

ΠΡΑΚΤΙΚΑ
3ου ΠΑΝΕΛΛΗΝΙΟΥ ΣΥΝΕΔΡΙΟΥ
ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

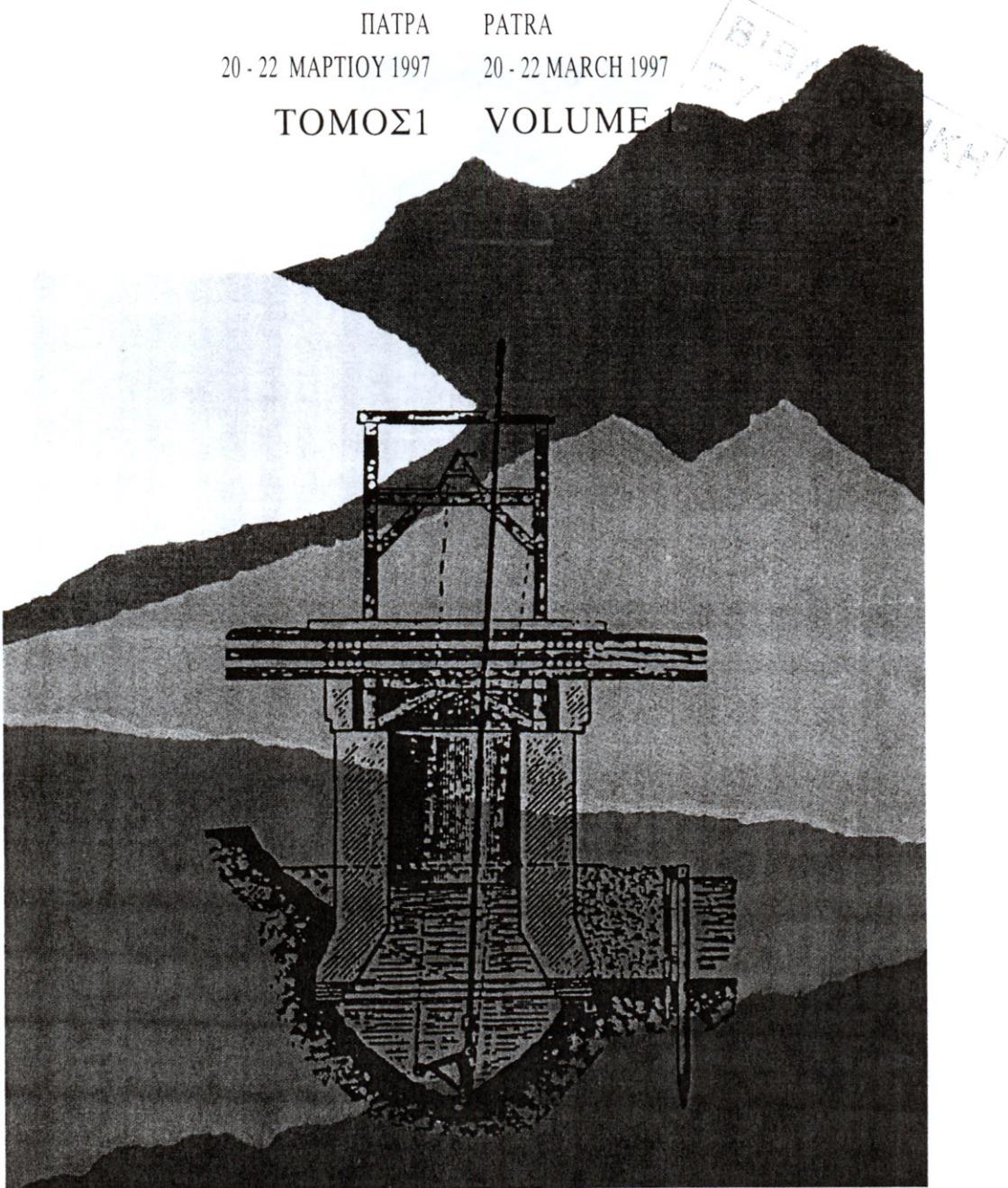
ΠΑΤΡΑ
20 - 22 ΜΑΡΤΙΟΥ 1997

ΤΟΜΟΣ 1

PROCEEDINGS
3rd HELLENIC CONFERENCE
ON GEOTECHNICAL ENGINEERING

PATRA
20 - 22 MARCH 1997

VOLUME 1



ΤΕΧΝΙΚΟ ΕΠΙΜΕΛΗΤΗΡΙΟ ΕΛΛΑΣΑΣ
ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΗ ΕΤΑΙΡΕΙΑ
ΕΔΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ & ΘΕΜΕΛΙΩΣΕΩΝ

TECHNICAL CHAMBER OF GREECE
HELLENIC SOCIETY OF SOIL MECHANICS
AND FOUNDATION ENGINEERING

Σύγκριση αναλυτικών μεθόδων εδαφικής απόκρισης με μακροσεισμικές παρατηρήσεις στην περιοχή του Βαρθολομίου.

Comparison of soil response methods with macroseismic observations at the area of Bartholomio

ΤΣΕΛΕΝΤΗΣ, Γ.Α.	Σεισμολόγος - Γεωφυσικός, Αναπλ. Καθηγητής, Πανεπιστήμιο Πατρών.
ΒΑΣΙΛΕΙΟΥ, Ι.	Τεχν. Γεωλόγος, ΚΕΔΕ.
ΛΕΚΚΑΣ, Ε.	Γεωλόγος, Επικ. Καθηγητής, Πανεπιστήμιο Αθηνών.
ΡΟΥΜΠΑΣ, Δ.	Πολιτικός Μηχανικός, Διπλ. ΕΜΠ.
ΣΩΚΟΣ, Ε.	Γεωλόγος, Μεταπτυχιακός Φοιτητής, Πανεπιστήμιο Πατρών.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Με γεωτρήσεις και γεωφυσικές έρευνες προσδιορίζονται η γεωλογική τομή και οι εδαφοδυναμικές ιδιότητες των υλικών της στο Βαρθολομίο Ηλείας. Επιλύονται μοντέλα μίας διάστασης και δύο διαστάσεων κυματικών μεθόδων, μεθόδων πεπερασμένων διαφορών και πεπεράσμένων στοιχείων, χρησιμοποιώντας γνωστά προγράμματα εδαφικής απόκρισης. Γενικά παρατηρούνται διαφορές μεταξύ των μακροσεισμικών παρατηρήσεων και των αποτελεσμάτων της ανάλυσης. Εκφράζεται επιφύλαξη για την χρήση κυρίως μονοδιάστατων μοντέλων ανάλυσης για την εκτίμηση της εδαφικής απόκρισης.

ABSTRACT: Using data from boreholes and from geophysical investigations the geological cross section and the dynamical properties of the soils at the city of Bartholomio, Ilias are derived. 1-D models and 2-D models are used in the analysis of the soil response, using finite difference and finite elements schemes. Generally we observe differences between the results and the macroseismic observations. The use of 1-D models only, in the soil response analysis is criticized in this case.

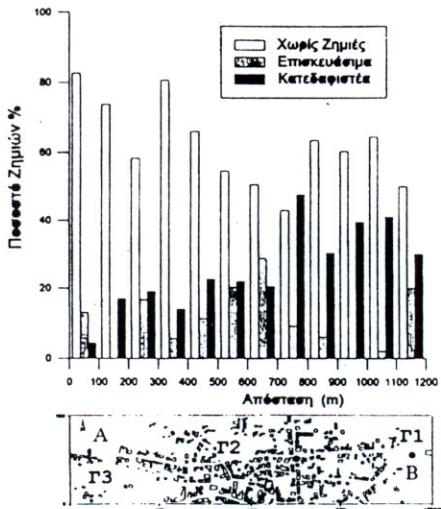
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στις 16 Οκτωβρίου 1988 μια σεισμική δόνηση μεγέθους $M_s=5.9$ και με επίκεντρο τον θαλάσσιο δίσυλο μεταξύ της Ζακύνθου και Πελοποννήσου, έπληξε την ευρύτερη περιοχή της χερσονήσου της Κυλλήνης. Από τη σεισμική δόνηση υπέστησαν σημαντικές καταστροφές οι οικιστικές περιοχές της χερσονήσου με σοβαρότερες στα χωριά Κυλλήνη-Κάστρο και στο Δήμο Βαρθολομίου. Ειδικότερα, στο Δήμο Βαρθολομίου, οι καταστροφές ήταν ιδιαίτερα σημαντικές και έδειξαν μια διαφοροποιημένη κατανομή από θέση σε θέση μέσα στον ευρύτερο οικιστικό χώρο.

Οι εκδηλούμενες ζημιές κατά μήκος μιας διεύθυνσης Δ-Α (Σχ.1) που διέρχεται από το κέντρο της πόλης του Βαρθολομίου και εκατέρωθεν της οποίας η πυκνότητα δόμησης ήταν μεγάλη, παρουσίασαν μια σημαντική αύξηση προς Ανατολικά (Λέκκας, 1992) (Σχ.1). Καταστροφές παρατηρήθηκαν σε όλες τις παλιές όσο και στις νέες κατασκευές μονώρωφες και διώρωφες. Είχαμε ζημιές ανεξαρτήτως της ηλικίας και του ύψους των κτιρίων (Σχ.1). Είναι

χαρακτηριστικό ότι το κοιμητήριο στο ανατολικότερο σημείο της πόλης καταστράφηκε ολοσχερώς, παρατηρήθηκαν δε και περιστροφές.

Στη συγκεκριμένη εργασία με βάση τα αποτελέσματα γεωτεχνικών και γεωφυσικών έρευνών, γίνεται μια προσπάθεια απεικόνισης του αντιπροσωπευτικού τεχνικογεωλογικού μοντέλου κατά μήκος της τομής Α-Β του Σχ.1. Η τομή αυτή σε συνδυασμό με την εκτιμούμενη δόνηση στο σεισμικό υπόβαθρο της περιοχής είναι απαραίτητη για την εφαρμογή των διαφόρων αναλυτικών μεθόδων εκτίμησης της δυναμικής απόκρισης των εδαφών, προκειμένου να συγκριθούν τα αποτελέσματα που θα προκύψουν με την κατανομή των βλαβών που φαίνονται στο Σχήμα 1. Για τον υπολογισμό της εδαφικής απόκρισης της τομής Α-Β, Σχ.1 χρησιμοποιήθηκαν προγράμματα μονο διάστασης και δισδιάστατης ανάλυσης γραμμικής και ισοδύναμα γραμμικής συμπεριφοράς του εδάφους. Εγίνε χρήση κυματικών μεθόδων και μεθόδων πεπερασμένων στοιχείων σε μία ή δύο διαστάσεις προσδομοιώνοντας κατάλληλα το έδαφος.



Σχήμα 1: Κατανομή των ζημιών στην πόλη του Βαρθολομίου. Όλα τα κτίρια είναι μέχρι 2 ορόφων.

Figure 1. Distribution of damages at the city of Bartholomio for low-rise buildings.

Αξιολογήσαμε τα αποτελέσματα για κάθε μέθοδο χωριστά και συγκρίναμε τα αποτελέσματα κάθε μεθόδου για τις θέσεις Γ1, Γ2, Γ3.

2. ΓΕΩΛΟΓΙΑ - ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ

Οπως είναι γνωστό, η ευρύτερη περιοχή της ΒΔ Πελοποννήσου παρουσιάζει αυξημένη σεισμικότητα λόγω των έντονων γεωδυναμικών διεργασιών που εξελίσσονται στην περιοχή, εξαιτίας της γειτνίασης με το όριο σύγκλισης των λιθοσφαιρικών πλακών της Ευρώπης και της Αφρικής.

Η πόλη του Βαρθολομίου ουσιαστικά είναι θεμελιωμένη πάνω σε πρόσφατους Τεταρτογενείς σχηματισμούς, με κυμαινόμενο πάχος, οι οποίοι καταλαμβάνουν το επίπεδο πεδινό τμήμα της λεκάνης του Πηνειού ποταμού. Οι Τεταρτογενείς σχηματισμοί επικάθονται ασύμφωνα πάνω σε παλαιότερους μεταλλικούς σχηματισμούς ηλικίας Μειόκαινου - Πλειόκαινου και πάχους μέχρι 2.000 μέτρα περίπου. Οι σχηματισμοί αυτοί εμφανίζονται ανατολικά της πόλης του Βαρθολομίου στην περιοχή της Αμαλιάδας και δυτικά στην περιοχή της Κυλλήνης. Τέλος, δύο οι προηγούμενοι σχηματισμοί επικάθονται στο Αλπικό υπόβαθρο,

το οποίο εμφανίζεται ανατολικά της Αμαλιάδας και δυτικά στην περιοχή του Κάστρου Κυλλήνης.

Η διάταξη των σχηματισμών υποδηλώνει την παρουσία ενός τεκτονικού βυθίσματος με γενική διεύθυνση Β-Ν (Λέκκας, κ.ά., 1992) στην περιοχή του Βαρθολομίου, με υπόβαθρο αλπικούς σχηματισμούς, το οποίο έχει πληρωθεί από τους πρόσφατους μεταλπικούς σχηματισμούς. Τα ρήγματα που συνοδεύουν το τεκτονικό βύθισμα και έχουν την ίδια γενική διεύθυνση εμφανίζονται μόνο σε ορισμένες θέσεις, όπως στην περιοχή του Κάστρου Κυλλήνης, ενώ στις υπόλοιπες έχουν καλυφθεί από τους Ολοκαινικούς σχηματισμούς. Ουσιαστικά η τομή Α-Β κατά μήκος της οποίας έγιναν οι γεωτεχνικές-γεωφυσικές έρευνες είναι εγκάρσια στη διάταξη των γεωλογικών σχηματισμών και του τεκτονικού βύθισματος.

3. ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Η εκτίμηση του τεχνικογεωλογικού μοντέλου κατά μήκος της τομής Α-Β, που διέρχεται από τον κεντρικό άξονα της πόλης του Βαρθολομίου, προέκυψε από τα συνδιασμένα αποτελέσματα γεωτεχνικής και γεωφυσικής έρευνας.

3.1. Γεωτεχνική - Γεωφυσική Ερευνα

Η εκπονηθείσα γεωτεχνική - γεωφυσική έρευνα περιελάμβανε:

α) Την εκτέλεση από το ΚΕΔΕ (Δ14a) τριών δειγματοληπτικών γεωτρήσεων Γ1, Γ2, Γ3, μέγιστου βάθους 51.80μ, 61.30μ και 75.60μ αντίστοιχα (στη Γ2 από 61.30 - 154.0μ έγινε τυφλή διάτρηση για πιθανή εκτίμηση υποβάθρου).

β) την εκτέλεση επιτόπου:

- ◆ δοκιμών πρότυπης διείσδυσης (S.P.T) ανά 1.5-2.15μ. σε κάθε μία γεώτρηση
- ◆ μετρήσεων στάθμης νερού (από την επιφάνεια του εδάφους), πριν την έναρξη και μετά το τέλος της ημερήσιας γεωτρητικής εργασίας, για την εκτίμηση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα (Σ.Υ.Ο).

γ) την εκτέλεση εργαστηριακών δοκιμών για :

- ◆ την κατάταξη των συναντώμενων εδαφικών υλικών κατά το AUSCS (όπως: κοκκομέτρηση χονδρόκοκκου και λεπτόκοκκου κλάσματος, προσδιορισμός δείκτη πλαστικότητας, Ip).
- ◆ τον υπολογισμό του υγρού φαινόμενου βάρους (Υ.Φ.Β)

- ♦ την εκτίμηση των μηχανικών ιδιοτήτων των εδαφών (π.χ. αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη, q_u, αστράγγιστη διατμητική αντοχή, c_u)
- ♦ τον προσδιορισμό των δυναμικών παραμέτρων των αντιπροσωπευτικών υλικών που συναντώνται, με την εκτέλεση δοκιμών στήλης συντονισμού (R-C). Συγκεκριμένα εκτιμήθηκε το κανονικοποιημένο μέτρο διάτμησης (G/G_{max}) και ο λόγος υστερητικής απόσβεσης (D) για ένα μεγάλο εύρος επιβαλλόμενης διατμητικής παραμόρφωσης γ (10⁻⁶ ≤ γ ≤ 10⁻²).
- δ) την εκτέλεση γεωφυσικών ερευνών που συνίστανται από:
 - ♦ δοκιμές Cross - Hole στις Γ1 και Γ2 και Γ3, μέγιστου βάθους 49.90μ, 60.10μ και 56.00μ αντίστοιχα, κατά τις οποίες σαν πηγή σεισμικής ενέργειας χρησιμοποιήθηκε ο διαιρετός δειγματολήπτης της δοκιμής S.P.T. Από τις παραπάνω δοκιμές εκτιμήθηκαν τα δυναμικά χαρακτηριστικά των εδαφών για χαμηλές διατμητικές παραμορφώσεις (10⁻⁵ ≤ γ ≤ 10⁻³), όπως: ταχύτητες επιμήκων και διατμητικών κυμάτων (V_p και V_s αντίστοιχα), μέγιστο ελαστικό μέτρο διάτμησης (G₀), και λόγος του Poisson (v), Πίνακας 1.
 - ♦ κλασσικές δοκιμές σεισμικής διάθλασης και ανάκλασης για την εκτίμηση του σεισμικού υποβαθρου.

3.2 Αποτελέσματα

Από τα αποτελέσματα των προαναφερόμενων ερευνών προέκυψε ότι στην περιοχή Βαρθολομίου συναντώνται τρεις βασικές γεωτεχνικές ενότητες:

- **ΕΝΟΤΗΤΑ Α.** η οποία συναντάται επιφανειακά με πάχος αυξανόμενο από δυτικά προς ανατολικά (κυμαινόμενο από 6.20 έως 15.10μ). Αυτή συνίσταται κυρίως από καστανή, καστανοκίτρινη έως καστανότεφρη αμμώδη έως ίλιυάδη άργιλο (στρώμα 1), με πισσόλιθους, ασβεστικά συγκρίματα και ίχνη οργανικών (που τοπικά μεταπίπτει σε άργιλώδη άμμο), με ενστρώσεις καστανοκίτρινης αμμώδους ίλιούς (στρώμα 2a). Η ενότητα Α, πιθανά αντιπροσωπεύει τις πρόσφατες τεταρτογενείς αποθέσεις.
- **ΕΝΟΤΗΤΑ Β.** η οποία έχει πάχος κυμαινόμενο από 37μ (στην Γ1) έως 41μ (στή Γ3). Η ενότητα αυτή στους ανώτερους ορίζοντες αποτελείται κυρίως από εναλλαγές καστανοκίτρινης έως καστανέρυθρης ίλιυάδους έως καθαρής άμμου, (στρώμα 2β),

με στρώμα ανοικτότεφρης, καστανότεφρης έως και καστανοκίτρινης αμμώδους ίλιούς (στρώμα 2a). Σε βάθυ 29.45 - 32.50μ και 17.30 - 18.80μ, στις Γ2 και Γ3 αντίστοιχα, παρουσιάζεται φακοειδής ένστρωση καστανοκίτρινου ψαμμίτη (στρώμα 3). Στους βαθύτερους ορίζοντες της ενότητας Β, συναντώνται εναλλασσόμενα στρώματα μικρού σχετικά πάχους, τεφρής-τεφροκύανης μαργαϊκής αργίλου, (στρώμα 4a), μαργαϊκής ίλιος, (στρώμα 4b), με θραύσματα οστράκων, ίχνη φυκιών και λεπτά σποραδικά χαλίκια, καθώς και τεφρής ίλιυάδους άμμου (στρώμα 2β). Η ενότητα Β, πιθανά αντιπροσωπεύει τους Μεταλπικούς Μειο-Πλειοκανικούς σχηματισμούς

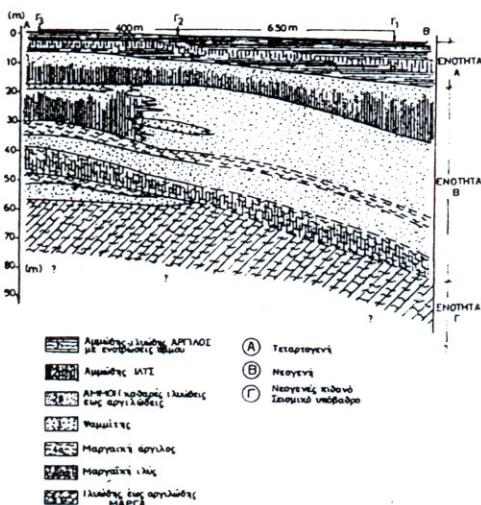
- **ΕΝΟΤΗΤΑ Γ.** που αποτελεί τη συνέχεια της ενότητας Β, είναι ίδιας στρωματογραφικής ηλικίας και συνίσταται κυρίως από τεφρή έως τεφροκύανη αργιλώδη έως ίλιυάδη μάργα (στρώμα 4γ) με ενστρώσεις ίλιυάδους έως αργιλώδους άμμου (στρώμα 2β). Οι βαθύτεροι ορίζοντες της ενότητας αυτής όπως έδειξαν τα αποτελέσματα των γεωφυσικών διασκοπήσεων, αποτελούν το «σεισμικό» υπόβαθρο της περιοχής. (V_s ≥ 750 m/sec).

Στο σχήμα 2 παρουσιάζεται απλοποιημένο το αντιπροσωπευτικό τεχνικό - γεωλογικό μοντέλο του Βαρθολομίου, κατά μήκος της τομής Α -Β.

Πίνακας 1. Δυναμικά χαρακτηριστικά.

Table 1. Dynamical properties.

Γεώτ.	Στρώμα	V _s (m/sec)	V _p (m/sec)	G ₀ (MPa)	V
Γ1	1-2a	200	1028	83.0	0.478
Γ1	2a-2β	295	1526	189.7	0.484
Γ1	2β	337	1737	226.3	0.481
Γ2	1	241	627	121.4	0.413
Γ2	1	254	1672	135.3	0.488
Γ2	2a-2β	306	1766	192.0	0.485
Γ2	2β	453	2285	416.8	0.479
Γ2	3	656	2632	1035	0.467
Γ2	2β	453	2285	416.8	0.479
Γ2	4a	413	2131	362.6	0.480
Γ2	2β	463	2159	445.4	0.476
Γ2	4a	469	2101	474.6	0.473
Γ2	4γ-2β	643	2677	898.8	0.469
Γ3	1	271	473	156.3	0.255
Γ3	2β,(2a)	292	659	173.9	0.378
Γ3	2β,(2a)	305	1582	198.9	0.481
Γ3	3	506	1922	615.4	0.463
Γ3	2a	366	1998	284.1	0.482
Γ3	4a	376	2097	300.0	0.483
Γ3	2β	533	2506	579.5	0.476
Γ3	4a-4β	402	2350	343.0	0.485
Γ3	4γ-2β	661	2423	950.8	0.459



Σχήμα 2: Γεωλογική τομή Α-Β.

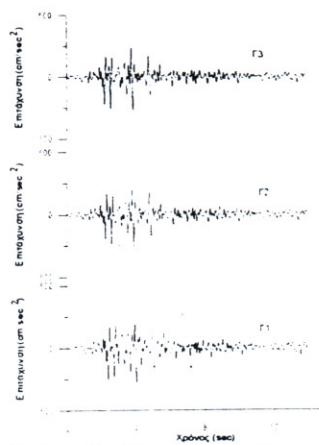
Figure 2: Geological cross-section A-B.

4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΝΑΛΥΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ

4.1 Μέθοδος μονοδιάστατης κυματικής ελαστικής ανάλυσης.

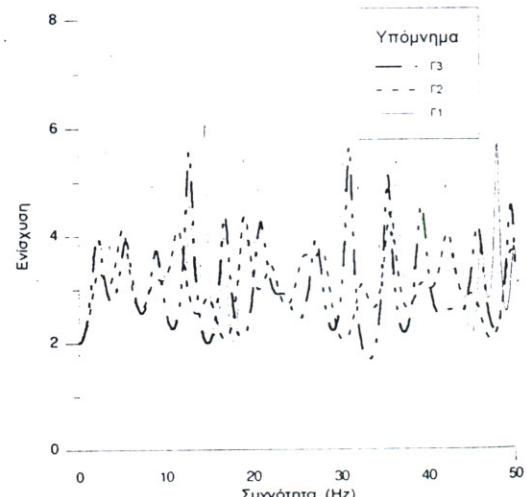
Αρχικά για την εκτίμηση της εδαφικής απόκρισης θεωρείται μοντέλο ελαστικού ημιχώρου με παράλληλες στρώσεις. Το μονοδιάστατο αυτό μοντέλο εφαρμόζεται σε τρεις θέσεις, Γ₁, Γ₂ και Γ₃. Με τη χρήση του προγράμματος SITEF, Zahradník et al (1995) υπολογίζεται η μετάδοση οριζόντια πολωμένων σεισμικών κυμάτων. Σαν διέγερση χρησιμοποιείται η καταγραφή του κυρίως σεισμού της Κυλλήνης στη Ζάκυνθο (ΙΤΣΑΚ 1995), αφού τροποποιήθηκε ώστε να αντιστοιχεί με καταγραφή στο υπόβαθρο για τη θέση του Βαρθολομίου Ηλείας. Η μέγιστη επιπτάχυνση στο υπόβαθρο είναι 0.16g. Στα Σχ.3, 4 δίνονται οι εδαφικές αποκρίσεις στην επιφάνεια, στις τρεις θέσεις Γ₁, Γ₂, Γ₃ και οι αντίστοιχες συναρτήσεις μεταφοράς.

Προέκυψε ότι δεν υπήρξαν διαφοροποιήσεις στις κυματομορφές επιπταχύνσεων και μετακινήσεων έτσι ώστε να δικαιολογήσουν διαφορετικό ποσοστό βλαβών στις κατασκευές.



Σχήμα 3: Εδαφικές κινήσεις στην επιφάνεια με την μέθοδο μονοδιάστατης ελαστικής ανάλυσης.
Figure 3: Seismic motions at the surface results from 1-D elastic analysis.

Αξίζει να σημειωθεί όμως ότι για τις συχνότητες του ενδιαφεροντός μας (2-12Hz) παρατηρείται ότι η συνάρτηση μεταφοράς στην θέση Γ₁ προκύπτει σχετικά ενισχυμένη σε σχέση με τις αντίστοιχες των θέσεων Γ₂ και Γ₃.



Σχήμα 4: Συναρτήσεις μεταφοράς με την μέθοδο μονοδιάστατης ελαστικής ανάλυσης.

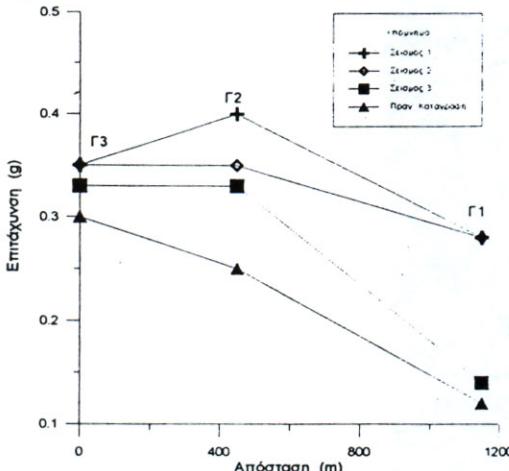
Figure 4: Transfer functions using the 1-D elastic analysis.

4.2 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων σε μία διάσταση

Στις θέσεις των γεωτρήσεων, προσομοιώνονται τα στρώματα με ορθογώνια πεπερασμένα

στοιχεία με δυνατότητα κίνησης κατά μία διεύθυνση χρησιμοποιούμε το πρόγραμμα LUSH2, Lysmer et al (1974). Συνοπτικά τα αποτελέσματα για τρεις χαρακτηριστικούς σεισμούς και την διέγερση του σεισμού της Κυλλήνης 1988 φαίνονται στο Σχ.5.

• Παρατηρήθηκε ότι οι επιταχύνσεις είναι μικρότερες στη θέση Γ1 από ότι στη θέση Γ3. Οι μετακινήσεις στις θέσεις Γ1 και Γ3 είναι της ίδιας τάξης μεγέθους για τις ίδιες συχνότητες. Κανονικά θα έπρεπε να είχαμε μεγαλύτερες καταστροφές στη θέση Γ3 στην πραγματικότητα όμως συνέβη το αντίθετο.



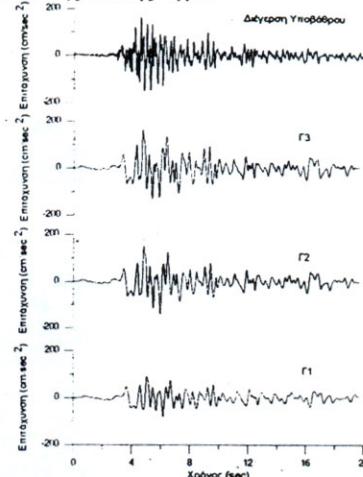
Σχήμα 5: Μέγιστες επιταχύνσεις με την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων σε μία διάσταση.

Figure 5: Maximum accelerations using the finite element 1-D method.

4.3 Μέθοδος ισοδύναμης γραμμικής ανάλυσης σε μία διάσταση.

Χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα SHAKE91 (Idriss et al 1992). Η εδαφική τομή στις τρεις χαρακτηριστικές θέσεις των γεωτρήσεων Γ1, Γ2, Γ3 προσομοιώνεται σαν ένα σύστημα από ομογενή βισκοελαστικά στρώματα, άπειρης οριζόντιας έκτασης ανά θέση. Θεωρούμε κάθετη πρόσπτωση οριζόντια πολωμένων διατμητικών κυμάτων. Επιλύοντας τις εξισώσεις κίνησης, μία ισοδύναμη επαναλαμβανόμενη γραμμική διαδικασία χρησιμοποιείται, για να εισαγάγει τη μη γραμμική συμπεριφορά του εδάφους. Οι καμπύλες $\gamma, G/G_{max}$ και $\gamma, D/D_{max}$ όπως προέκυψαν από τις εργαστηριακές έρευνες, εισάγονται στα δεδομένα της μη γραμμικής συμπεριφοράς του εδάφους.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης με το SHAKE δίνουν μεγαλύτερες αποσβέσεις του σεισμικού κραδασμού από τα δυτικά προς τα ανατολικά της πόλης Σχ.6.



Σχήμα 6: Εδαφικές κινήσεις στην επιφάνεια με την μέθοδο της ισοδύναμης γραμμικής ανάλυσης σε μία διάσταση.

Figure 6: Seismic motions at the surface results from 1-D equivalent linear analysis.

Οι αποκρίσεις δυτικά, δηλαδή στην γεώτρηση Γ3, δίδουν στην επιφάνεια μέγιστη επιπλέονση $a_{max}=0.18g$, σε μία ενδιάμεση θέση, δηλαδή γεώτρηση Γ2, δίδουν $a_{max}=0.16g$ και ανατολικά, δηλαδή στην γεώτρηση Γ1, δίδουν $a_{max}=0.12g$. Τα μεγαλύτερου πάχους και "μαλακότερα" εδάφη στην θέση Γ1 επιφέρουν και τις μεγαλύτερες αποσβέσεις. Συσχετίζοντας επιπλέονσεις και μετακινήσεις υπολογίστηκε ότι θα έπρεπε οι καταστροφές να είχαν πραγματοποιηθεί στην θέση Γ3 και όχι στην θέση Γ1.

4.4 Δισδιάστατη γραμμική κυματική ανάλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών.

Σύμφωνα με αυτήν τη μέθοδο, η κυματική διάδοση μέσα σε μία δισδιάστατη εδαφική τομή, μελετάται επιλύοντας την κυματική διαφορική εξισώση. Αντιμετωπίζεται ένα χρονικά μεταβαλλόμενο πρόβλημα συνοριακών τιμών, υπερβολικής μορφής και κυματικής φύσης.

Επιλύοντας τις ελαστοδυναμικές εξισώσεις κίνησης στο επίπεδο. Προσεγγίζουμε τις διαφορικές εξισώσεις με πεπερασμένες διαφορές, που αναφέρονται σε απλά τετραγωνικά σχήματα που συνιστούν ένα

πλέγμα μέσα στην εδαφική τομή. Ετσι ένα πρόβλημα κυματικό ανάγεται σε ένα επαναληπτικό μοντέλο ακολουθίας διαφορών. Η χρονική αυτή ακολουθία διαφορών καταλήγει στη διατύπωση γραμμικών αλγεβρικών εξισώσεων για κάθε σημείο του πλέγματος και για κάθε χρονική στιγμή. Εισάγονται συνθήκες συνέχειας και ισορροπίας των τάσεων, παράμετροι υλικού, τρόποι εξασφάλισης συνθηκών συνέχειας στα όρια αποκοπής της εδαφικής τομής και επιλέγεται μοντέλο απόσβεσης (παράγοντας Q).

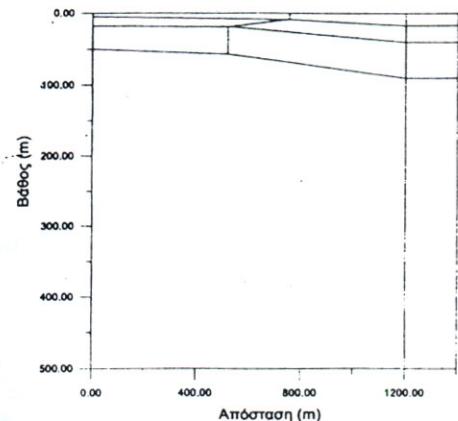
Η εδαφική τομή θεωρείται ένα "γραμμικό σύστημα" ελαστικής συμπεριφοράς με είσοδο ένα μοναδιαίο παλμό και έξοδο την απόκρισή της, ως τη συνάρτηση μεταφοράς συχνοτήτων $G(i\omega)$. Υπολογίζεται δε η τελική απόκριση ως συνέλιξη της εξισώσεως μεταφοράς με την τυχαία κυματομορφή, που είναι κάθε φορά το επιλεχθέν επιταχυνσιόγραμμα διέγερσης της εδαφικής τομής.

Χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα SHSOIL που έχει βασιστεί στον αλγόριθμο SHDIFN, Zahradnik 1995. Στο Σχ.7 παρουσιάζεται το μοντέλο και στο Σχ.8 οι συναρτήσεις μεταφοράς για την θέση Γ_3 και την θέση Γ_1 . Δεν παρατηρήθηκαν διαφορές στις ενισχύσεις μεταξύ των θέσεων Γ_1 , Γ_2 , Γ_3 . Αξίζει να σημειωθεί ότι αλλάζοντας την γωνία πρόσπωσης της διέγερσης από το υπόβαθρο προς την επιφάνεια κατά 15° παρατηρούνται ενισχύσεις στην θέση της γεωτρησης Γ_1 σε σχέση με τις θέσεις Γ_2 και Γ_3 . Αυτό σημαίνει ότι σε παρόμοια μοντέλα (Σχ.2) είσοδος κύματος με κατεύθυνση $\Delta-A$ και με γωνία $10-15^\circ$ ως προς την κατακόρυφο μπορεί να δώσει φαινόμενα εστίασης των κυμάτων με ενισχυση της κίνησης στη θέση Γ_1 .

4.5 Χρήση δισδιάστατων μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων.

Προσομοιώνεται το έδαφος με ένα ελαστικό μοντέλο επιφανειακών στοιχείων. Ο δυναμικός υπολογισμός της κίνησής του δεν είναι παρά η μελέτη κίνησης των κυμάτων μέσα σ' αυτή την "εδαφική κατασκευή".

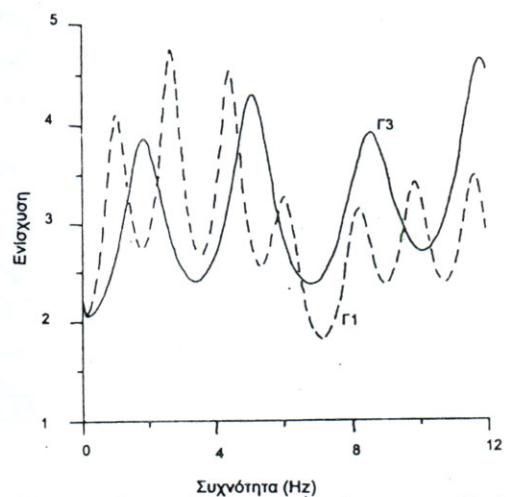
Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μια δυναμική μέθοδος ακαμψίας με σημαντική ακρίβεια. Το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε κατά τη μελέτη είναι το SCADA, με το οποίο έγινε επίλυση της τομής του Βαρθολομίου με τη χρήση στοιχείων τύπου plate ή solid.



Σχήμα 7: Μοντέλο για τη δισδιάστατη επίλυση

με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών.

Figure 7: Model used in the 2-D analysis with the finite difference method.

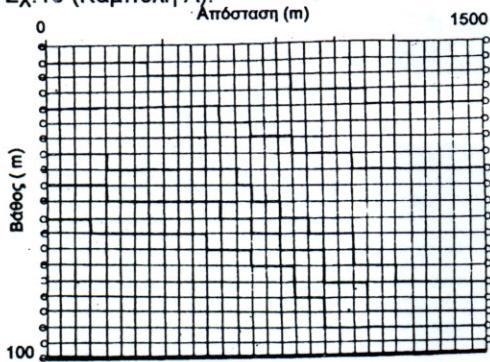


Σχήμα 8: Συναρτήσεις μεταφοράς με την μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών στις θέσεις Γ_1 και Γ_3 .

Figure 8: Transfer functions using the finite difference method at Γ_1 and Γ_2 sites.

Για την εξασφάλιση της συνέχειας του μέσου, χρησιμοποιήθηκαν, ομοιόμορφη επέκταση του μοντέλου στα κατακόρυφα άκρα και κατάλληλοι αποσβεστήρες, καθώς και μοντέλο άκαμπτης κινηματικής βάσης. Όλα τα μοντέλα ήταν του τύπου Σχ.9, αλλά με διαφορετικό αριθμό στοιχείων.

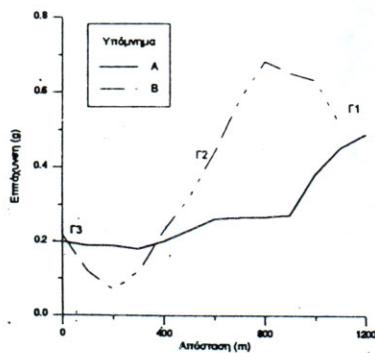
Μοντέλο με 6600 κόμβους, διαστάσεων στοιχείου $10 \times 2m^2$ επιλύθηκε με τη μέθοδο της δυναμικής φασματικής ανάλυσης (ιδιομορφών) με κίνηση οριζόντια x-x και ταυτόχρονα με κίνηση κατακόρυφη y-y με ποσοστό 60% της οριζόντιου στην άκαμπτη βάση, τα αποτελέσματα συνοπτικά παρουσιάζονται στο Σχ.10 (Καμπύλη A).



Σχήμα 9: Μοντέλο για την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

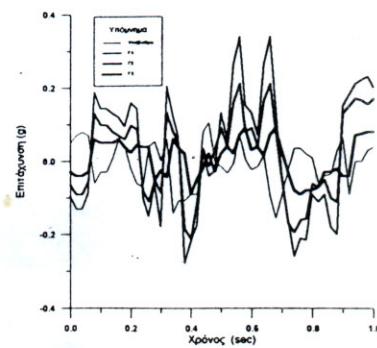
Figure 9: Finite element model.

Επιλύθηκε επίσης το μοντέλο του Σχ.9 με στοιχεία plate διαστάσεων $50 \times 5m^2$, 651 κόμβοι, με την προηγούμενη μέθοδο, τα αποτελέσματα συνοπτικά παρασιάζονται στο Σχ.10 (Καμπύλη B). Με την μέθοδο της χρονοανάλυσης των ιδιομορφών διεγέραμε το μοντέλο με σεισμό διάρκειας 1sec, για τον χρόνο εμφάνισης της μέγιστης επιτάχυνσης, τα επιταχυνσιογράμματα για τις θέσεις Γ1, Γ2, Γ3 καθώς και η διέγερση δείχνονται στο Σχ.11



Σχήμα 10: Μέγιστες επιταχύνσεις με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

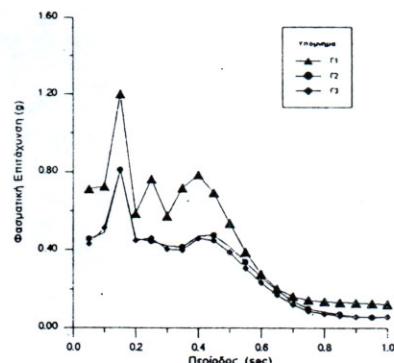
Figure 10: Maximum accelerations using the finite element method.



Σχήμα 11: Εδαφικές κινήσεις διάρκειας 1sec από την επίλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Figure 11: Surface motions 1sec duration using the finite element method.

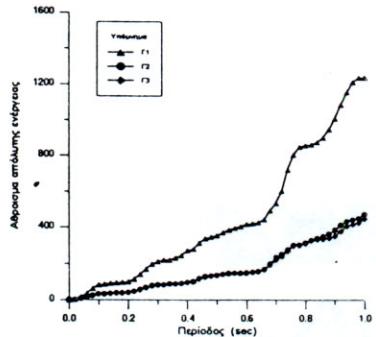
Στο Σχ.12 παρουσιάζονται οι τιμές των φασματικών επιταχύνσεων που προέκυψαν από την ανάλυση με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για περίοδο 0-1sec. Παρατηρούμε ότι έχουμε μεγαλύτερες ενισχύσεις στη θέση Γ1. Στην ενίσχυση των επιταχύνσεων μεταξύ των περιόδων 0.10 και 0.20 sec οφείλονται οι καταστροφές των κατασκευών διότι αυτή ακριβώς είναι και η κύρια ιδιοπερίοδος των κατασκευών στην πόλη του Βαρθολομείου.



Σχήμα 12: Φασματικές επιταχύνσεις στις θέσεις Γ1, Γ2, Γ3 με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Figure 12: Spectral acceleration for Γ1, Γ2, Γ3 sites, results from finite elements analysis.

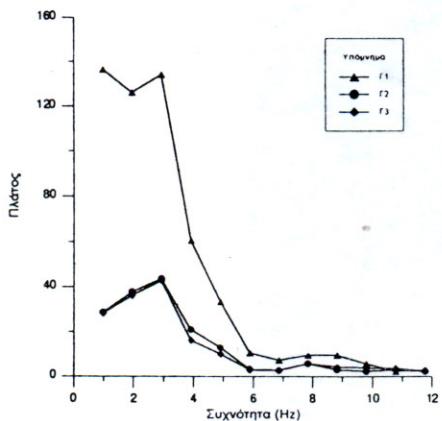
Το Σχ.12 εξηγεί την έκταση των ζημιών στις δύσκαμπτες κατασκευές της θέσης Γ1.



Σχήμα 13: Αθροιστικές καμπύλες απόλυτης ολικής ενέργειας (μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων).

Figure 13: Sum of absolute total energy (finite element method).

Από το Σχ.13 σε συνδυασμό με το Σχ.14 προκύπτει ότι είχαμε περίπου τριπλάσια ποσότητα σεισμικής ενέργειας στη θέση Γ1 σε σχέση με τις θέσης Γ2, Γ3 για ιδιοπεριόδους που είναι κοντά στην ιδιοπερίοδο των κατασκευών.



Σχήμα 14: Φάσμα ισχύος ενέργειας.

Figure 14: Power spectrum of energy.

Σεισμοί μικρής εστιακής απόστασης 5-15km φτάνουν σε κοντινές αποστάσεις με πλούσιο συχνοτικό περιεχόμενο και τα μαλακά εδάφη δείχνουν γεωτεχνική συμπεριφορά η οποία επιφέρει καταστροφές στις κατασκευές ακόμη και στις πλέον δύσκαμπτες (μεγάλες επιταχύνσεις και μετακινήσεις) σε αντίθεση με τα σκληρότερα εδάφη που συμπεριφέρονται καλύτερα.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Αθανασόπουλος Γ. (1995). Σεισμική απόκριση εδαφών σε Πάτρα, Αίγιο, Βαρθολομιό, Ενημερωτικό Δελτίο ΤΕΕ.
- Γκαζέτας, Γ., & Μπουκοβάλας Γ. (1995) Ανάλυση επίδρασης τοπικών εδαφικών συνθηκών και ρευστοποίησης, Μικροζωνική μελέτη Πύργου. ΕΜΠ.
- Idriss I.M. and Sun J. (1992). SHAKE91: A computer program for conducting Equivalent Linear Seismic Response Analyses of Horizontally Layered Soil Deposits, User's manual, 30pp.
- Λέκκας, Ε. (1992). Ο ρόλος των γεωλογικών και των γεωτεχνικών συνθηκών στην κατανομή και το μέγεθος των καταστροφών σε οικιστικές μονάδες και τεχνικά έργα του Νομού Ηλείας κατά το σεισμό της 16.10.1988. 1ο Ελληνικό Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής και Τεχνικής Σεισμολογίας, 43 - 54.
- Λέκκας, Ε., Παπανικολάου, Δ. & Φουντούλης, Ι. (1992). Εκπόνηση Νεοτεκτονικού χάρτη της Ελλάδας, Φύλλα «ΠΥΡΓΟΣ - ΤΡΟΠΑΙΑ» (κλίμακα 1:100.000). Ερευνητικό Πρόγραμμα, Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τομέας Δυναμικής Τεκτονικής Εφαρμοσμένης Γεωλογίας, 120σ.
- Lysmer J., Uda T., Bolton Seed H., Hwang R., «LUSH 2», California 1974.
- Tselentis, G-A., Vasiliou, I., Sokos, E., Tsarpalis, P. and Roubas, D. (1995). Reassessment of the intensity of strong motions experienced during the Vartholomio (W.Greece) 1988 earthquake, Proc. 5th Intern. Conf. On Seismic Zonation, October 17-19, Nice, France, II, 1165-1172
- Tselentis, G-A., Sokos, E., Vasiliou, I., Kalteziotis, N., and Roubas, D. (1994). Site conditions and site response at Dafnes, W.Greece during Pyrgos March 1993 earthquake sequence, Proc. Earth.Resist. Constr. & Design, June 15-17, Berlin, Germany, 117-126.
- Zahradník J. and Priolo E. (1995) Heterogeneous formulations of elastodynamic equations and finite-difference schemes, Geophys. J. Int., 120, 663-676.