

# Δυναμική ελαστοπλαστική ανάλυση της συμπεριφοράς του πρανούς του Αιγίου κατά τον σεισμό του 1995

## Dynamic elastoplastic analysis of the response of the Aigion slope at the earthquake of 1995

ΜΠΑΣΑΝΟΥ Μ  
ΣΤΑΜΑΤΟΠΟΥΛΟΣ Κ.  
ΠΟΓΙΑΤΖΗ Ε.  
ΚΥΝΗΓΑΛΑΚΗ Μ.

Δρ. Μεταλλειολόγος Μηχανικός, Σταματόπουλος και Συνεργάτες ΕΠΕ  
Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Σταματόπουλος και Συνεργάτες ΕΠΕ  
Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών  
Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ :** Στην παρούσα εργασία περιγράφονται οι σοβαρές βλάβες σε τρεις κατασκευές κοντά στο όριο του ανατολικού άκρου της βαθμίδας του πρανούς κατά την διάρκεια της σεισμικής δόνησης του 1995 στην πόλη του Αιγίου. Ο ρόλος της τοπογραφίας στις συγκεκριμένες ζημιές μελετάται με αριθμητική ελαστο-πλαστική δυναμική προσομοίωση. Οι εδαφικές παράμετροι ελήφθησαν από την διεξαχθείσα γεωτεχνική έρευνα. Τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης έδειξαν ότι κοντά στη στέψη του πρανούς, αναπτύχθηκαν υψηλές σεισμικές επιταχύνσεις μαζί με σημαντικές παραμένουσες μετακινήσεις λόγω της σεισμικής δράσης. Μακριά από την βαθμίδα, οι επιταχύνσεις και καθιζήσεις ήταν μικρότερες.

**ABSTRACT :** The severe damage of three structures located near the crest of the eastern part of the Aegion slope during the Aegion 1995 earthquake is described. The role that topography played on the damage of these structures is illustrated by dynamic elasto-plastic analysis. The soil parameters were obtained from in-situ geotechnical testing. The results of the numerical analysis showed the amplification of the acceleration and some ground settlement near the crest of the slope. Far from the slope crest, the computed amplification of the acceleration and the ground settlement were less.

### 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η δυναμική συμπεριφορά του Δυτικού και Κεντρικού τμήματος του πρανούς του Αιγίου κατά τη διάρκεια του σεισμού του 1995 έχει μελετηθεί από αρκετούς ερευνητές (Athanasopoulos et al, 1999, Bouckovalas et al, 1999). Η κατάρρευση κτιρίων στην περιοχή κοντά στη στέψη καθώς και οι σοβαρές ζημιές που παρατηρήθηκαν συνδυάστηκαν με την ενίσχυση της σεισμικής επιτάχυνσης κοντά στη στέψη του πρανούς η οποία είναι αποτέλεσμα της επιρροής της τοπογραφίας.

Η παρούσα μελέτη εξετάζει την Ανατολική πλευρά του πρανούς όπου βρίσκεται ο ιερός ναός της Εισόδου της Θεοτόκου. Σε αυτή την περιοχή, μία σειρά από κτίρια συμπεριλαμβανομένης και της εκκλησίας υπέστησαν σοβαρές βλάβες. Πιο συγκεκρι-

μένα, ένα τετραώροφο κτίριο από οπλισμένο σκυρόδεμα θεμελιωμένο σε μεμονωμένα πέδιλα, το οποίο απέχει 10-25 m από τη στέψη του πρανούς και ήταν υπό κατασκευή, μετά το σεισμό χρειάστηκε σοβαρές επισκευές καθώς και εργασίες στατικής ενίσχυσης. Επίσης ένα διώροφο οικοδόμημα ηλικίας περίπου 70 ετών σε απόσταση 20-30 m από τη στέψη υπέστη τόσο σοβαρές ρωγμές στα τοιχεία του, ώστε να καταστεί μη κατοικήσιμο μετά το σεισμό. (Σχ. 1). Τέλος, ο παλαιός και ιστορικής σημασίας ιερός ναός της Εισόδου της Θεοτόκου, περίπου 50-70 m από τη στέψη του πρανούς υπέφερε επίσης πολύ σοβαρές ζημιές όπως ρωγμές οι οποίες σχηματίστηκαν διαμέσου των πλίνθων της τοιχοποιίας και σχετίζονται με τη σχετική οριζόντια μετατόπιση που σε κάποιες περιοχές ξεπέρασε τα 5cm (Σχ. 2). Εξαιτίας της μνημειακής της αξίας η εν λόγω εκκλησία δεν κατεδαφίστηκε. Αντιθέτως ξεκίνησαν εργασίες αποκατάστασης.

Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να εξετάσει τον ρόλο που έπαιξε η τοπογραφία στις βλάβες που υπέστησαν τα τρία προαναφερόμενα οικοδομήματα κατά τη διάρκεια του σεισμού του Αιγίου το 1995.

Η αριθμητική ανάλυση του προβλήματος πραγματοποιήθηκε με την ελαστοπλαστική μέθοδο. Η μέθοδος επαληθεύτηκε με πρόβλεψη δοκιμής στον φυγοκεντρική (Μπασάνου και Σταματόπουλος, 2006). Εν αντιθέσει, οι προγενέστερες αναλύσεις ήταν ισοδύναμες-γραμμικές. Η ισοδύναμη δυναμική γραμμική μέθοδος έχει το μειονέκτημα ότι δεν μπορεί να προβλέψει τις μόνιμες μετακινήσεις που αναπτύσσονται σε ορισμένες περιπτώσεις κοντά στο πρανάς.

## 2. ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑ - ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Η τοπογραφία του Ανατολικού τμήματος του πρανούς του Αιγίου μελετήθηκε από το ΙΓΜΕ. Επειδή στην Ανατολική πλευρά του πρανούς του Αιγίου η διεύθυνση του πρανούς αλλάζει, η γεωμετρία είναι πραγματικά τριδιάστατη. Το Σχ. 3 δίνει μία διδιάστατη προσέγγιση.

Γεωτρήσεις και δοκιμές κατάταξης εκτελέστηκαν επίσης από το ΙΓΜΕ. Πιεζόμετρα έδειξαν την στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα σε βάθος περίπου 40m κάτω από την κορυφή του πρανούς και 5m κάτω από την βάση του. Η γεωτεχνική στρωματογραφία κάτω από την κορυφή του πρανούς περιλαμβάνει έδαφος μέχρι το βάθος των 32m, το οποίο είναι άργιλος μικρής πλαστικότητας, εκτός από μία στρώση από επιχώσεις που έχει βάθος 3 m. Κάτω από την βάση του πρανούς η αργιλική στρώση φτάνει σε βάθος 20m.

Οι παράμετροι αντοχής του εδάφους ( $\phi$  και  $c$ ) ελήφθησαν από εργαστηριακές δοκιμές που εκτελέστηκαν στο εργαστήριο της Σταματόπουλος και Συνεργάτες ΕΠΕ στα δείγματα των παραπάνω γεωτρήσεων. Δοκιμές κατάταξης έδειξαν μέση τιμή του δείκτη πλαστικότητας ( $PI$ ) ίση με 7 για την στρώση επίχωσης και μέση τιμή του δείκτη πλαστικότητας ( $PI$ ) ίση με 10 για την υποκείμενη αργιλική στρώση. Τριαξονικές δοκιμές υπό πλήρη στράγγιση έδωσαν παραμέτρους αντοχής για την άνω στρώση επίχωσης  $\phi=34^\circ$ ,  $c=45kPa$  και για την υποκείμενη αργιλική στρώση  $\phi=35^\circ$ ,  $c=30kPa$ .



Σχήμα 1. Ρωγμές σε παλαιό κτίριο στο Αίγιο λόγω του σεισμού του 1995 (φωτογραφία του Κ. Σταματόπουλου στις 24/4/04).

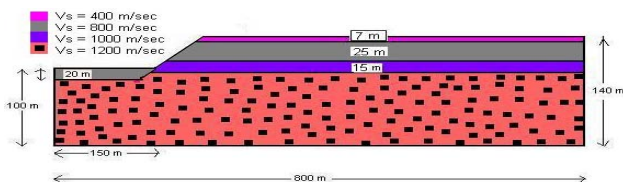
Figure. 1. Cracks in the walls of the old house induced by the 1995 Aegion earthquake in the eastern part of the Aegion slope. (photo by C. Stamatopoulos, 24/4/04).



Σχήμα 2. Ζημιές στον ιερό ναό της Εισόδου της Θεοτόκου στο Αίγιο λόγω του σεισμού του 1995 (φωτογραφία του Κ. Σταματόπουλου στις 24/4/04).

Figure. 2. General view of the church of Presentation of the Virgin and relative displacement of bricks induced by the 1995 Aegion earthquake in the eastern part of the Aegion slope. (photo by C. Stamatopoulos, 24/4/04).

Επίσης στην ευρύτερη περιοχή έχουν εκτελεσθεί γεωφυσικές έρευνες και από άλλους ερευνητές (Bouckonvalas et al, 1999, Athanasopoulos et al, 1999). Βάσει των παραπάνω, η τοπογραφία του πρανούς και η μεταβολή της ταχύτητας Vs, στην υπό εξέταση περιοχή δίδονται στο Σχ. 3.



Σχήμα 3. Τοπογραφία και στρωματογραφία του ανατολικού άκρου του πρανούς του Αιγίου  
Figure 3. Site topography and Vs profile used in the analyses

### 3. ΤΟ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Ο αριθμητικός κώδικας πεπερασμένων διαφορών FLAC (Itasca, Consultants, 2002) χρησιμοποιήθηκε στις αριθμητικές αναλύσεις. Ο λόγος είναι ότι αυτός ο κώδικας μπορεί να εκτελέσει 2-διάστατες δυναμικές αναλύσεις μεγάλων καννάβων προσομοιώνοντας το έδαφος τόσο με ελαστικά όσο και με ελαστοπλαστικά μοντέλα σε μικρό σχετικά χρόνο.

Γίνεται χρήση του ελαστικο-πλαστικού μοντέλου κράτυνσης-χαλάρωσης της παραμόρφωσης, όπου η γωνία τριβής και η γωνία διασταλτικότητας ορίζονται συναρτήσει της πλαστικής παραμόρφωσης.

Στις περιπτώσεις που εξετάζονται, ο υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται σε σημαντικό βάθος. Άρα, υπάρχουν συνθήκες πλήρους στράγγισης. Επιπροσθέτως, κατά την διάρκεια των σεισμών, ασκείται κυρίως φόρτιση σε διάτμηση. Άρα, προσεγγιστικά αρκεί να περιγραφεί η συμπεριφορά υπό συνθήκες πλήρους στράγγισης σε διάτμηση.

Ελαστο-πλαστικές σχέσεις που προβλέπουν αυτήν την συμπεριφορά, και τυπικές τιμές των παραμέτρων των σχέσεων συναρτήσει του τύπου του εδάφους δίδονται από τους Aubry et al (1993) και Modaressi and Lopez-Caballero (2001). Οι σχέσεις βασίζονται στην θεωρία της κρίσιμης κατάστασης. Ειδικότερα, προτείνονται σχέσεις που σε απλοποιημένη μορφή μπορούν να εκφραστούν ως

$$\tau/\sigma' = F \tan \phi_{cs} \gamma^p / ([\tan \phi_{cs}/E_p] + \gamma^p)^{0.5} \quad (1)$$

όπου  $\tau$  και  $\sigma'$  είναι η διατμητική και ορθή τάση σε επιφάνεια διάτμησης,

$$F = 1 - b \ln (\sigma'/\sigma'_{co})$$

$$\sigma'_{co} = \sigma_{co} \exp (-\beta \varepsilon_v^p)$$

Η πλαστική ογκομετρική παραμόρφωση ( $\varepsilon_v^p$ ) συνδέεται με την διατμητική  $\gamma^p$  ως

$$d\varepsilon_v^p = d\gamma^p (\tan \phi_{cs} + \tau/\sigma') \quad \text{για } \gamma^p > \gamma_{mob} \quad (2)$$

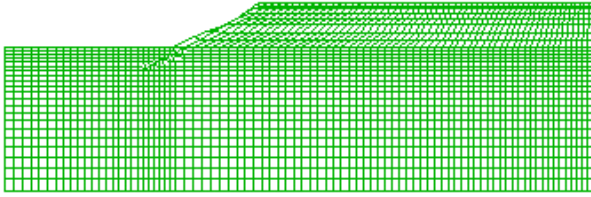
Το μοντέλο έχει έξι παραμέτρους:  $\phi_{cs}$ ,  $\sigma_{co}$ ,  $E_p$ ,  $b$ ,  $\beta$ ,  $\gamma_{mob}$ . Η παράμετρος  $\phi_{cs}$  είναι η γωνία τριβής στην κρίσιμη κατάσταση (δηλαδή σε τεράστια παραμόρφωση) και  $\sigma'_{co}$  είναι η ενεργός ορθή τάση στην κρίσιμη κατάσταση στην αρχική πυκνότητα του εδάφους. Η παράμετρος  $\gamma_{mob}$  είναι η ελάχιστη πλαστική διατμητική παραμόρφωση κατά την οποία αρχίζει η πλαστική ογκομετρική παραμόρφωση. Οι παράμετροι προσαρμογής  $E_p$ ,  $b$ ,  $\beta$  είναι αδιάστατοι και εξαρτώνται μόνον από τον τύπο του εδάφους.

Οι Modaressi and Lopez-Caballero (2001) δίδουν τυπικές τιμές των έξι παραμέτρων του μοντέλου συναρτήσει της πυκνότητας της άμμου και του δείκτη πλαστικότητας ( $I_p$ ) και λόγου του προστερεοποίησης (OCR) της αργίλου (πίνακας 1). Οι Modaressi and Lopez-Caballero (2001) δείχνουν ότι οι παραπάνω σχέσεις και παράμετροι προβλέπουν (α) την επίδραση της πυκνότητας στην συμπεριφορά της άμμου (βάσει του συντελεστού F) και (β) την μείωση του «ισοδύναμου» μέτρου διάτμησης με την ασκούμενη διατμητική παραμόρφωση συναρτήσει του δείκτη πλαστικότητας (PI) του εδάφους, όπως προβλέπεται από τις σχέσεις των Ishibashi and Zhang (1993).

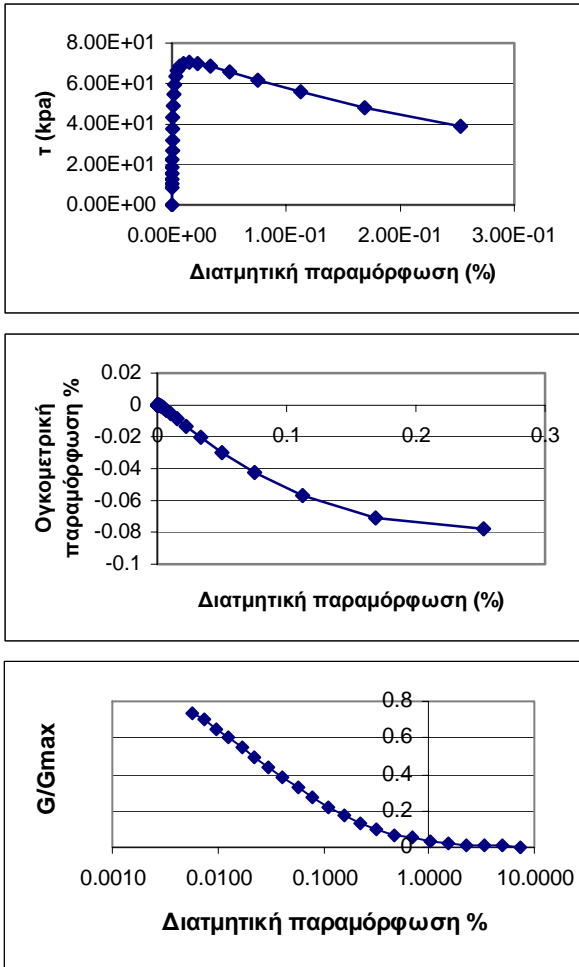
Η σχέση μεταξύ της γωνίας τριβής και της μεταβολής του όγκου και της πλαστικής διατμητικής παραμόρφωσης προσδιορίστηκε από τις σχέσεις (1) και (2) συναρτήσει της οκταεδρικής τάσης και των παραμέτρων του εδάφους.

### 4. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

Η αριθμητική προσομοίωση έγινε από την Σταματόπουλος και Συνεργάτες ΕΠΕ. Η γεωμετρία που θεωρήθηκε δίδεται στο Σχ. 3. και εκτείνεται οριζόντια 600m από την άκρη του πρανούς για να προσομοιώσει το μονοδιάστατο οριζόντιο έδαφος μακριά από το πρανός. Θεωρούνται συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης.



Σχήμα 4. Κάνναβος που χρησιμοποιήθηκε στις αναλύσεις.  
Figure 4. The mesh that was used in the analyses



Σχήμα 5: Προβλέψεις του μοντέλου με τις προτεινόμενες παραμέτρους του μοντέλου. Εξετάζεται η περίπτωση της αργιλικής στρώσης με  $\sigma=140\text{kPa}$ .  
Figure 5. Predictions of the model with the proposed model parameters. The case of the bottom clay layer at  $\sigma=140\text{kPa}$  is presented.

Διαφορετικοί κάνναβοι χρησιμοποιήθηκαν για να επαληθευθούν τα αποτελέσματα. Στις αναλύσεις που παρουσιάζονται, ο κάνναβος έχει διαφορετική πύκνωση κοντά στην άκρη του πρανούς και αποτελείται από περίπου 2000 στοιχεία (Σχ.4). Η κατακόρυφη διάσταση

του προβλήματος είναι μικρότερη από 2m, δηλαδή μικρότερη από το 10% του ελάχιστου μήκους κύματος που αναμένεται να ασκηθεί στην ανάλυση, που είναι περίπου 40m.

Στα όρια του κανάβου ασκούνται συνοριακές συνθήκες ελεύθερου πεδίου ('Free Field'). Αυτές οι συνθήκες ορθώς δεν επιτρέπουν την ανάκλαση των κυμάτων καθώς αυτά απομακρύνονται.

Σύμφωνα με το Σχ. 3 ελήφθησαν 5 διαφορετικές υποστρώσεις: η άνω επίκωση, δύο υποστρώσεις για την υποκείμενη αργιλική στρώση με διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας και δύο υποστρώσεις για τον υποκείμενο μαλακό βράχο με διαφορετικές ιδιότητες.

Επίσης, σύμφωνα με την συνήθη πρακτική, χρησιμοποιήθηκε λόγος Poisson ίσος με 0.3. Στις άνω δύο στρώσεις χρησιμοποιήθηκε το ελαστο-πλαστικό μοντέλο που περιγράφηκε στην ενότητα 3.

Στις υπόλοιπες στρώσεις, επειδή η παραμόρφωση είναι μικρή, χρησιμοποιήθηκε ελαστικό μοντέλο.

Ο πίνακας 1 δίδει τις τιμές του ελαστο-πλαστικού μοντέλου των σχέσεων (1) και (2) που επιλέχθηκαν για τις αριθμητικές αναλύσεις των άνω δύο στρώσεων. Οι τιμές των παραμέτρων  $\phi_{cs}$ ,  $\beta$ ,  $E_p$ ,  $\gamma_{mob}$ ,  $b$  είναι παρόμοιες με αυτές που προτείνονται από τους Modaressi and Lopez-Caballero (2001). Η τιμή του  $\sigma'_{co}$  υπολογίζει την μέγιστη αντοχή του εδάφους που μετρήθηκε στις τριαξονικές δοκιμές συναρτήσει της ασκούμενης τάσης. Το Σχ. 5 δίδει προβλέψεις του μοντέλου με τις προτεινόμενες παραμέτρους.

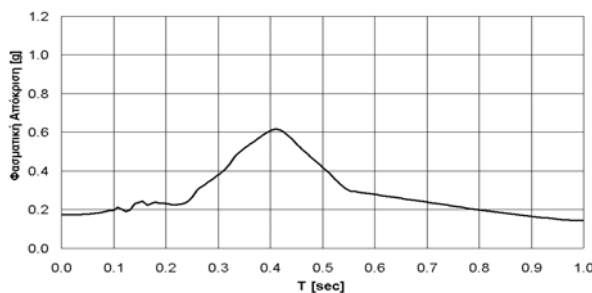
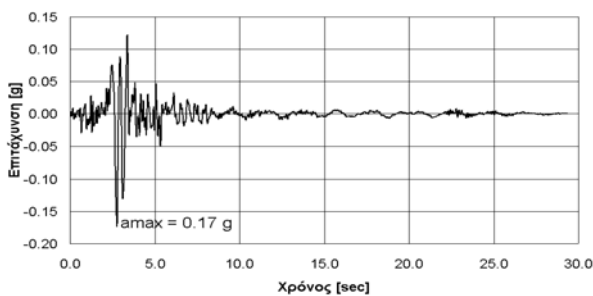
Εξετάζεται η περίπτωση της αργιλικής στρώσης με  $\sigma'=140\text{KPa}$ .

Μπορεί να παρατηρηθεί ότι το μοντέλο και οι παράμετροι που επιλέχθηκαν προβλέπουν (α) την μετρηθείσα μέγιστη αντοχή, (β) την μετρηθείσα μείωση της αντοχής με την παραμόρφωση μετά την μέγιστη αντοχή (soil softening) με την αντίστοιχη διόγκωση και (γ) την μείωση του ισοδύναμου μέτρου διάτμησης με την ασκούμενη διατμητική παραμόρφωση όπως προβλέπεται π.χ. από τις σχέσεις των Ishibashi and Zhang (1993), συναρτήσει του δείκτη πλαστικότητας του εδάφους.

Για αυτές τις παραμέτρους του εδάφους και την ασκούμενη τάση ανά στρώση, υπολογίσθηκαν οι σχέσεις μεταξύ (α) της γωνίας τριβής και (β) της γωνίας διασταλτικότητας με την πλαστική διατμητική παραμόρφωση που προβλέπονται από τις σχέσεις (1) και (2).

Πίνακας 1. Οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στις αριθμητικές αναλύσεις.  
Table 1. The values of the elasto-plastic model parameters used in the numerical studies.

Στρώση	Επίχωση (βάθος 0 έως 2m κάτω από την κορυφή του πρανούς)	Άργιλος
$\varphi_{cs}$ [°]	30	30
$\beta$	23	23
$\sigma_{co}$	250 kPa	400 kPa
$E_p$	220 kPa	220 kPa
$\gamma_{mob}$	$10^{-3}$	$10^{-3}$
$b$	1.0	1.0



Σχήμα 6. Η επιτάχυνση που ασκήθηκε στην βάση του καννάβου.

Figure 6. Input acceleration at the base of the mesh.

## 5. ΑΣΚΟΥΜΕΝΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ - ΑΠΟΣΒΕΣΗ

Παρόμοια με προηγούμενες αναλύσεις του πρανούς του Αιγίου (Athanasopoulos et al, 1999) (α) κατ'αρχάς μόνον η οριζόντια συνιστώσα της σεισμικής διέγερσης θεωρείται και (β) η εισαγόμενη κίνηση στους υπολογισμούς βασίζεται στο επιταχυνσιογράφημα που μετρήθηκε κατά την διάρκεια του σεισμού του 1995 στο υπόγειο του κτιρίου του ΟΤΕ (που δίδεται από τους Bouckovalas et al, 1999). Η επιτάχυνση που ασκείται στη βάση του καννάβου πρέπει να είναι τέτοια ώστε με την 2-διάστατη διάδοση να

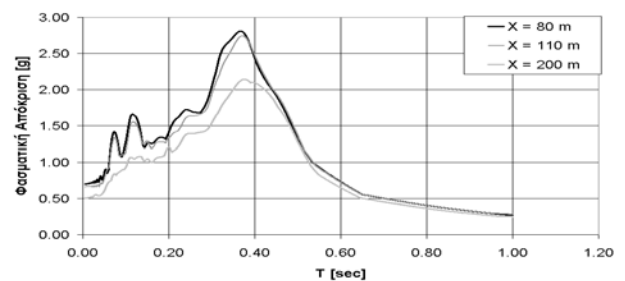
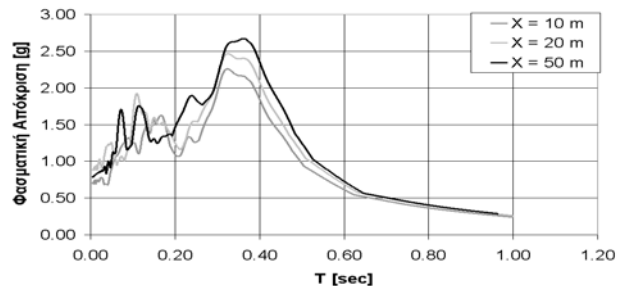
παράγει στη θέση ΟΤΕ επιτάχυνση παρόμοια με αυτή που μετρήθηκε κατά τον σεισμό του 1995. Μιάς και η θέση ΟΤΕ βρίσκεται σε απόσταση περίπου 200m από την στέψη του πρανούς, θεωρείται ότι η συμπεριφορά είναι περίπου μονοδιάστατη. Άρα η επιτάχυνση που ασκείται στη βάση του καννάβου μπορεί να εκτιμηθεί με μονοδιάστατη ανάδρομη ανάλυση (deconvolution).

Βάσει των παραπάνω, η κίνηση εκτιμήθηκε με μονοδιάστατη ανάδρομη ανάλυση (deconvolution) με τον κώδικα CYBERQUAKE (BRGM software, 1998). Η επιτάχυνση που παρήχθη στη βάση του καννάβου δίδεται στο Σχ. 6.

Χρησιμοποιήθηκε απόσβεση Rayleigh με συντελεστή 7%. Αυτή η απόσβεση δίδει την μέγιστη επιτάχυνση που μετρήθηκε στην επιφάνεια στην θέση του κτιρίου του ΟΤΕ.

## 6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

Οι αριθμητικές αναλύσεις εκτελέστηκαν σε δύο στάδια: Πρώτα ασκήθηκε η βαρύτητα και υπολογίστηκαν οι τάσεις λόγω ιδίου βάρους. Μετά ασκήθηκε στην βάση του καννάβου ο σεισμός του Σχ. 6. Το Σχ. 7 δίδει τα υπολογισθέντα φάσματα επιτάχυνσης στην κορυφή σε αποστάσεις 10m, 20m, 50m, 80m, 110m και 200m από την στέψη του πρανούς.



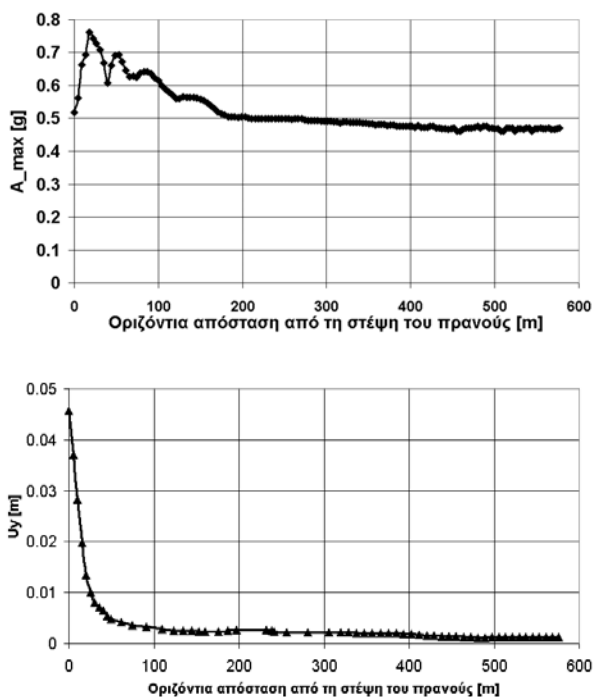
Σχήμα 7. Φάσματα επιτάχυνσης (α) 10m, 20m και 50m και (β) 80m, 110m και 200m από την στέψη του πρανούς

Figure 7. Computed response spectra (a) at locations 10m, 20m and 50m and (b) at 80m,

110m and 200m from the tip of the slope.

Το Σχ. 8 δίδει τις υπολογισθείσες μέγιστες οριζόντιες επιταχύνσεις και τελικές καθιζήσεις στην ελεύθερη επιφάνεια του πρσανούς συναρτήσει της οριζόντιας απόστασης από την στέψη του πρσανούς.

Το Σχ. 9 δίδει την υπολογισθείσα τελική οριζόντια μετακίνηση του πρσανούς. Παρατηρείται ότι στα όρια της βαθμίδας του πρσανούς αναπτύχθηκαν υψηλές σεισμικές επιταχύνσεις μαζί με σημαντικές παραμένουσες μετακινήσεις λόγω της σεισμικής δράσης.



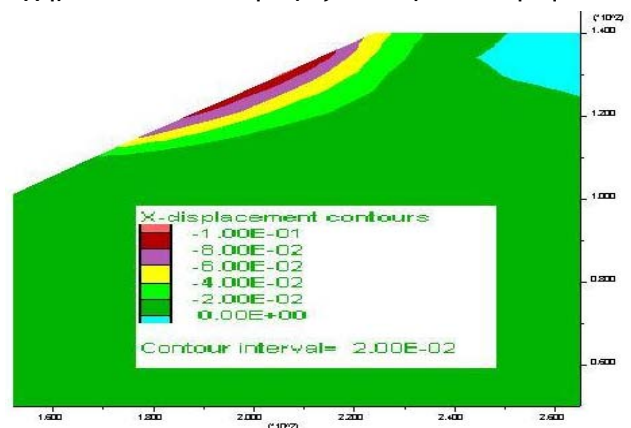
Σχήμα 8: Υπολογισθείσες (α) μέγιστες επιταχύνσεις και (β) τελικές καθιζήσεις στην κορυφή του πρσανούς

Figure 8. Computed (a) maximum horizontal accelerations and (b) final settlements (in m) in terms of horizontal distance from the toe of the slope

## 7. ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Από το Σχ. 8 γίνεται φανερό ότι για οριζόντια απόσταση μεγαλύτερη από 150m από τη στέψη του πρσανούς, η οριζόντια επιτάχυνση και η καθίζηση δεν μεταβάλλονται. Ετσι, εξετάζοντας την φασματική απόκριση της επιτάχυνσης στο Σχ. 7, μπορεί να υποτεθεί ότι

Σχήμα 9. Η τελική οριζόντια μετακίνηση του



πρσανούς.

Figure 9. Final horizontal settlement of the slope.

σε μία οριζόντια απόσταση 200m από τη στέψη, το φάσμα αντιστοιχεί στο φάσμα μονοδιάστατης απόκρισης στην επιφάνεια του εδάφους.

Στον Πίνακα 2 δίνονται στοιχεία και συγκρίσεις των χαρακτηρισικών της σεισμικής κίνησης σε  $T=0.2s$  και  $T=0.4s$ , για αποστάσεις 10m, 20m, 50m, 80m, 110m και 200m από τη στέψη του πρσανούς. Ακόμη σε σχέση με την μονοδιάστατη φασματική απόκριση, η μέγιστη επιτάχυνση και η καθίζηση είναι μεγαλύτερες κοντά στην στέψη του πρσανούς.

Ιδιαίτερα, στη θέση όπου βρίσκεται το τετραώροφο κτίριο από οπλισμένο σκυρόδεμα (10-20m από τη στέψη), η κρίσιμη ιδιοπερίοδος της κατασκευής προσεγγιστικά συμπίπτει με την περίοδο όπου η φασματική απόκριση είναι μέγιστη. Σε αυτή την περίοδο, η φασματική επιτάχυνση είναι μεγαλύτερη από την φασματική επιτάχυνση της μονοδιάστατης περίπτωσης κατά περίπου 15%. Επιπλέον σε αυτή τη θέση συσσωρεύεται και αξιοσημείωτη καθίζηση (3cm) η οποία μπορεί να προκαλέσει πρόσθετες βλάβες, κυρίως επειδή το κτίριο εδράζεται σε μεμονωμένα πέδιλα.

Στη θέση του διώροφου παλαιού κτιρίου, στα 20-30m από την στέψη του πρσανούς και για περιόδους  $T=0.1$  sec έως  $T=0.3$ sec η φασματική επιτάχυνση είναι μεγαλύτερη κατά 20% περίπου από την φασματική επιτάχυνση μακριά από την στέψη. Εάν ληφθεί υπόψιν ότι το παραπάνω εύρος της περιόδου αντιστοιχεί χονδρικά στις περιόδους συντονισμού του εν λόγω κτιρίου, τότε είναι φανερό ότι η προαναφερόμενη παρατήρηση παίζει σημαντικό ρόλο. Επιπλέον στην ίδια θέση συσσωρεύονται καθιζήσεις 2cm. Αυτό ίσως να προκάλεσε πρόσθετη ζημιά.

Τέλος, στην θέση του ιερού ναού της Εισόδου της Θεοτόκου, περίπου 50-70m από τη στέψη του πρανούς όταν  $T=0.2$  έως  $0.4s$  η φασματική απόκριση είναι περίπου μεγαλύτερη κατά 30% από την φασματική επιτάχυνση μακριά από την στέψη. Εάν ληφθεί υπόψιν ότι το παραπάνω εύρος της περιόδου αντιστοιχεί στις περιόδους συντονισμού του εν λόγω κτιρίου, τότε είναι φανερό ότι η προαναφερόμενη παρατήρηση παίζει σημαντικό ρόλο.

Όλα τα παραπάνω εξηγούν την επίδραση της τοπογραφίας στις μεγάλες ζημιές που παρατηρήθηκαν στην Ανατολική περιοχή του πρανούς του Αιγίου κατά την διάρκεια του σεισμού του 1995.

Πίνακας 2. Υπολογισθείσα τελική καθίζηση, μέγιστη επιτάχυνση ( $a_{max}$ ) και φασματική επιτάχυνση, συναρτήσει της απόστασης από την άκρη του πρανούς.  
Table 2. Computed final settlement, maximum acceleration ( $a_{max}$ ) and spectral response in terms of distance from the toe of the slope.

x=	Τελική Καθίζηση (m)	$a_{max}$ (g)	$A_{όταν}$ $T=0.2s$ (g)	$A_{όταν}$ $T=0.3s$ (g)
200m	0.002	0.51	1.2	2.0
110m	0.003	0.58	1.4	2.6
80m	0.003	0.64	1.5	2.6
50m	0.005	0.70	1.5	2.6
20m	0.01	0.76	1.2	2.5
10m	0.03	0.66	1.1	2.2

## 8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Κατά την διάρκεια της σεισμικής δόνησης του 1995 στην πόλη του Αιγίου, παρατηρήθηκαν σοβαρές βλάβες σε τρεις κατασκευές κοντά στα όρια του ανατολικού άκρου της βαθμίδας του πρανούς. Για την διερεύνηση των πιθανών αιτίων των συγκεκριμένων αστοχιών κατά την διάρκεια του σεισμού του 1995, πραγματοποιήθηκε γεωτεχνική και τοπογραφική έρευνα καθώς και αριθμητική δυναμική προσομοίωση.

Τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης έδειξαν ότι στα όρια της βαθμίδας του πρανούς, αναπτύχθηκαν υψηλές σεισμικές επιταχύνσεις μαζί με σημαντικές παραμένουσες μετακινήσεις λόγω της σεισμικής δράσης. Οι δύο αυτοί παράγοντες

εκτιμάται ότι είχαν σημαντική συνεισφορά στις βλάβες των κτιρίων.

## 9. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι παραπάνω εργασίες έγιναν στα πλαίσια ερευνητικού προγράμματος της ΕΕ (NEMISREF Project, Contract n°G1RD-CT-2002-00702).

## 10. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Μπασάνου, Μ. Σταματόπουλος, Κ. (2006), "Αξιολόγηση ελαστοπλαστικής μεθόδου για την προσομοίωση της σεισμικής συμπεριφοράς πρανών με δοκιμές στον φυγοκεντριστή". 5ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής Ξάνθη.
- Athanasopoulos, G. A. Pelekis, P. C. and Leonidou, E. A. (1999), "Effects of surface topography on seismic ground response in the Egion (Greece) 15 June 1995 earthquake". Soil Dynamics and Earthquake Eng., Vol. 18, pp 135-149
- Bouckovalas, G. B. Gazetas, G. and Papadimitriou, A.G. (1999), "Geotechnical aspects of the 1995 Aegion, Greece earthquake". 2nd Int. Conf. on Earthquake Geotechnical Eng. Seco e Pinto, Balkema, Rotterdam.
- BRGM (French Geological Survey) Software (1998), Cyberquake, Version 1.1. User's Guide, France.
- ITASCA Consultants. (2002), FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua). S. A.A., Version 4.0.
- Ishibashi, Zhang, X. (1993), "Unified shear moduli and damping ratios of sand and clay". Soils and foundations, Vol. 33, No 1, pp 182-191