seismic Design for Nuclear Power Plants*, pp. 438-483. Cambridge, Massachusetts: MIT Press. 23.
- Bommer J.J., and Martinez-Pereira, A. (1999), "The effective duration of earthquake strong motion", *Journal of Earthquake Engineering*, 3, pp. 127-172.

- Cabañas L., Benito B., and Herraiz M. (1997), "An Approach to the Measurement of the Potential Structural Damage of Earthquake Ground Motions", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 26(1), pp. 79-92.
- COSMOS Virtual Data Center, <http://db.cosmos-eq.org/scripts/default.plx>.
- Elenas A. (2000), "Correlation between seismic acceleration parameters and overall structural damage indices of buildings", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 20, pp. 93-100.
- EPRI (1991), *Standardization of Cumulative Absolute Velocity*, EPRI Report RP3096-1, Electric Power Research Institute, Palo Alto, California.
- Fajfar P., Vidic T., and Fischinger M. (1990), "A measure of earthquake motion capacity to damage medium-period structures", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 9, pp. 236-242.
- Hancock J., and Bommer J.J. (2005), "The effective number of cycles of earthquake ground motion", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 34, pp. 637 – 664.
- Housner, G.W. (1975), "Measures of the severity of ground shaking", *Proceedings U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, Ann Arbor, Michigan, pp. 25-33.
- Kawashima K., and Aizawa K. (1989), "Bracketed and normalized durations of earthquake ground acceleration", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 18(7), pp. 1041-1051.
- Koliopoulos P.K., Margaris B.N., Klimis N. (1998), "Duration and energy characteristics of Greek strong motion records", *Journal of Earthquake Engineering*, 2(3), pp. 1-27.
- Matsumura K. (1992), "On the intensity measure of strong motions related to structural failures", *Proceedings of the 10th World Conference on Earthquake Engineering*, Madrid, Spain, 1, pp. 375-380.
- Mavroeidis G.P., and Papageorgiou A.S. (2003), "A mathematical representation of near-fault ground motions". *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93, pp. 1099-1131.
- Mavroeidis G.P., Dong G., and Papageorgiou A.S. (2004), "Near-fault ground motions, and the response of elastic and inelastic single-degree-of-freedom (SDOF) systems", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 33, pp. 1023-1049.
- Nanos N., and Elenas A. (2006), "Seismic duration effects on the vulnerability of buildings" *Proceedings of the 1st European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Geneva, Switzerland, paper No. 402.
- Nau J.M., and Hall W.J. (1984), "Scaling methods for earthquake response spectra", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 110, pp. 1533-1548.
- PEER Strong Motion Database, <http://peer.berkeley.edu/smcat/index.html>.
- Riddell R. (2007), "On ground motion intensity indices", *Earthquake Spectra*, 23 (1), pp. 147-173.
- Rodriguez-Marek, A. (2000), *Near-Fault Seismic Site Response*, Ph.D. Dissertation, Civil Engineering Department, University of California at Berkeley.
- Spyrakos C.C., Maniatakis Ch.A., and Taflambas J. (2008), "Evaluation of near-source seismic records based on damage potential parameters: Case study: Greece", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 28, pp. 738–753.
- Trifunac M.D., and Brady A.G. (1975), "A study on the duration of strong earthquake ground motion", *Bull. Seism. Soc. Amer.*, 65, pp. 581-626.