

# Γενικευμένη μεθοδολογία κατασκευής σεναρίων σεισμικής κίνησης για τον αντισεισμικό σχεδιασμό γεφυρών

A comprehensive approach for the generation of earthquake scenarios during seismic design of bridges

ΣΕΞΤΟΣ Α. Γ., Πολιτικός Μηχανικός Α.Π.Θ., MSc-DIC, Υποψ. Διδάκτωρ Α.Π.Θ.

ΠΙΤΙΛΑΚΗΣ Κ. Δ., Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής Α.Π.Θ

ΚΑΠΠΟΣ Α. Ι., Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Αναπλ. Καθηγητής Α.Π.Θ

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Το αντικείμενο του παρόντος είναι η πρόταση μιας συνολικής μεθοδολογίας για τη συνεκτίμηση των τοπικών εδαφικών συνθηκών, της χωρικής μεταβλητότητας της σεισμικής κίνησης και της αλληλεπίδρασης- εδάφους θεμελίωσης-ανωδομής κατά τον αντισεισμικό σχεδιασμό γεφυρών από Ο/Σ. Για τον σκοπό αυτόν αναπτύσσεται ειδικό λογισμικό για την σύνθεση μιας ομάδας κατάλληλα τροποποιημένων χρονοϊστοριών σε κάθε θέση στήριξης και τον υπολογισμό των δυναμικών σταθερών ελατηρίων και αποσβεστήρων, ώστε ο μηχανικός να διαθέτει τα απαιτούμενα δεδομένα εισαγωγής για την ανάλυση γεφυρών στο πεδίο του χρόνου λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση των ανωτέρω φαινομένων.

**ABSTRACT:** The scope of this study is to propose a comprehensive methodology for accounting for the effect of local site conditions, spatial variability of ground motion and soil-foundation-superstructure interaction during seismic design of RC bridges. For this purpose, a specialized computer code is developed for estimating a set of suitably modified time histories at each support point and for calculating the dynamic constants of the spring and dashpot system, thus providing the engineer with the required input data for the analysis of the bridge in the time domain while accounting for the effect of the aforementioned phenomena.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ

Κατά τον αντισεισμικό σχεδιασμό γεφυρών, ο οποίος όλο και συχνότερα πραγματοποιείται μέσω δυναμικής ανάλυσης στο πεδίο του χρόνου, η διέγερση με κατάλληλα επιλεγμένες χρονοϊστορίες επιτάχυνσης ή μετακίνησης στηρίζεται σχεδόν πάντοτε σε δύο βασικές υποθέσεις: 1) Η κατασκευή είναι παγιωμένη στα σημεία στήριξης 2) Ο σεισμικός κραδασμός που εισάγεται μέσω αυτών είναι ταυτόσημος και ταυτόχρονος. Ο λόγος για τον οποίο πραγματοποιούνται οι δύο αυτές απλουστεύσεις, δεν είναι η βεβαιότητα ότι οδηγούν προς συντηρητικότερα επίπεδα σχεδιασμού, όσο το γεγονός ότι τυχόν συνεκτίμησή τους αποτελεί διαδικασία ιδιαίτερα πολύπλοκη, πολλές φορές αριθμητικά ευαίσθητη και συχνά αντισοικονομική.

Η πραγματικότητα αντίθετα επιβεβαιώνει, ότι: 1) Το υποκείμενο έδαφος είναι ενδόσιμο,

διαθέτει απόσβεση και αλληλεπιδρά με το περιβάλλον έδαφος και την υπερκείμενη κατασκευή έτσι ώστε αφενός αποτελεί μια μορφή φίλτρου για την σεισμική κίνηση (κινηματική αλληλεπίδραση) ενώ παράλληλα δέχεται αδρανειακά φορτία εξαιτίας της ταλάντωσης της ανωδομής (αδρανειακή αλληλεπίδραση). Το φαινόμενο αυτό είναι πολύπλοκο καθώς η ευνοϊκή ή δυσμενής επιρροή του στην συμπεριφορά της κατασκευής εν πολλοίς εξαρτάται από μία σειρά παραγόντων (Wolf, 1994, Gazetas, 1996) όπως η ένταση, τα δεσπόζοντα μήκη κύματα και οι γωνίες πρόσπτωσης των σεισμικών κυμάτων, η στρωματογραφία, δυσμησία και απόσβεση των εδαφικών στρώσεων, το μέγεθος, η γεωμετρία και η δυσκαμψία της θεμελίωσης καθώς και τα αδρανειακά χαρακτηριστικά σε συνδυασμό με την λυγηρότητα της ίδιας της κατασκευής.

2) Ο σεισμικός κραδασμός από την άλλη,

ειδικά όταν το μήκος της κατασκευής είναι μεγάλο, μπορεί να διαφέρει σημαντικά σε κάθε σημείο στήριξης από άποψη πλάτους, συχνοτικού περιεχομένου και χρόνου άφιξης με αποτέλεσμα υπό συγκεκριμένες συνθήκες να προκαλεί σημαντικές δυνάμεις και παραμορφώσεις στην κατασκευή οι οποίες δεν θα είχαν αναπτυχθεί εάν γινόταν η θεώρηση σύγχρονης διέγερσης (Hao, 1989, Zerva, 1998, Price et al., 1998, Shinozuka et al., 1997). Οι χωρικές και χρονικές αυτές διαφοροποιήσεις οφείλονται σε τέσσερις παράγοντες (Der Kiureghian et al., 1997):

α) *Απώλεια του συγχρωτισμού* δηλαδή της «ομοιότητάς» της κίνησης εξαιτίας διαδοχικών ανακλάσεων, διαθλάσεων και επαλληλιών των προσπιπτόντων σεισμικών κυμάτων.

β) *Διάδοση των κυμάτων* με πεπερασμένη ταχύτητα και συνεπώς άφιξη αυτών σε κάθε θέση στήριξης με διαφορά φάσης.

γ) *Επιρροή των τοπικών εδαφικών συνθηκών* στο πλάτος και το συχνοτικό περιεχόμενο της κίνησης, ειδικά όταν το εδαφικό προφίλ μεταβάλλεται σημαντικά με την απόσταση.

δ) *Εξασθένιση της κίνησης* λόγω της γεωμετρικής εξάπλωσης του μετώπου του κύματος και της απώλειας κυματικής ενέργειας.

Επιπρόσθετα των ανωτέρω, η σεισμική κίνηση διαφοροποιείται εξαιτίας της παρουσίας της θεμελίωσης καθώς αυτή, όπως αναφέρθηκε και ανάλογα με τη σχετική δυσκαμψία της προς το έδαφος, ταλαντώνεται διαφορετικά από τον καταναγκασμό που εισάγει ο προσπίπτων σεισμικός κραδασμός.

## 2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Μέχρι σήμερα έχει πραγματοποιηθεί σημαντική πρόοδος στην αποσαφήνιση του ρόλου των τοπικών εδαφικών συνθηκών στη δυναμική συμπεριφορά μιας γέφυρας καθώς και στην αλληλεπίδρασή της με το έδαφος. Εντούτοις, αποτελεί ερωτηματικό ο βαθμός στον οποίο μπορεί ή πρέπει να αντιμετωπίζονται οι εδαφικές συνθήκες και τα ζητήματα αλληλεπίδρασης σε συνδυασμό με το φαινόμενο της χωρικής μεταβλητότητας καθώς και οι πιθανές συνδυαστικές επιπτώσεις των τριών αυτών φαινομένων. Τέτοιες ερευνητικές εργασίες, είναι σχετικά περιορισμένες (Kahan et al., 1996, Der Kiureghian et al., 1997, Keshishian et al., 1997, Clouteau et al., 1998, Shrikhande et al., 1999,) πολύ δε περισσότερο σε συνδυασμό με την ανελαστική απόκριση της ανωδομής (Monti et al., 1994, Saxena et al., 2000).

Η μεθοδολογία που προτείνεται επιχειρεί τη συνολική συνεκτίμηση των ανωτέρω ζητημάτων στον σχεδιασμό των γεφυρών, μέσω της αποσύζευξης του προβλήματος στα επιμέρους στάδια του Σχήματος 1. Συγκεκριμένα, η σεισμική κίνηση διαφοροποιείται από θέση σε θέση, καθώς φιλτράρεται μέσω της επιρροής των τοπικών εδαφικών συνθηκών, της τοπογραφίας και της ύπαρξης της θεμελίωσης προκειμένου να εκτιμηθεί τελικά μια σειρά πολλαπλά τροποποιημένων χρονοϊστοριών σε κάθε διακριτή θέση στήριξης της γέφυρας. Ακολούθως υπολογίζονται οι τιμές ελατηρίων και αποσβεστήρων που απαιτούνται σε ένα προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων για την περιγραφή της ενδοσιμότητας και της απόσβεσης στο επίπεδο της θεμελίωσης.

Η μεθοδολογία αυτή προχωρά επίσης στον υπολογισμό ισοδυνάμων στροφικών ελατηρίων για τις διατομές σκυροδέματος της ανωδομής (Karros & Sextos, 2001), τα οποία ενεργοποιούνται μόλις η αναπτυσσόμενη ροπή υπερβεί την ροπή διαρροής και με την ελεγχόμενη στροφή τους συνεισφέρουν στις πλαστικές παραμορφώσεις. Με τον τρόπο αυτόν καθίσταται εφικτή, εάν αυτή απαιτείται, η ολοκληρωμένη ανελαστική δυναμική ανάλυση της κατασκευής υπό ασύγχρονη διέγερση ακόμη και χωρίς την χρήση ενός κώδικα πεπερασμένων στοιχείων με ειδικές δυνατότητες ανελαστικής απόκρισης διατομών Ο/Σ. Εναλλακτικά δε, μπορεί να προσφέρει μέσω χωριστής μη-γραμμικής στατικής ανάλυσης την αναμενόμενη επαπτομενική δυσκαμψία των διατομών σκυροδέματος για τη χρήση σε ένα οιονεί ελαστικό μοντέλο.

Για την εκτεταμένη παραμετρική ανάλυση του προβλήματος και στο πλαίσιο της προτεινόμενης μεθοδολογίας, αναπτύσσεται το λογισμικό A.S.IN.C. (Asynchronous Support Input Calculator) μέσω του οποίου είναι δυνατή τόσο η κατασκευή των διαφορετικών συνθετικών κινήσεων στις θέσεις της θεμελίωσης όσο και ο υπολογισμός των συντελεστών δυναμικής δυσκαμψίας αυτής, παρέχοντας έτσι όλα τα απαραίτητα δεδομένα εισαγωγής για την δυναμική ανάλυση της γέφυρας υπό ασύγχρονη διέγερση και συνεκτιμώντας την αλληλεπίδραση εδάφους-ανωδομής.

## 3. ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ

### 3.1 Στάδιο Χωρικής Μεταβλητότητας

Στην γενική περίπτωση, τα απαιτούμενα δεδομένα του κώδικα ASINC (Σχήμα 2) είναι η

επιλογή ομοιόμορφου ή πολυστρωματικού σε κάθε θέση εδάφους (απόσβεση, πάχος στρώσεων, μέτρο διάτμησης και πυκνότητα), και η σεισμική διέγερση αναφοράς (PGA, συχνοτικό περιεχόμενο, διάρκεια, γωνία πρόσπτωσης) η οποία λαμβάνεται από ενσωματωμένη στον κώδικα, παραμετροποιησιμη βάση δεδομένων (Σέξτος, Μάκρα & Πιπλάκης, 1999) ως ομαλοποιημένο φάσμα απόκρισης επιτάχυνσης καταγραφής ή Κανονισμού ή ακόμη και απευθείας με χρήση του τυπικού φάσματος Kanai-Tajimi (Clough & Penzien, 1993). Ταυτόχρονα απαιτείται η εισαγωγή κατάλληλης συνάρτησης απώλειας συγχροτισμού από ενσωματωμένες στον κώδικα σχέσεις της βιβλιογραφίας (Hindy & Novak, 1980, Abrahamson et al., 1991, Lucio & Wong, 1986, Loh & Lee, 1990, Zerva & Harada, 1997, Riepl et al., 1997).

Θεωρώντας ότι η σεισμική κίνηση αποτελεί μη-μεταβλητή στοχαστική διαδικασία μηδενικής μέσης τιμής εξαρτώμενη από το κοινό φάσμα ισχύος  $S_0(\omega)$  και τις συναρτήσεις απώλειας συγχροτισμού  $|\gamma(\omega, \xi)|$ , ο κώδικας ASINC συνθέτει μια σειρά επιταχυνσιογραφημάτων στις η θέσεις στήριξης της γέφυρας με την χρήση κατάλληλων μετασχηματισμών (Deodatis, 1996, Hao, 1989).

### 3.2 Στάδιο Τοπικών Εδαφικών Συνθηκών

Εκτός της απευθείας εκτίμησης της διαφοροποίησης της σεισμικής κίνησης στην επιφάνεια ενός ομοιόμορφου εδάφους, ο κώδικας ASINC προσφέρει εναλλακτικά τη δυνατότητα σύνθεσης των χρονοϊστοριών στο επίπεδο του βραχώδους υποστρώματος και της εκτίμησης της επιρροής των τοπικών εδαφικών συνθηκών. Με τη μέθοδο της «μεθόδου συντελεστή ανακλαστικότητας» (Kennett, 1983) πραγματοποιείται η μονοδιάστατη εδαφική ανάλυση του πολυστρωματικού εδάφους επί ελαστικού βράχου, υπολογίζονται σε κάθε θέση οι συναρτήσεις μεταφοράς και μέσω αλγορίθμου συνέλιξης οι τελικές χρονοϊστορίες στο επίπεδο της θεμελίωσης που αποτελεί την κίνηση ελεύθερου πεδίου πλησίον της βάσης του κάθε βάρου (Σχήμα 3). Ταυτόχρονα παρέχεται η δυνατότητα σε περιπτώσεις όπου φαινόμενα περίπλοκης γεωλογικής δομής και τοπογραφίας κρίνονται σημαντικά, η χρήση κατάλληλων φίλτρων (Raptakis et al, 2000) στο πεδίο των συχνοτήτων μέσω των οποίων οριοθετείται, εφόσον επιλεγεί, ένα δυσμενές σενάριο επιρροής της τοπογραφίας στην σεισμική κίνηση.

Τέλος, επειδή κατά τη διάρκεια της ισχυρής σεισμικής κίνησης αναμένεται μη-γραμμική απόκριση του εδάφους, χρησιμοποιούνται (προαιρετικά και προσεγγιστικά) κατάλληλοι μετασχηματισμοί απομείωσης του μέτρου διάτμησης  $G$  και του συντελεστή ποιότητας  $Q$  (ή αύξησης της απόσβεσης αντίστοιχα) με την αναμενόμενη διατμητική παραμόρφωση.

### 3.3 Στάδιο Κινηματικής Αλληλεπίδρασης

Η κίνηση ελεύθερου πεδίου η οποία εκτιμάται στο προηγούμενο στάδιο, τροποποιείται επιπρόσθετα (Σχήμα 4) ώστε να συνεκτιμηθεί τόσο η επιρροή της αλληλεπίδρασης της θεμελίωσης με το έδαφος όσο και αυτή των πασσάλων μεταξύ τους. Η διαφοροποίηση αυτή επιτυγχάνεται με την αποσύζευξη κινηματικής και αδρανειακής αλληλεπίδρασης και θεώρηση προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων δοκού επί δυναμικών ελατηρίων και αποσβεστήρων με σταθερές  $k_x$  και  $C_x$  που υπολογίζονται μέσω προσεγγιστικών σχέσεων (Makris & Gazetas, 1992). Με την παραδοχή ισοδύναμου ομοιόμορφου εδάφους στο επίπεδο της θεμελίωσης, η μετακίνηση της κεφαλής του πασσάλου συνδέεται με αυτή του ελεύθερου πεδίου μέσω του συντελεστής κινηματικής αλληλεπίδρασης ο οποίος πρακτικά εκφράζει τον βαθμό επιρροής της παρουσίας της θεμελίωσης στην απόκριση του εδάφους.

### 3.4 Στάδιο Αδρανειακής Αλληλεπίδρασης

Η τελική (διαφοροποιημένη σε κάθε θέση) απόκριση της κεφαλής του πασσάλου που προκύπτει σύμφωνα με τα παραπάνω, χρησιμοποιείται ως διέγερση για τον φορέα της ανωδομής ο οποίος θεωρείται ότι στηρίζεται επί συστήματος συζευγμένων ελατηρίων και αποσβεστήρων. Το λογισμικό στο στάδιο αυτό υπολογίζει το μιγαδικό μητρώο των συναρτήσεως σύνθετης δυναμικής δυσκαμψίας σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (Gazetas, 1991, Makris & Gazetas, 1992, Pender, 1993), για τη οριζόντια, λικνιστική και συζευγμένη ταλάντωση του μεμονωμένου πασσάλου ή της ομάδας. Ειδικά για την δεύτερη περίπτωση, πραγματοποιείται ο υπολογισμός των, επίσης μιγαδικής μορφής, δυναμικών συντελεστών αλληλεπίδρασης ώστε να συνεκτιμάται η επιρροή της κυματικής ακτινοβολίας που εκπέμπεται από την παράπλευρη επιφάνεια του πασσάλου προς τους γειτονικούς του πασσάλους της ομάδας.

#### 4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Προκειμένου να αναδειχθεί η σχετική επιρροή των υπό μελέτη φαινομένων στην ανάπτυξη σχετικών μετακινήσεων μιας κατασκευής, πραγματοποιείται η ενδεικτική εφαρμογή του λογισμικού (Σχήμα 5) για δύο χαρακτηριστικές περιπτώσεις εδαφών (μέσο / μαλακό) και θεμελίωσης (μεμονωμένος / ομάδα). Για την σεισμική ανάλυση επιλέγεται μια ιδεατή γέφυρα ανοίγματος 70μ. και καταστρώματος που, χάριν απλούστευσης, θεωρείται ότι απλώς εδράζεται στα δύο γειτονικά βάθρα, για την οποία υπολογίζονται οι διαφορετικές σε κάθε θέση χρονοϊστορίες μετακίνησης στην εγκάρσια διεύθυνση. Παράλληλα εκτιμώνται και οι δυναμικές σταθερές των ελατηρίων και των αποσβεστήρων για το στάδιο της αλληλεπίδρασης εδάφους-θεμελίωσης και ανωδομής.

Από τις αναλύσεις για τα δύο σενάρια προκύπτει (Πίνακας 1) πως οι σχετικές μετακινήσεις εξαιτίας της διαφοράς φάσης και της απώλειας συγχροτισμού είναι στο συγκεκριμένο παράδειγμα μικρές, κυρίως εξαιτίας του μικρού ανοίγματος. Αντίθετα, η επιρροή των τοπικών εδαφικών συνθηκών βρίσκεται σε συμφωνία με πρόσφατες αναλύσεις (Saxena et al., 2000) καθώς αποβαίνει ιδιαίτερος ενισχυτική (Σενάριο 2) τόσο στις τελικές απόλυτες μετακινήσεις της κεφαλής του βάθ-

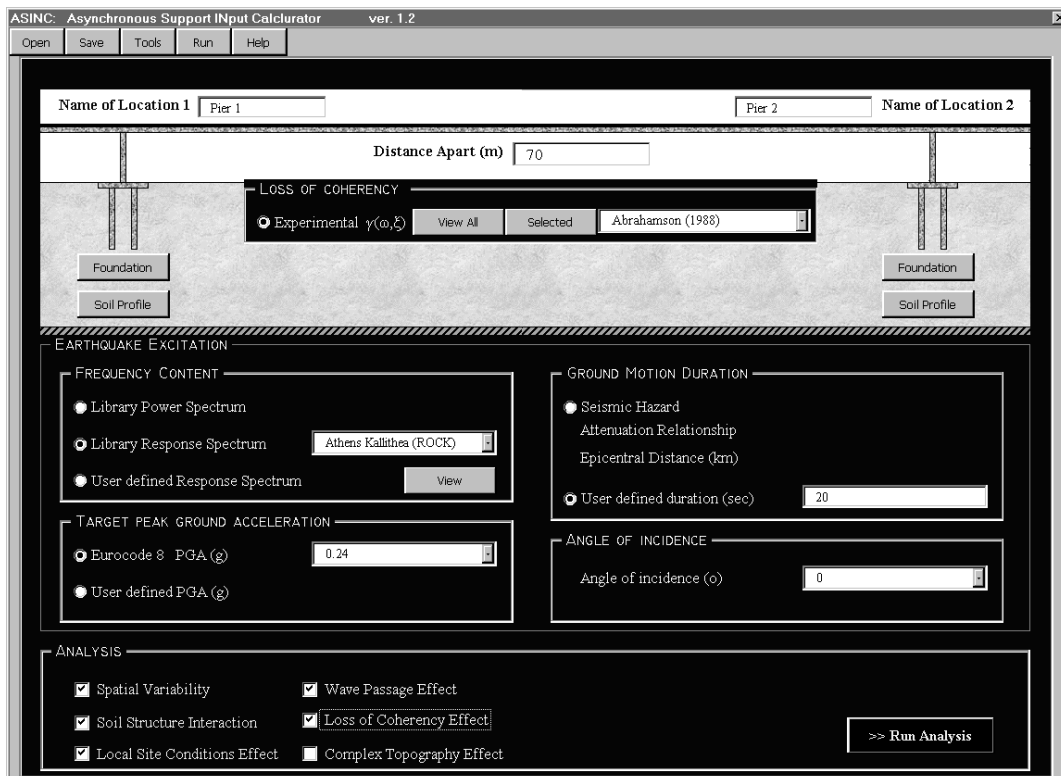
ρου (έως και 3.1 φορές) όσο και στις σχετικές μετακινήσεις (16.4cm). Το γεγονός αυτό απόκτά ιδιαίτερη σημασία αν αναλογιστεί κανείς πως σύμφωνα με τον Ε.Α.Κ. 2000, η γέφυρα θα διεγείρετο με την ίδια κίνηση σε κάθε στήριξη, με αποτέλεσμα η σχετική μετακίνηση μεταξύ των δύο βάθρων να είναι ίση με μηδέν.

Ταυτόχρονα προκύπτει πως η συνεκτίμηση της ενδοσιμότητας της θεμελίωσης σε συνδυασμό με την αυξημένη απόσβεση ενέργειας, λειτουργεί στην συγκεκριμένη περίπτωση ευνοϊκά ως προς τις μετακινήσεις καθώς ο μεν ρόλος της δεύτερης επισκιάζει τον ρόλο της πρώτης, οι δε υψηλές συχνότητες του σεισμικού κραδασμού μειώνονται στο στάδιο της κινηματικής αλληλεπίδρασης.

Σε κάθε περίπτωση πάντως απαιτείται η σημαντική πύκνωση των παραμετρικών αναλύσεων προκειμένου να αναδειχθεί η σχετική επιρροή των ανωτέρω φαινομένων, ο ρόλος των δυναμικών χαρακτηριστικών της ίδιας της κατασκευής, του μήκους των ανοιγμάτων της καθώς και της μη-γραμμικής συμπεριφοράς εδάφους και διατομών Ο/Σ.

#### ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

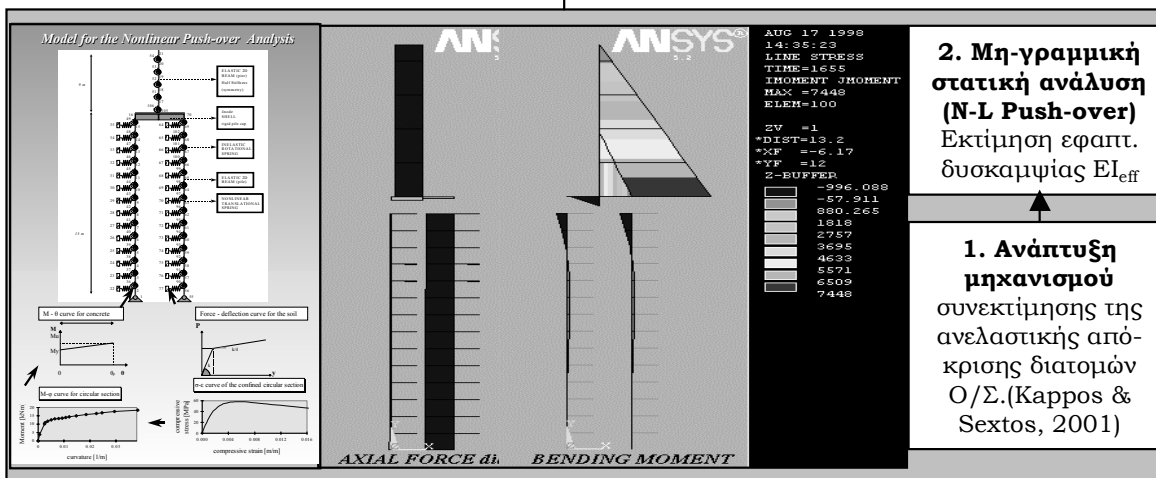
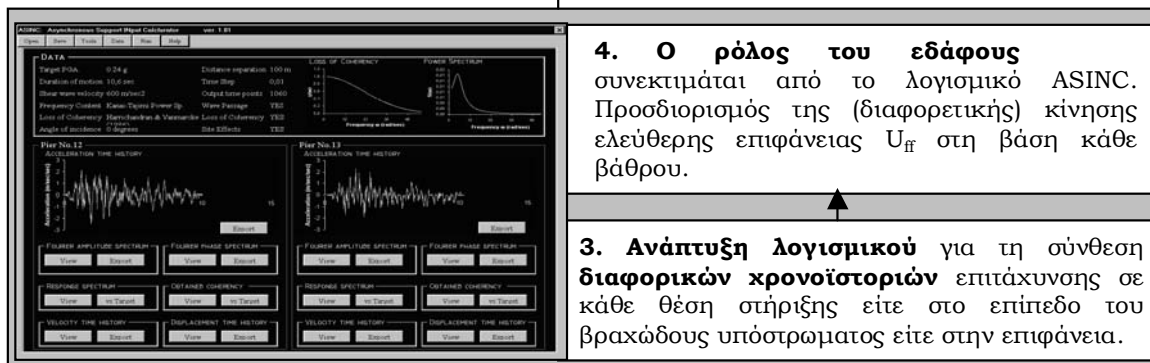
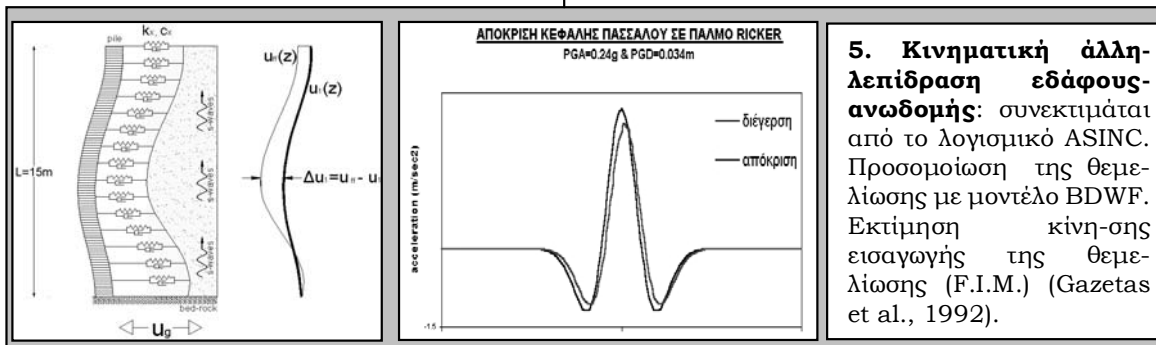
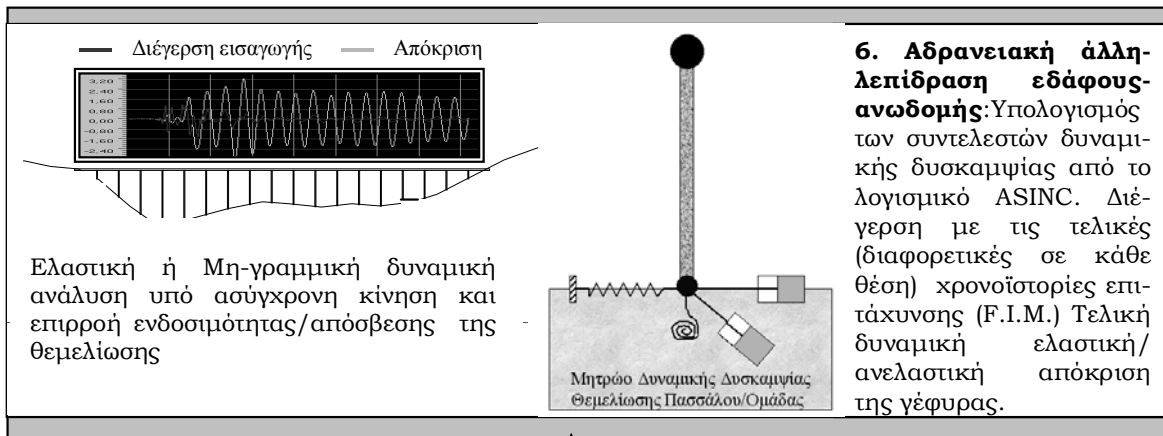
Οι συγγραφείς θα ήθελαν να ευχαριστήσουν τον φυσικό, Δρ. Γεωφυσικής & Τεχν. Σεισμ. κ. Δ. Ραπτάκη για τον κριτικό του σχολιασμό επί ζητημάτων δισδιάστατης εδαφικής δομής.



Σχήμα 2: Εισαγωγή δεδομένων σεισμικής διέγερσης, εδάφους και θεμελίωσης  
Figure 2: input of seismic, soil and foundation data

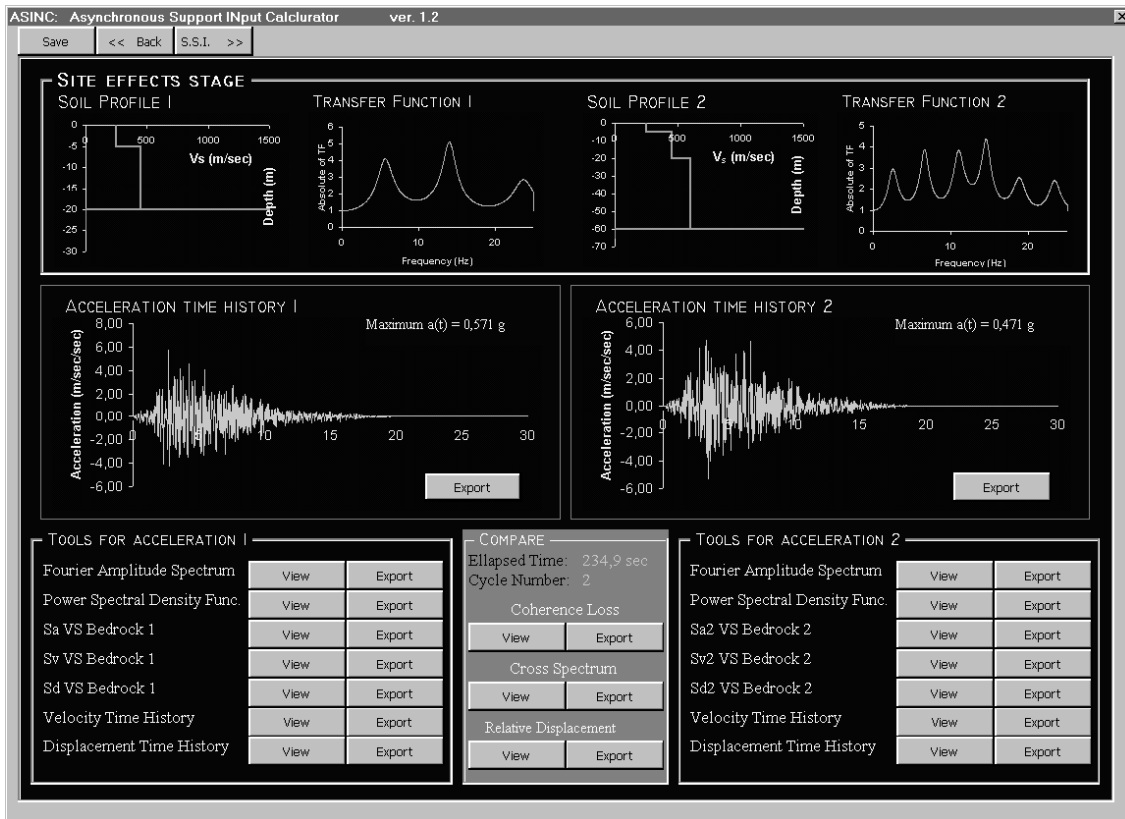
## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Abrahamson, N.A. ; Schneider, J.F. ; Stepp, J.C. (1991) "Empirical Spatial Coherency Functions for Soil-Structure Interaction Analyses", *Earthquake Spectra*, 7 (1), 1-27.
- Clough, R.W. ; Penzien, J. (1993) "Dynamics of Structures", McGraw and Hill, New York.
- Clouteau, D. ; Aurby, D. Savin, E. (1998) "Influence of free field variability on soil-structure interaction", Proceedings of the 11th European Conference on Earthquake Engineering, Paris, CDROM Volume.
- Deodatis, G. (1996) "Simulation of ergodic multivariate stochastic processes", *Journal of Eng. Mechanics*, 122 (8), 778-787.
- Der Kiureghian, A. & Keshishian, P. (1997). "Effects of incoherence, Wave Passage and Spatially Varying Site Conditions on Bridge Response". Proc. of the FHWA/NCEER Workshop on the National Representation of Seismic Motion, NCEER, 393-407.
- Gazetas, G. (1991) "Foundation vibrations" in *Foundation Engineering Handbook*, 2<sup>nd</sup> edition, H-Y Fang editor, 553-593.
- Hao, H. (1989) "Effects of spatial variation of ground motions on Large multiply-supported structures", UBC/EERC-89/06, Berkeley: EERC, University of California.
- Hindy, A. & Novak, M. (1980) "Pipeline Response to random ground motion", *Journal of Eng. Mech.*, ASCE, 106, 339-360.
- Kappos, A.J. & Sextos, A. (2001) "Effect of foundation compliance on the lateral load response of R/C bridges," *Journal of Bridge Engineering*, ASCE ; Vol. 6 (2), 120-130.
- Κάππος, Α. & Σέξτος, Α. (1999) "Βελτίωση της σεισμικής συμπεριφοράς γεφυρών από Ο/Σ με κατάλληλη επιλογή του τύπου της θεμελίωσης", 13<sup>ο</sup> Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος, Ρέθυμνο, ΙΙΙ, 349-360.
- Kahan, M.; Gibert, R.; Bard, P.-Y. (1996) "Influence of spatial wave variability on bridges: A sensitivity analysis", *Earthquake Eng. & Structural Dynamics*, 25(8), 795-814.
- Kennett, B.L.N. (1983) "Seismic Wave Propagation in Stratified Media", Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- Keshishian, P. & Der Kiureghian, A. (1998) "Effect of Soil-Bridge Interaction on Response to Spatially Varying Ground Motion", *Structural Engineering World Wide 1998*, Oxford, England, file T149-3.
- Loh, C.H. & Lee, S.Z. (1990) "Aseismic displacement analysis of multi-supported bridge to multiple excitations", *Soil Dynamics and Earthq. Eng.*, 9 (1), 25-33.
- Luco, J.E. and Wong H.L. (1986) Response of a rigid foundation to a spatially random ground motion, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 14, 891-908.
- Makris, N. & Gazetas, G. (1992). "Dynamic pile-soil-pile interaction. Part II: Lateral and seismic response." *Earthquake Eng. and Structural Dynamics*; 21(2), 145-162.
- Monti, G. ; Nuti, C. ; Pinto, P. and Vanzi, I. (1994) "Effects of non-synchronous seismic input on the inelastic response of bridges", Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Workshop on Seismic Design of Bridges , Queenstown, New Zealand, 1, 90-107.
- Pender, M.J. (1993) "Aseismic pile foundation design analysis", *Bulletin of the New Zealand National Society on Earthq. Engineering*, 26 (1), 49-161.
- Price, T.E. ; Eberhard, M.O. (1998) "Effects of Spatially Varying Ground Motions on Short Bridges", *Journal of Structural Engineering*, 124 (8), 948-955.
- Raptakis, D., F.J. Chavez-Garcva, K. Makra & K. Pitilakis (2000) "Site effects at EURO-SEISTEST. 2D model, observations and comparison with 1D analysis", *Soil Dynamics and Earth. Eng.*, 19 (1), 1-22.
- Riepl, J. ; Oliveira, C.S. ; Bard, P. (1997) "Spatial Coherence of seismic wave fields across an alluvial valley (weak motion)", *Journal of Seismology*, 1, 253-268.
- Saxena, V. ; Deodatis, G. & Shinozuka, M. (2000) "Effect of Spatial Variation of Earthquake Ground Motion on the nonlinear dynamic response of highway bridges", 12<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, CDROM Volume, No 2227.
- Shinozuka, M and Deodatis, G. (1997) "Effect of Spatial Variation of Earthquake Ground Motion on Seismic Response of Bridges", Proc. of the FHWA/NCEER Workshop on the National Representation of Seismic Motion, Tech. Rept, NCEER, Rep. 97-0010.
- Shrikhande, M & Gupta, V. (1999) "Dynamic Soil-Structure Interaction Effects on the Seismic Response of Suspension Bridges", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 28, 1383-1403.
- Σέξτος, Α. , Μάκρα, Κ & Πιτιλάκης, Κ. (1999) "Αποτίμηση των σεισμών σχεδιασμού κατά EC8, UBC/97 και NEAK μέσω καταγραφών και αναλύσεων", 13<sup>ο</sup> Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος, Ρέθυμνο, ΙΙΙ, 168-184.
- Wolf, J.P. (1994) "Foundation vibration analysis using simple physical models", Pentice Hall.
- Zerva, A. & Harada, T. (1997) "Effect of surface layer stochasticity on seismic ground motion coherence and strain estimates", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 16, (7-8), 445-457.
- Zerva, A. (1999) "Spatial Variability of Seismic Motions Recorded Over Extended Ground Surface Areas", in *Wave Motion in Earthquake Engineering*, Volume in the Series Advances in Earthquake Engineering, Editors: E. Kausel and G.D. Manolis, WIT Press.

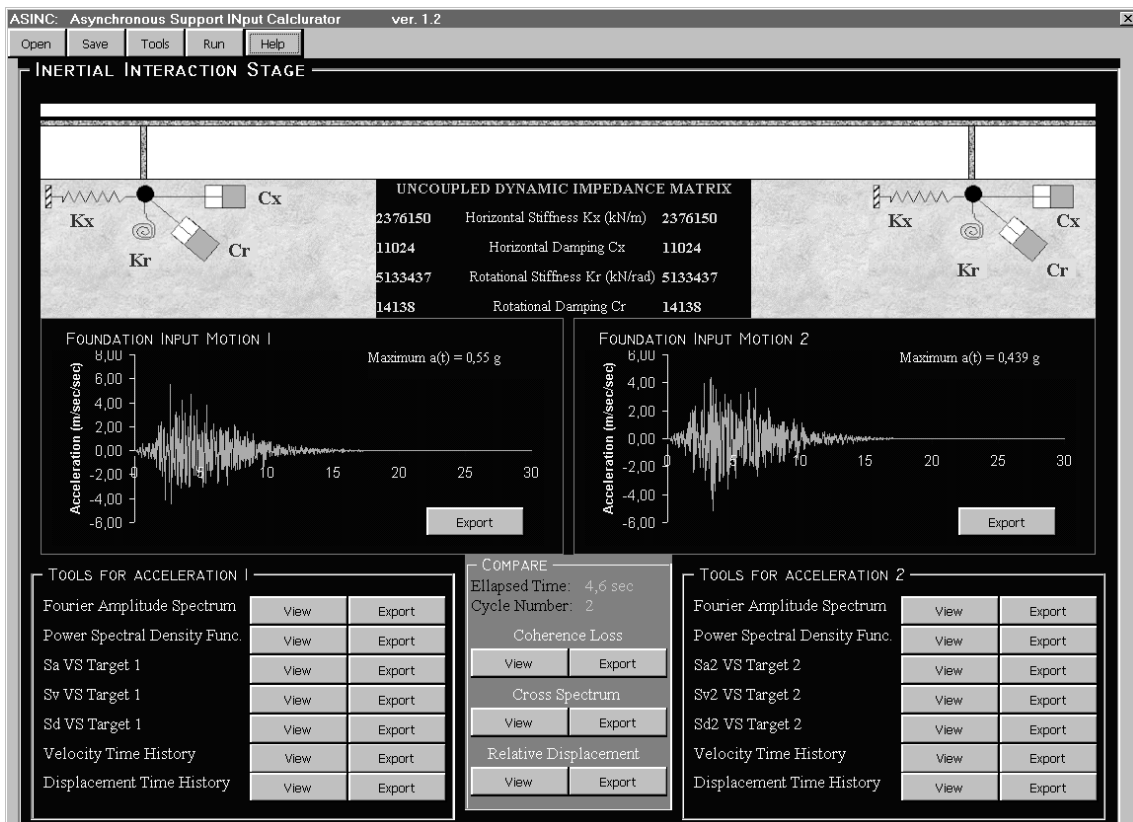


Σχήμα 1: Γενική μεθοδολογία δυναμικής ανάλυσης γέφυρας υπό την επιρροή των τοπικών εδαφικών συνθηκών, της χωρικής μεταβλητότητας και φαινομένων αλληλεπίδρασης

Figure 1: General methodology for the dynamic analysis of bridges under the effect of local site conditions, spatial variability and soil-structure-interaction.



Σχήμα 3: Εδαφική απόκριση στο επίπεδο της θεμελίωσης εξαιτίας της χωρικής μεταβλητότητας της σεισμικής κίνησης και της επιρροής των τοπικών εδαφικών συνθηκών  
 Figure 3: Soil response at the foundation level due to spatial variability and local soil conditions

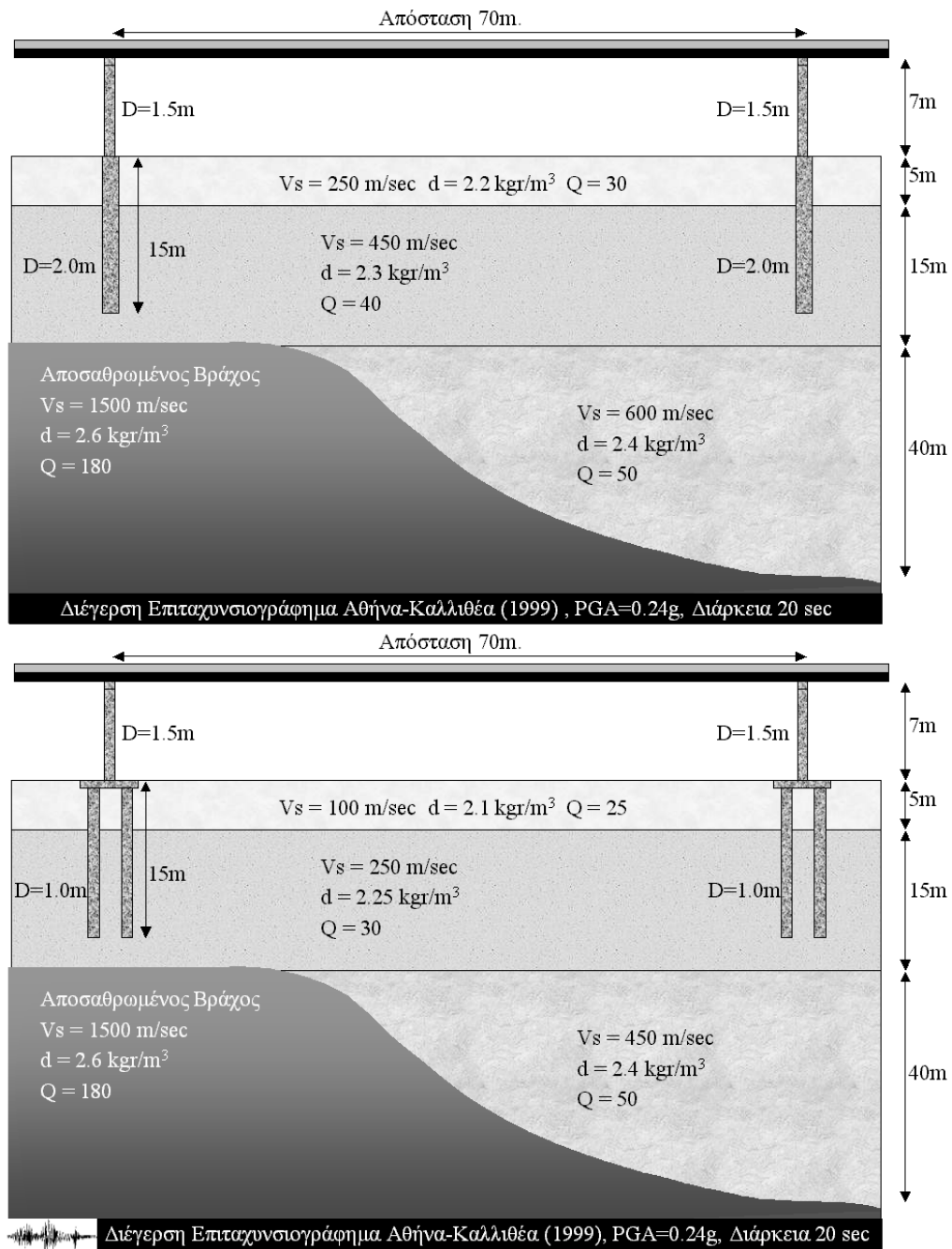


Σχήμα 4: Κίνηση εισαγωγής στη θεμελίωση και συντελεστές δυναμικής δυσκαμψίας  
 Figure 4: Foundation Input Motion and Dynamic Impedance coefficients

Ανάλυση	ΣΕΝΑΡΙΟ 1: Μέσο έδαφος Θεμελίωση με φρεατοπασσάλους			ΣΕΝΑΡΙΟ 2: Μαλακό έδαφος Θεμελίωση με ομάδα πασσάλων		
	d <sub>max</sub> Βάθρο 1	d <sub>max</sub> Βάθρο 2	Σχετική Μετακίνηση	d <sub>max</sub> Βάθρο 1	d <sub>max</sub> Βάθρο 2	Σχετική Μετακίνηση
Σύγχρονη κίνηση ΕΑΚ2000	7.53cm	7.53cm	0.00	7.53cm	7.53cm	0.00
θ	7.53cm	7.53cm	1.64cm	7.53cm	7.53cm	1.80cm
γ+θ	7.53cm	9.30cm	3.28cm	7.53cm	7.50cm	0.81cm
γ+θ+ΤΕΣ	7.48cm	12.18cm	7.06cm	9.53cm	23.4cm	<b>16.4cm</b>
γ+θ+ΤΕΣ+ΚΑΕΑ	6.56cm	9.75cm	5.67cm	8.66cm	20.8cm	14.6cm
γ+θ+ΤΕΣ+ΑΑΕΑ	5.64cm	6.00cm	4.14cm	5.10cm	8.90cm	5.61cm

γ=απώλεια συγχροτισμού, θ=διαφορά φάσης, ΤΕΣ=Τοπικές Εδαφικές Συνθήκες ΚΑΕΑ=Κιν/κή Αλλ/ση Εδάφους-Ανωδομής

Πίνακας 1: Σχετικές και απόλυτες μετακινήσεις κεφαλής γειτονικών βάθρων  
Table 1: Relative and absolute displacements of adjacent piers



Σχήμα 5: Εναλλακτικά σενάρια τύπου θεμελίωσης και εδαφικών προφίλ  
Figure 5: Alternative scenarios of foundation type and soil profile