

Υπολογισμός της εισαγόμενης σεισμικής ενέργειας με τη χρήση ενός νέου ορισμού της διάρκειας Estimation of earthquake input energy based on a new definition of strong motion duration

Ιωάννης ΤΑΦΛΑΜΠΑΣ¹, Χαρίλαος ΜΑΝΙΑΤΑΚΗΣ², Κωνσταντίνος ΣΠΥΡΑΚΟΣ³

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Η παρούσα εργασία προτείνει μία νέα μέθοδο για την εκτίμηση της εισαγόμενης σεισμικής ενέργειας σε κατασκευές μεσαίων και μεγάλων περιόδων. Η μέθοδος στηρίζεται σε έναν νέο ορισμό της διάρκειας της ισχυρής εδαφικής κίνησης, που συνδυάζει τα πλεονεκτήματα της οριοθετημένης (bracketed) και της σημαντικής (significant) διάρκειας. Η προτεινόμενη διάρκεια προσεγγίζει ικανοποιητικά το χρονικό διάστημα έντονης έκλυσης ενέργειας. Γίνεται χρήση δύο κανονικοποιημένων παραμέτρων, εκ των οποίων η πρώτη συσχετίζει την εισαγόμενη ενέργεια με εκτιμώμενη μέση τιμή της εδαφικής ταχύτητας και η δεύτερη με τον ισοδύναμο αριθμό κύκλων φόρτισης, ο οποίος προσδιορίζεται από την προτεινόμενη διάρκεια και το συχνοτικό περιεχόμενο της καταγραφής. Ο συντελεστής συσχέτισης είναι ιδιαίτερα υψηλός σε σύγκριση με γνωστές μεθόδους εκτίμησης της εισαγόμενης ενέργειας.

ABSTRACT : This study presents a new method to estimate the earthquake input energy for medium to long period structures. The method is based on a new definition of the strong motion duration, combining the well known bracketed and significant duration definitions. The proposed duration presents high correlation with the duration of intense energy release. Two normalized parameters are introduced permitting a good approximation of the input energy by taking into account an effective value of the ground velocity and an equivalent number of excitation cycles depending on the frequency content of the ground velocity time history. The proposed parameters present a large correlation coefficient in comparison with existing methods for the estimation of earthquake input energy.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο αντισεισμικός σχεδιασμός στηρίζεται στη δυνατότητα των κατασκευών να απορροφούν ενέργεια μέσω σημαντικών ανελαστικών παραμορφώσεων. Είναι αποδεκτή η αντίληψη ότι, το αναμενόμενο επίπεδο βλάβης των κατασκευών δεν εξαρτάται μόνον από την μέγιστη απόκριση και τις σχετικές παραμορφώσεις αλλά και από την αθροιστική βλάβη που

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

προκύπτει από τους κύκλους ανελαστικής απόκρισης. Μία μέθοδος σχεδιασμού που βασίζεται σε ενεργειακές παραμέτρους αντιμετωπίζει, εκτός από τις ανελαστικές παραμορφώσεις, και την επίπτωση της διάρκειας. Πρωταρχικό παράγοντα για τη χρήση τέτοιων μεθόδων αποτελεί ο προσδιορισμός της εισαγόμενης ενέργειας η οποία θεωρείται αντιπροσωπευτική της έντασης της εδαφικής κίνησης. Η εισαγόμενη ενέργεια E_I αναλύεται μέσω της απορροφούμενης ενέργειας λόγω ιξώδους απόσβεσης E_ξ και της υστερητικά απορροφούμενης ενέργειας E_a .

Οι Uang and Bertero (1990) πρότειναν δύο μεθόδους για τον υπολογισμό της εισαγόμενης σεισμικής ενέργειας. Η πρώτη μέθοδος στηρίζεται στην απόλυτη και η δεύτερη στη σχετική κίνηση του μονοβαθμίου συστήματος. Οι Bruneau and Wang (1995), καθώς και ο Chopra (2005), θεωρούν ότι η εκτίμηση της εισαγόμενης ενέργειας σε όρους σχετικής απόκρισης έχει σαφέστερη φυσική σημασία, δεδομένου ότι οι εσωτερικές δυνάμεις σε μία κατασκευή εκτιμώνται με βάση τις σχετικές μετακινήσεις και ταχύτητες. Βάσει αυτής της λογικής, στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της σχετικής κίνησης για τον υπολογισμό της εισαγόμενης ενέργειας. Η απόδοση της εξίσωσης ενέργειας γίνεται με την ακόλουθη σχέση:

$$\frac{m(\dot{u})^2}{2} + \int c\dot{u}du + \int f_s du = -\int m\ddot{u}_g du \Rightarrow E_K + E_\xi + E_a = E_I \quad (1)$$

όπου u η σχετική και u_g η εδαφική μετακίνηση, c ο συντελεστής ιξώδους απόσβεσης, f_s η δύναμη αντίστασης, E_I η εισαγόμενη ενέργεια, E_K η κινητική ενέργεια και E_ξ, E_a τα ποσά ενέργειας που απορροφούνται λόγω ιξώδους απόσβεσης και ανελαστικών παραμορφώσεων αντίστοιχα.

Τα αποτελέσματα παραμετρικής ανάλυσης από τους Uang and Bertero (1990), επιβεβαίωσαν το συμπέρασμα στο οποίο είχαν καταλήξει ερευνητές όπως ο Akiyama (1985) και οι Zahrah and Hall (1984). Βάσει των εργασιών που αναφέρθηκαν, η εισαγόμενη ενέργεια ανά μονάδα μάζης, σε συστήματα με ιδιοπερίοδο κοντά στη δεσπόζουσα περίοδο της εδαφικής κίνησης, είναι σχετικά σταθερή παράμετρος σε ό,τι έχει σχέση με τα χαρακτηριστικά του συστήματος, όπως η απόσβεση και το όριο διαρροής. Αντίθετα, τα χαρακτηριστικά της εδαφικής κίνησης, όπως το εύρος, η διάρκεια και το συχνοτικό περιεχόμενο, φαίνεται ότι επηρεάζουν καθοριστικά την εισαγόμενη ενέργεια.

Μία πρώτη προσπάθεια για την εκτίμηση της εισαγόμενης ενέργειας ανά μονάδα μάζης έγινε από τον Housner (1956). Η εισαγόμενη ενέργεια, για ελαστική αλλά και ανελαστική απόκριση, δίδεται μέσω της ελαστικής φασματικής ψευδοταχύτητας PSV και της αντίστοιχης κινητικής ενέργειας από την σχέση:

$$\frac{E_I}{m} = \frac{1}{2}(PSV)^2 \quad (2)$$

Σε μεταγενέστερη εργασία, προτείνεται από τους Fajfar *et al.* (1992) προσεγγιστική σχέση με την εξής μορφή:

$$E_I/m = 0.85 \times \frac{pgv}{pga} \times \int_0^{t_r} a_g^2 dt \quad (3)$$

όπου, pga η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση (peak ground acceleration), pgv η μέγιστη εδαφική ταχύτητα (peak ground velocity), t_r η συνολική διάρκεια της καταγραφής και το χρονικό ολοκλήρωμα του τετραγώνου της εδαφικής επιτάχυνσης a_g αποτελεί την γνωστή έκφραση του ολοκληρώματος του Arias (1970). Στην ανωτέρω Εξίσωση 3 γίνεται η παραδοχή ότι ο λόγος της pgv προς την pga σχετίζεται με την δεσπόζουσα περίοδο της καταγραφής.

Οι ίδιοι ερευνητές (Fajfar *et al.*, 1989) έχουν προτείνει μια διαφορετική προσέγγιση, που συνδυάζει τη μέγιστη εδαφική ταχύτητα pgv και τη σημαντική διάρκεια της εδαφικής κίνησης t_d των Trifunac και Brady (1975), με την ακόλουθη σχέση:

$$E_I/m = 2.2 \times t_d^{0.5} \times pgv^2 \quad (4)$$

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα και την εμφανιζόμενη διασπορά, οι ερευνητές παρατηρούν ότι η προτεινόμενη σχέση δεν δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα για καταγραφές μεγάλης διάρκειας με μικρή δεσπόζουσα περίοδο, και σε περιπτώσεις με λίγους παλμούς μεγάλης διάρκειας. Στην πρώτη περίπτωση οι υπολογιζόμενες τιμές είναι πολύ μικρές σε σχέση με τις πραγματικές και στην δεύτερη πολύ μεγάλες.

Οι Uang και Bertero (1990) προτείνουν για την εκτίμηση της εισαγόμενης ενέργειας σε συστήματα με απόσβεση 5% και αναπτυσσόμενη πλαστιμότητα 5 την σχέση:

$$E_I/m = 0.5 \times [(1.0 + 0.12 \times t_d) \times pgv]^2 \quad (5)$$

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε ένα σύνολο από διεθνώς γνωστές καταγραφές, προκειμένου να αξιολογηθεί η σχέση της εισαγόμενης ενέργειας με παραμέτρους της εδαφικής κίνησης. Για κάθε καταγραφή υπολογίσθηκε η εισαγόμενη ελαστική ενέργεια, για απόσβεση 5% και τη δεσπόζουσα περίοδο της φασματικής μετακίνησης η οποία σχετίζεται με την απόκριση κατασκευών μεσαίων και μεγάλων περιόδων.

Πρέπει, τέλος, να σημειωθεί ότι στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται καταγραφές με διακριτά χαρακτηριστικά κοντινού πεδίου, όπως είναι οι παλμοί μεγάλης περιόδου στη χρονοϊστορία της εδαφικής ταχύτητας. Οι ισχυροί παλμοί εδαφικής ταχύτητας, που αντιστοιχούν στο φαινόμενο της πρόσω κατευθυντικότητας (forward directivity), είναι άμεσα συσχετισμένοι με την εκλυόμενη σεισμική ενέργεια, καθώς και τις επιπτώσεις της σε κατασκευές μεσαίας και μεγάλης περιόδου.

ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΙ ΟΡΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ

Προτεινόμενη διάρκεια ισχυρής εδαφικής κίνησης

Στην παρούσα εργασία, δίδεται έμφαση στις περιοχές μεσαίων και μεγάλων περιόδων του φάσματος εισαγόμενης ελαστικής ενέργειας οι οποίες σχετίζονται με την εδαφική ταχύτητα (Fajfar *et al.*, 1989). Η σημαντική διάρκεια της εδαφικής κίνησης, κατά την οποία εκλύεται το μεγαλύτερο ποσοστό της σεισμικής ενέργειας, προτείνεται να συνδυάζεται με το χρονικό διάστημα στο οποίο η εδαφική ταχύτητα παρουσιάζει μεγάλες τιμές. Για την εκτίμηση της σημαντικής διάρκειας χρησιμοποιείται το ολοκλήρωμα της απόλυτης τιμής της εδαφικής ταχύτητας, που ορίζεται ως αθροιστική απόλυτη μετακίνηση (cumulative absolute displacement) CAD , σε αντιστοιχία με την ήδη χρησιμοποιούμενη έννοια της αθροιστικής απόλυτης ταχύτητας (cumulative absolute velocity) CAV (EPRI, 1991). Η χρήση του χρονικού ολοκληρώματος CAD διαφοροποιείται από τη μέχρι σήμερα πρακτική που χρησιμοποιεί το χρονικό ολοκλήρωμα του Arias (1970). Η χρονοϊστορία του ολοκληρώματος CAD δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$CAD(t) = \int_0^t |v_g| dt \quad (6)$$

όπου v_g η εδαφική ταχύτητα.

Η χρήση της αθροιστικής απόλυτης μετακίνησης CAD επιτρέπει τον συνδυασμό των γνωστών εννοιών της οριοθετημένης (bracketed) διάρκειας, που ορίζεται σαν το χρονικό διάστημα ανάμεσα στην πρώτη και την τελευταία εμφάνιση μίας οριακής τιμής εύρους στην χρονοϊστορία της εδαφικής κίνησης, και της σημαντικής (significant) διάρκειας, που ορίζεται σαν το χρονικό διάστημα ανάμεσα στο 5% και 95% της συνολικής τιμής του ολοκληρώματος του Arias.

Συγκεκριμένα, ορίζεται για κάθε καταγραφή ένα όριο (threshold) εδαφικής ταχύτητας, ως ποσοστό της μέγιστης τιμής rgv , έτσι ώστε η αντίστοιχη οριοθετημένη διάρκεια να περιέχει τις αυξημένες τιμές της εδαφικής ταχύτητας και να συμπίπτει με τη σημαντική διάρκεια που χαρακτηρίζεται από την αντίστοιχη απότομη αύξηση της χρονικής συνάρτησης $CAD(t)$. Το όριο της εδαφικής ταχύτητας αντιστοιχεί συνήθως στο 30% της rgv , σύμφωνα με τα αποτελέσματα της διερεύνησης. Οι φασματικές τιμές που προκύπτουν για την προτεινόμενη διάρκεια απαιτείται να υπερβαίνουν το 90% των φασμάτων απόκρισης για την συνολική διάρκεια, κριτήριο που εφαρμόστηκε από τους Trifunac και Brady (1975). Για κάθε καταγραφή προσδιορίστηκε η προτεινόμενη διάρκεια t_{bs} , που περιλαμβάνει το τμήμα της συνάρτησης $CAD(t)$ με την απότομη κλίση που, όπως αναφέρθηκε, σχετίζεται με τη σημαντική έκλυση σεισμικής ενέργειας.

Η προτεινόμενη διάρκεια συσχετίστηκε με τη φασματική τιμή της εισαγόμενης ενέργειας που αντιστοιχεί στη δεσπόζουσα περίοδο T_{d-p} του φάσματος μετακινήσεων και επελέγη λόγω της στενής της σχέσης με τη δεσπόζουσα περίοδο των παλμών της εδαφικής ταχύτητας, όπως παρατηρούν οι Mavroeidis *et al.* (2004).

Συσχέτιση προτεινόμενης διάρκειας και εισαγόμενης ενέργειας: Παράμετροι P_1 και P_2 .

Η παρούσα εργασία για την εκτίμηση της εισαγόμενης ενέργειας χρησιμοποιεί δύο παραμέτρους, προκειμένου να διερευνήσει τις επιπτώσεις της διάρκειας και του εύρους της εδαφικής κίνησης. Οι παράμετροι αυτές συσχετίζονται μεταξύ τους βάσει της παραδοχής ότι, η εισαγόμενη στις κατασκευές ενέργεια, που αποτελεί συσσωρευτικό φαινόμενο, συνδέεται με τον αριθμό των κύκλων φόρτισης της εδαφικής κίνησης.

Η παράμετρος P_1 , που σχετίζεται με την διάρκεια και αντιστοιχεί στον ισοδύναμο αριθμό κύκλων της ιστορίας της εδαφικής ταχύτητας, εκτιμήθηκε με βάση τη δεσπόζουσα περίοδο της εδαφικής ταχύτητας, που προσεγγίζει την τιμή T_{d-p} . Ο ισοδύναμος αριθμός κύκλων P_1 υπολογίζεται εμμέσως από τον λόγο της οριοθετημένης-σημαντικής διάρκειας t_{bs} προς την δεσπόζουσα περίοδο T_{d-p} :

$$P_1 = \frac{t_{bs}}{T_{d-p}} \quad (7)$$

Η σχέση μεταξύ της διάρκειας και της ενέργειας της εδαφικής κίνησης είναι συνυφασμένη με μία μέση τιμή των ευρών του ισχυρού τμήματος της καταγραφής (Housner, 1975). Στην παρούσα εργασία, ως μέτρο της εδαφικής ταχύτητας ορίστηκε μία μέση ή δρώσα (effective) τιμή V_{mean} της ταχύτητας, που προκύπτει ως η μέση τιμή του ολοκληρώματος της συνάρτησης $CAD(t)$ κατά το διάστημα της προτεινόμενης οριοθετημένης-σημαντικής διάρκειας t_{bs} από την ακόλουθη σχέση:

$$V_{mean} = \frac{\int_0^{t_{bs}} |v_g| dt}{t_{bs}} \quad (8)$$

Η δεύτερη κανονικοποιημένη παράμετρος P_2 , που συνδέει την εισαγόμενη σεισμική ενέργεια με την δρώσα ή μέση τιμή της ταχύτητας, προκύπτει από τον λόγο της εισαγόμενης ενέργειας EI_{Td-p} για την δεσπόζουσα περίοδο T_{d-p} προς το τετράγωνο της μέσης ταχύτητας V_{mean} . Η προκύπτουσα παράμετρος δίνεται από την σχέση:

$$P_2 = \frac{EI_{Td-p}}{V_{mean}^2} \quad (9)$$

Μεθοδολογία ανάλυσης καταγραφών

Η μεθοδολογία εκτίμησης των προαναφερθεισών παραμέτρων ακολούθησε τα παρακάτω στάδια:

- αρχικά εκτιμήθηκαν για κάθε καταγραφή, από τη ιστορία της εδαφικής ταχύτητας, η χρονική συνάρτηση $CAD(t)$ και η προτεινόμενη οριοθετημένη-σημαντική διάρκεια t_{bs}
- στη συνέχεια, από τα φάσματα μετακινήσεων εκτιμήθηκε η χαρακτηριστική περίοδος T_{d-p} και από τα φάσματα εισαγόμενης ενέργειας και ταχύτητας οι φασματικές τιμές EI_{Td-p} και SV_{Td-p}

- από τη συνάρτηση $CAD(t)$ και τη διάρκεια t_{bs} εκτιμήθηκε, για κάθε καταγραφή, η μέση ή δρώσα τιμή V_{mean} της ταχύτητας και, μέσω των εξισώσεων 7 και 9, υπολογίσθηκαν οι κανονικοποιημένες παράμετροι P_1 και P_2 ,
- τέλος, από το δείγμα των τιμών των P_1 και P_2 , υπολογίσθηκε προσεγγιστική σχέση για την εκτίμηση της φασματικής τιμής EI_{Td-p} , που θεωρείται ικανοποιητικός δείκτης της εισαγόμενης ενέργειας για τις κατασκευές μεσαίας και μεγάλης περιόδου.

Οι παράμετροι P_1 και P_2 , συνδυάζοντας πληροφορίες σχετικά με το εύρος, την διάρκεια και το συχνοτικό περιεχόμενο των εξεταζομένων καταγραφών, αποτελούν μία αντιπροσωπευτική απεικόνιση των χαρακτηριστικών της εδαφικής κίνησης.

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 αποθέσεις και αποστάσεις από την πηγή
- η σημαντική διάρκεια των καταγραφών ποικίλει και, τέλος,
- λαμβάνονται υπόψη 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). Στοιχεία των καταγραφών, όπως το μέγεθος, ο σταθμός και ο προσανατολισμός του μηχανήματος καταγραφής, η ποιότητα του εδάφους και η απόσταση από το ρήγμα δίνονται στον Πίνακα 1.

Μιά σημαντική παρατήρηση είναι ότι οι τιμές της εισαγόμενης ενέργειας για την χαρακτηριστική περίοδο T_{d-p} και για ελαστικά συστήματα με απόσβεση 5%, είναι πολύ καλά συσχετισμένες με την τετραγωνική τιμή των αντίστοιχων φασματικών ταχυτήτων, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 1**. Από το δείγμα τιμών προκύπτει η προσεγγιστική ευθεία ελαχίστων τετραγώνων, που δίνεται από την κατωτέρω σχέση:

$$EI_{Td-p} = 1.056 * SV_{Td-p}^2 - 1270. \quad (10)$$

όπου EI_{Td-p}, SV_{Td-p} οι φασματικές τιμές της εισαγόμενης ενέργειας και της ταχύτητας απόκρισης αντίστοιχα για την δεσπόζουσα περίοδο T_{d-p} του φάσματος μετακινήσεων.

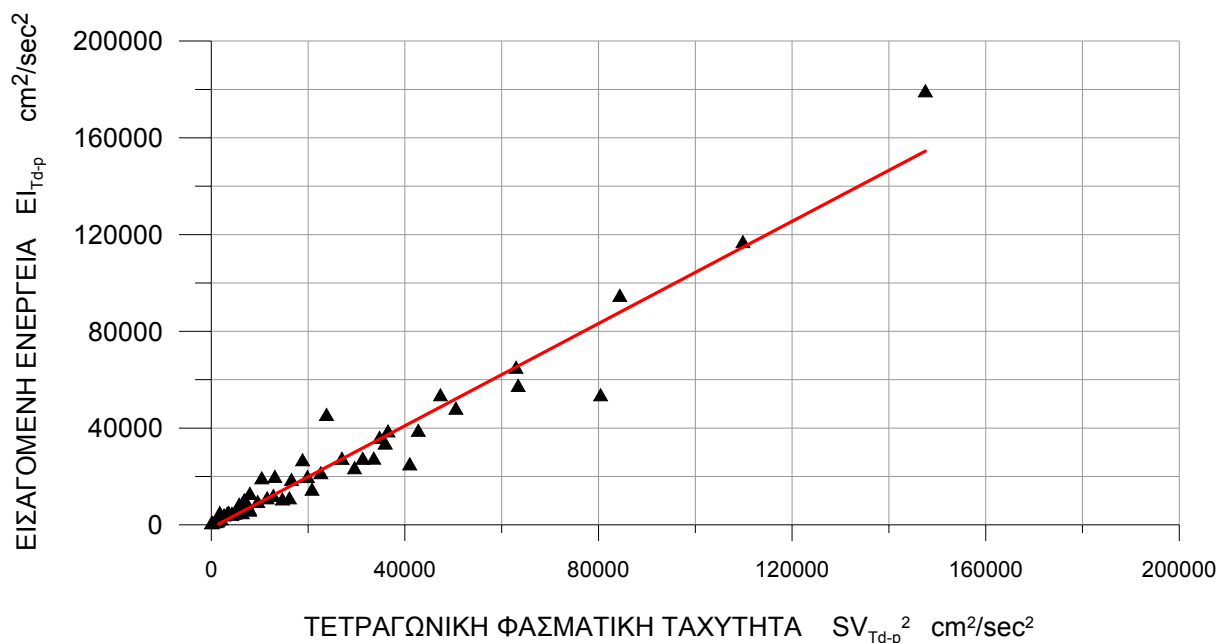
Πίνακας 1. Δείγμα Καταγραφών.

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



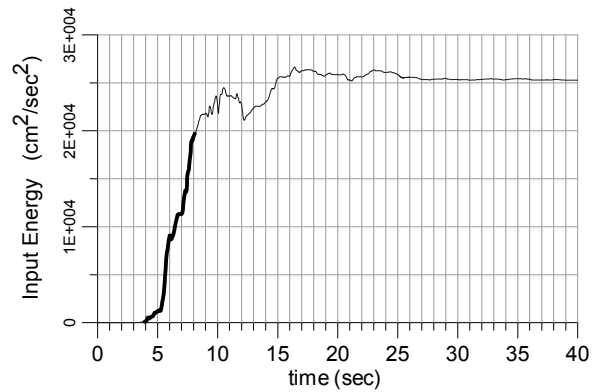
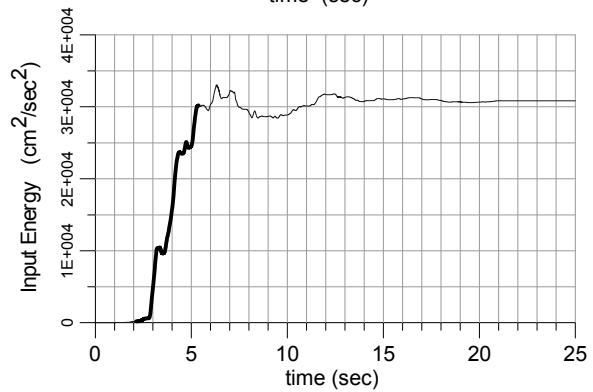
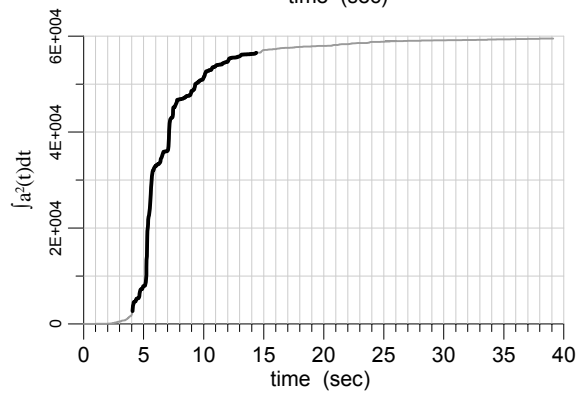
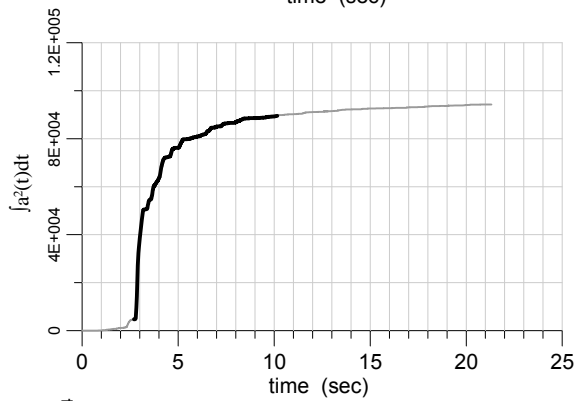
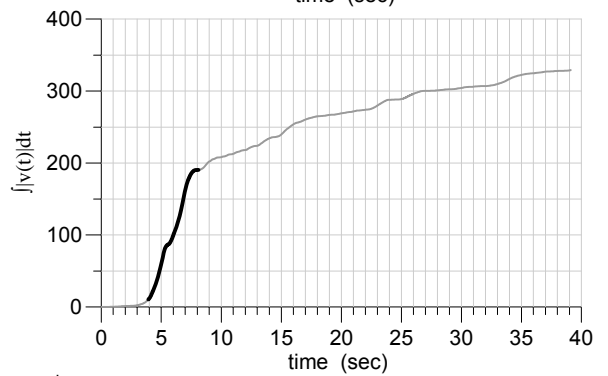
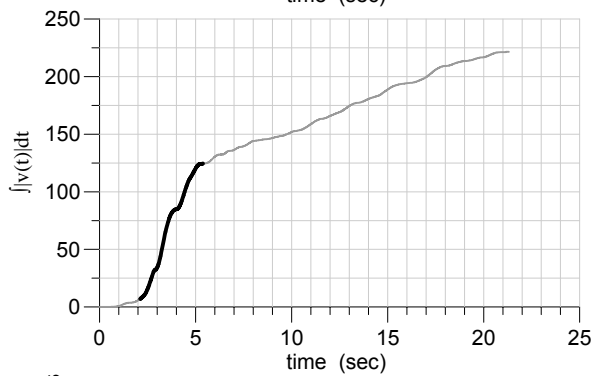
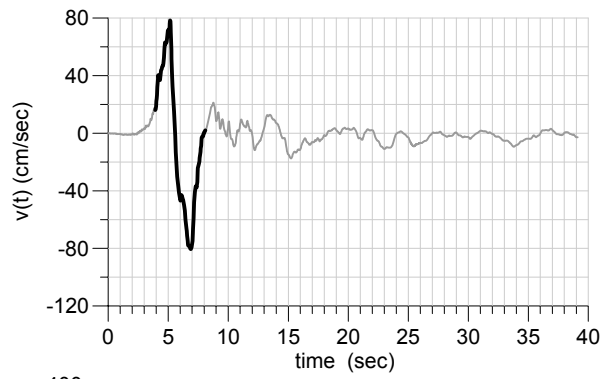
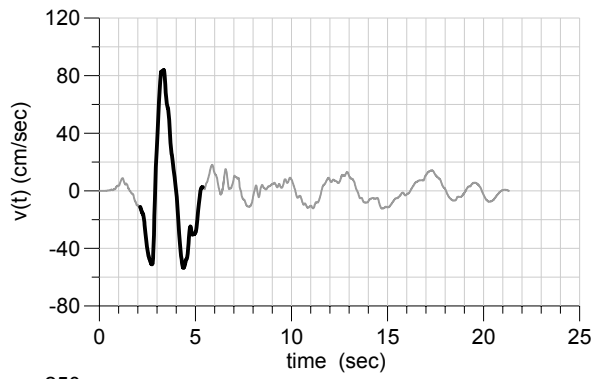
Σχήμα 1. Συσχέτιση εισαγόμενης ενέργειας και τετραγωνικής φασματικής ταχύτητας.

Στο **Σχήμα 2** παρουσιάζονται ως χαρακτηριστικά παραδείγματα οι καταγραφές ERZ-000 (Erzincan, Turkey, 1992) και E04-230 (Imperial Valley, USA, 1979), όπου, από τις χρονοϊστορίες της εισαγόμενης σεισμικής ενέργειας και της συνάρτησης $CAD(t)$, προκύπτει η διαπίστωση ότι η πλέον έντονη απορρόφηση ενέργειας συμπίπτει με την αντίστοιχη οριοθετημένη σημαντική διάρκεια t_{bs} . Γενικά, εκτιμάται ότι η οριοθετημένη σημαντική διάρκεια συσχετίζεται ικανοποιητικά με το ισχυρό τμήμα της εδαφικής κίνησης, ειδικά για περιπτώσεις καταγραφών κοντινού πεδίου.

Στο **Σχήμα 3** παρουσιάζεται η συσχέτιση ανάμεσα στην κανονικοποιημένη παράμετρο P_2 , που συνδέει την εισαγόμενη ενέργεια με τη μέση εδαφική ταχύτητα, και στην παράμετρο P_1 που αντιστοιχεί σε έναν ισοδύναμο αριθμό κύκλων φόρτισης. Παρατηρείται ότι η σχέση μεταξύ των P_1 και P_2 είναι σχεδόν γραμμική με συντελεστή συσχέτισης 95%. Η προκύπτουσα ευθεία ελαχίστων τετραγώνων δίνεται από την σχέση :

$$P_2 = 20.36 \times P_1 - 13.06 \quad (11)$$

Οι τιμές της κανονικοποιημένης παραμέτρου P_2 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).



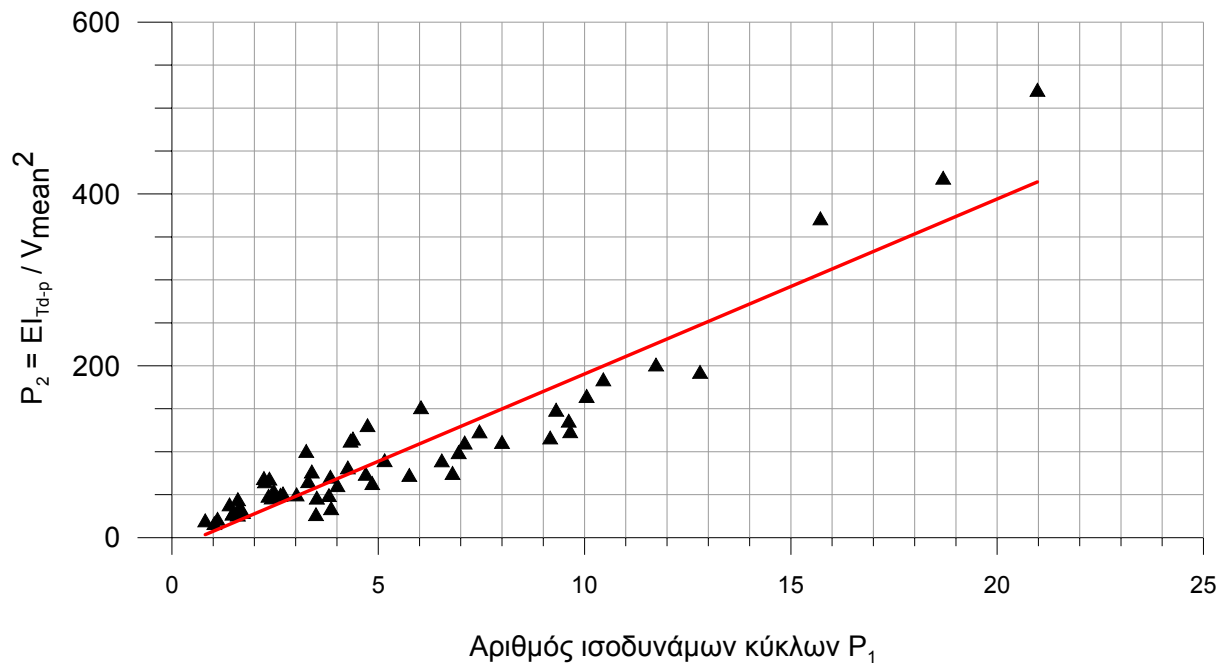
(2.1)

(2.2)

Σχήμα 2. Με έντονη γραμμή επισημαίνεται η σημαντική διάρκεια, t_d , των Trifunac και Brady (1975) στο ολοκλήρωμα του Arias (1970) και η οριοθετημένη σημαντική διάρκεια, t_{bs} , στην χρονοίστορία της ταχύτητας, της εισαγόμενης ενέργειας και στο ολοκλήρωμα CAD.

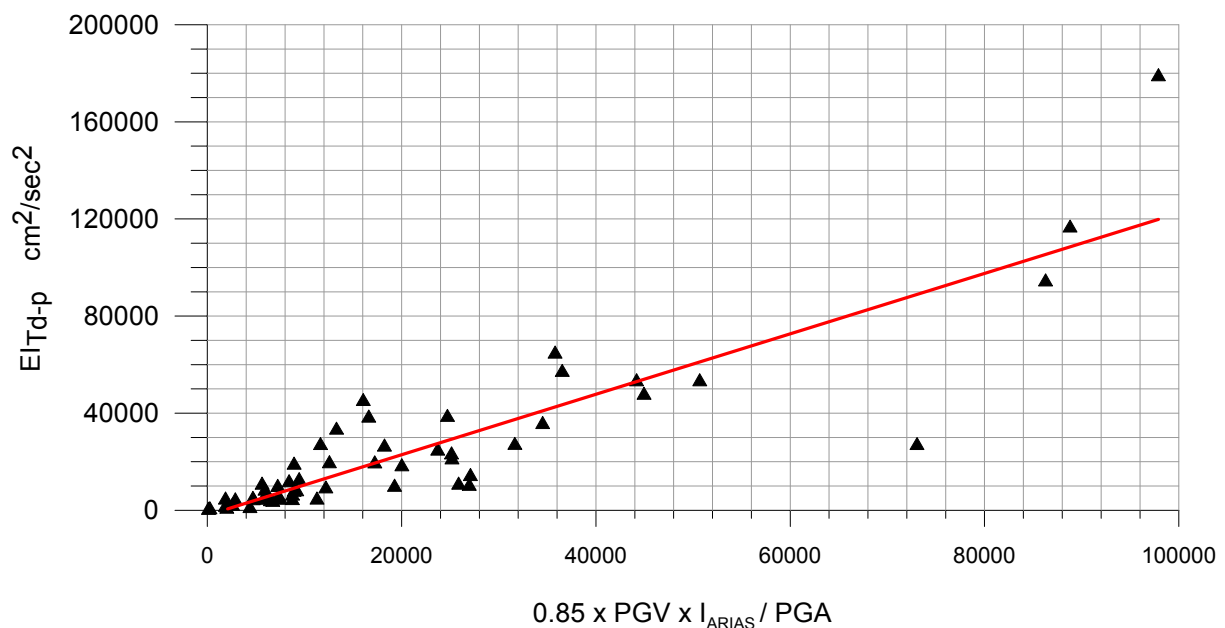
(2.1) Συνιστώσα ERZ-000 (Erzincan, Turkey, 1992).

(2.2) Συνιστώσα E04-230 (Imperial Valley, USA, 1979)

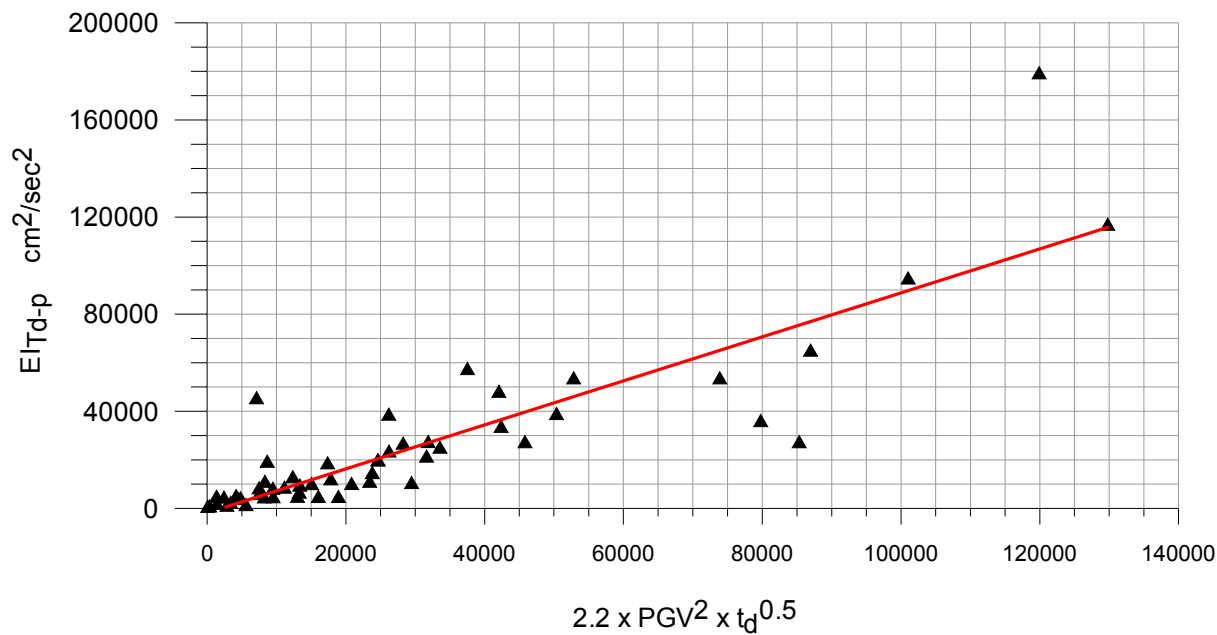


Σχήμα 3. Συσχέτιση δείγματος τιμών P_1 και P_2 και προκύπτουσα ευθεία ελαχίστων τετραγώνων.

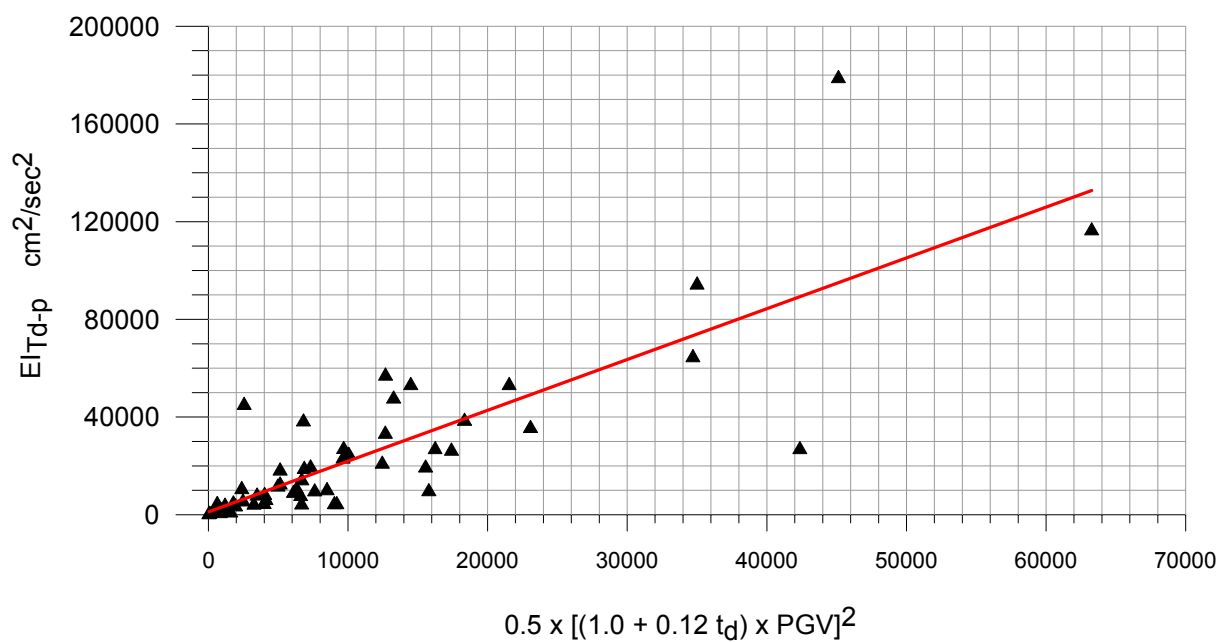
Στα **Σχήματα 4, 5** και **6** παρουσιάζεται η συσχέτιση που υφίσταται ανάμεσα στην εισαγόμενη ενέργεια EI_{Td-p} και στους δείκτες που προκύπτουν από τις Εξισώσεις 3, 4 και 5, όπως προτείνονται από τους Fajfar *et al* (1989, 1992) και Uang and Bertero (1990). Και στα δύο σχήματα εμφανίζονται οι ευθείες ελαχίστων τετραγώνων που έχουν προσαρμοσθεί στις τιμές του δείγματος, με συντελεστές συσχέτισης χαμηλότερους από αυτόν των προτεινομένων παραμέτρων P_1 και P_2 . Οι συντελεστές αυτοί είναι 88%, 87% και 82%, αντίστοιχα. Οι τιμές των δεικτών που χρησιμοποιούνται σε κάθε σχέση παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.



Σχήμα 4. Δείγμα τιμών εισαγόμενης ενέργειας και δείκτη Εξίσωσης 3 με την αντίστοιχη ευθεία ελαχίστων τετραγώνων.



Σχήμα 5. Δείγμα τιμών εισαγόμενης ενέργειας και δείκτη Εξίσωσης 4 με την αντίστοιχη ευθεία ελαχίστων τετραγώνων.



Σχήμα 6. Δείγμα τιμών εισαγόμενης ενέργειας και δείκτη Εξίσωσης 5 με την αντίστοιχη ευθεία ελαχίστων τετραγώνων.

Πίνακας 2. Τιμές δεικτών.

No.	RECORD	PGA (cm/sec ²)	PGV (cm/sec)	t _d (sec)	$\int^{t_r} a_g^2 dt$ (cm ² /sec ³)	t _{bs} (sec)	$\int^{t_{bs}} v_g dt$ (cm)	V _{mean} (cm/sec)	T _{d-p} (sec)	SV _{T_{d-p}} (cm/sec)	EI _{T_{d-p}} (cm ² /sec ²)
1	ELC-180	306.94	29.69	24.10	106416.	25.20	137.57	5.46	2.62	70.07	3985.80
2	ELC-270	210.68	29.66	23.94	74598.	26.62	166.66	6.26	2.08	80.18	7464.50
3	C05-355	360.04	21.77	7.44	39064.	8.10	31.79	3.92	2.10	29.59	489.24
4	C05-085	433.21	24.63	6.45	53581.	7.99	47.99	6.01	2.10	45.05	1699.35
5	PCD-164	1202.62	112.49	7.04	555637.	7.08	194.08	27.41	1.23	217.60	52922.47
6	PCD-254	1137.47	54.13	7.26	494676.	6.96	99.63	14.31	1.35	128.70	17941.89
7	KAR-000	596.70	65.37	6.41	290802.	6.62	151.65	22.91	4.46	144.20	13954.80
8	KAR-090	703.92	71.57	6.84	312057.	6.79	128.81	18.97	3.95	121.20	9864.49
9	TAB-344	819.93	97.75	16.48	720912.	22.10	436.00	19.73	5.75	164.30	26645.10
10	TAB-074	835.57	121.22	16.12	720142.	15.42	529.76	34.36	4.74	331.40	116257.82
11	GA1-230	100.63	3.37	7.31	3998.	7.45	5.53	0.74	2.12	4.50	24.11
12	GA1-320	129.90	8.24	5.77	4988.	2.78	5.97	2.15	1.15	15.94	204.70
13	E02-140	309.40	33.67	9.06	79591.	13.60	115.97	8.53	2.00	88.93	5294.82
14	E02-230	365.19	32.75	12.20	62001.	21.62	160.56	7.43	4.60	57.48	3961.28
15	E04-140	480.76	38.24	6.72	83278.	14.32	147.93	10.33	2.06	107.40	10341.91
16	E04-230	349.18	80.50	10.32	59491.	4.18	179.98	43.06	4.06	176.90	26645.10
17	HAL-150	153.37	12.51	15.30	26888.	16.15	45.86	2.84	0.77	41.89	4184.50
18	HAL-240	305.73	39.37	10.65	54268.	1.16	17.21	14.84	0.83	85.69	7961.27
19	SITE1-010	959.25	45.88	7.90	277713.	8.70	80.66	9.27	3.23	79.91	4217.41
20	SITE1-280	1074.86	46.07	8.08	240471.	9.02	100.45	11.14	3.43	88.73	5855.47
21	CIG-180	391.65	56.92	6.26	68194.	2.54	61.17	24.08	2.30	113.30	11303.20
22	CIG-270	524.45	73.11	4.96	140216.	1.76	41.96	23.84	0.79	191.07	37999.92
23	ALF-180	326.37	21.96	5.27	50269.	2.95	21.28	7.21	0.87	65.39	3864.50
24	ALF-270	405.81	16.29	5.76	54619.	9.58	32.65	3.41	1.35	38.10	1258.06
25	ELC-000	351.06	46.35	16.04	66358.	25.78	177.13	6.87	3.94	59.86	4127.73
26	ELC-090	253.42	40.86	19.05	42128.	22.63	185.73	8.21	4.66	60.10	4116.12
27	G01-000	403.07	31.56	6.53	65909.	2.85	18.6	6.53	3.53	35.05	750.32
28	G01-090	464.16	33.86	3.68	104877.	2.62	31.70	12.10	1.64	65.06	3541.92
29	ERZ-000	505.47	83.95	7.47	94242.	3.26	117.37	36.00	2.22	189.60	33025.73
30	ERZ-090	486.10	64.28	7.35	111842.	7.87	134.00	17.03	3.33	114.60	19225.76

Πίνακας 2. Τιμές δεικτών (συνέχεια).

No.	RECORD	PGA (cm/sec ²)	PGV (cm/sec)	t _d (sec)	$\int^{t_r} a_g^2 dt$ (cm ² /sec ³)	t _{bs} (sec)	$\int^{t_{bs}} v_g dt$ (cm)	V _{mean} (cm/sec)	T _{d-p} (sec)	SV _{T_{d-p}} (cm/sec)	EI _{T_{d-p}} (cm ² /sec ²)
31	JSH-000	268.50	27.45	27.22	102736.	23.74	158.56	6.68	1.27	102.10	18580.60
32	JSH-090	278.63	43.05	26.06	146653.	26.64	235.62	8.84	2.76	83.27	9483.85
33	JFA-292	581.30	99.10	5.98	349782.	6.04	200.92	33.26	2.00	283.60	52928.92
34	JFA-022	416.37	105.99	12.38	165453.	6.70	214.22	31.97	2.97	250.90	64354.70
35	SFY-000	302.05	22.74	13.54	73339.	21.84	132.46	6.07	2.93	72.78	4464.50
36	SFY-090	337.32	39.34	13.12	95296.	12.32	96.44	7.83	1.05	89.17	12206.42
37	SCH-281	483.67	74.57	7.52	181023.	3.60	97.25	27.01	2.20	202.50	24367.69
38	SCH-011	812.54	117.49	6.90	280771.	4.94	142.96	28.94	3.09	186.50	35309.60
39	CPC-196	380.98	64.23	12.14	175762.	11.38	145.32	12.7	2.40	150.40	20716.08
40	CPC-106	343.20	39.66	14.86	124218.	16.16	145.24	8.99	2.02	98.01	8787.07
41	SVG-000	262.13	23.34	13.88	88909.	26.68	142.13	5.33	2.91	51.27	3238.70
42	SVG-090	430.47	40.85	16.82	89900.	22.16	177.34	8.00	2.38	82.33	9374.17
43	TAK-000	599.80	127.19	11.35	543116.	12.44	430.39	34.60	2.06	384.10	178580.27
44	TAK-090	603.82	120.72	9.93	507740.	8.87	305.71	34.47	2.08	290.50	94064.32
45	KJM-000	805.72	81.30	8.36	524015.	6.14	174.48	28.42	1.53	224.80	47367.64
46	KJM-090	587.14	74.35	9.52	339370.	8.26	146.02	17.68	0.79	251.80	56825.69
47	CHY024-000	172.07	49.01	21.65	71184.	22.38	294.58	13.16	5.17	141.00	19103.18
48	CHY024-090	272.74	52.90	21.06	110635.	18.12	275.35	15.20	4.13	137.40	26051.56
49	CHY028-000	805.86	66.94	5.65	366407.	7.68	156.89	20.43	2.20	127.00	10335.46
50	CHY028-090	640.61	72.14	7.74	330594.	6.41	131.79	20.56	1.94	183.20	26748.33
51	DZC-180	341.47	59.99	10.95	168284.	12.94	287.12	22.19	5.53	172.00	22767.69
52	DZC-270	525.16	83.50	10.78	182888.	12.49	338.58	27.11	5.06	206.80	38296.69
53	LEF1-LN	333.37	29.59	15.16	122046.	14.57	99.98	6.86	1.45	75.97	7638.69
54	LEF1-TR	408.59	31.58	10.55	244286.	8.33	91.77	11.02	0.53	154.30	44832.15

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Όπως ήδη αναφέρθηκε, η κύρια χρησιμότητα της εκτίμησης της εισαγόμενης σεισμικής ενέργειας σε ένα σύστημα είναι ο προσδιορισμός της επίδρασης των συσσωρευτικών φαινομένων που προκαλεί η σεισμική φόρτιση. Η παρούσα εργασία εκτιμά την εισαγόμενη ενέργεια στην περιοχή μεσαίων και μεγάλων περιόδων με την χρήση ενός νέου ορισμού της διάρκειας της ισχυρής εδαφικής κίνησης, που συνδυάζει τις γνωστές έννοιες της οριοθετημένης και της σημαντικής διάρκειας. Η διάρκεια ορίζεται βάσει του χρονικού ολοκληρώματος της απόλυτης τιμής της εδαφικής ταχύτητας, οριζόμενου ως $CAD(t)$, αντί του συνήθως χρησιμοποιούμενου ολοκληρώματος του Arias.

Σαν δείκτης της εισαγόμενης ενέργειας σε κατασκευές μεσαίας και μεγάλης περιόδου θεωρείται η φασματική τιμή EI_{Td-p} , που αντιστοιχεί στη δεσπόμενη περίοδο της φασματικής μετακίνησης. Με βάση την τιμή EI_{Td-p} και χαρακτηριστικά της καταγραφής της εδαφικής κίνησης, όπως είναι η προτεινόμενη διάρκεια, η συνάρτηση $CAD(t)$ και η δεσπόμενη περίοδος T_{d-p} , ορίζονται δύο κανονικοποιημένες παράμετροι P_1 και P_2 που επιτρέπουν την εκτίμηση της εισαγόμενης ενέργειας στην περιοχή μεσαίων και μεγάλων περιόδων. Μία σημαντική παρατήρηση είναι ότι οι τιμές της σχετικής εισαγόμενης ενέργειας, για ελαστικά συστήματα με απόσβεση 5%, είναι πολύ καλά συσχετισμένες με την τετραγωνική τιμή των αντίστοιχων φασματικών ταχυτήτων.

Η προκύπτουσα σχέση μεταξύ των παραμέτρων P_1 και P_2 εμφανίζει μεγαλύτερη συσχέτιση από αυτήν που προκύπτει μεταξύ της εισαγόμενης ενέργειας και γνωστών σχέσεων υπολογισμού της.

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

- Akiyama, H. (1985), *Earthquake-resistant limit-state design for buildings*, the University of Tokyo Press, Tokyo. 33.
- Arias, A. (1970), A measure of earthquake intensity. In: Hansen RJ, editor. *Seismic Design for Nuclear Power Plants*, pp. 438-483. Cambridge, Massachusetts: MIT Press. 23.
- Bruneau M., and Wang N. (1996), "Some aspects of energy methods for the inelastic seismic response of ductile SDOF structures", *Eng. Struct.*, 18(1), pp. 1-12.
- Chopra, A.K. (2006), *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering (3rd Edition)*, Prentice-Hall International Series in Civil Engineering and Engineering Mechanics.
- COSMOS Virtual Data Center, <http://db.cosmos-eq.org/scripts/default.plx>.
- 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., (1989), "Seismic design in medium- and long-period structures", *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, 18, pp. 1133-1144.

- Fajfar P., Vidic T., and Fischinger M., (1992), On energy demand and supply in SDOF systems. In: Fajfar P, and Krawinkler H, editors. *Nonlinear Seismic Analysis and Design of Reinforced Concrete Buildings*, pp.41-62. Elsevier Applied Science.
- Housner G.W., (1956), "Limit design of structures to resist earthquakes", *Proc. of the 1st World Conference on Earthquake Engineering*, California, USA, 5, pp. 5-1 to 5-13. 7.
- 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.
- 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.
- PEER Strong Motion Database, <http://peer.berkeley.edu/smcat/index.html>.
- 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.
- Uang C.M., and Bertero V.V., (1990), "Evaluation of seismic energy in structures", *Earthquake Eng. & Struct. Dyn.*, 19(1), pp. 77-90.
- Zahrah T.F., and Hall W.J., (1984), "Earthquake energy absorption in SDOF structures", *J. Struct. Eng.*, ASCE, 110(8), pp. 1757-1772.