

# ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΜΟΝΩΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΗΡΙΞΗΣ ΜΕ ΣΥΜΠΙΕΣΤΟ ΠΑΡΕΜΒΛΗΜΑ ΓΕΩΑΦΡΟΥ EPS

Γ. Α. ΑΘΑΝΑΣΟΠΟΥΛΟΣ

Καθηγητής, Τμ. Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών,

gaa@upatras.gr

Ερευνητική Ομάδα:

Β. Ξενάκη, Πολιτικός Μηχανικός, Διδάκτωρ Πανεπιστημίου Πατρών

Χρ. Νικολοπούλου, Πολιτικός Μηχανικός, ΜΔΕ Τμ. Πολιτικών Μηχανικών, Παν. Πατρών

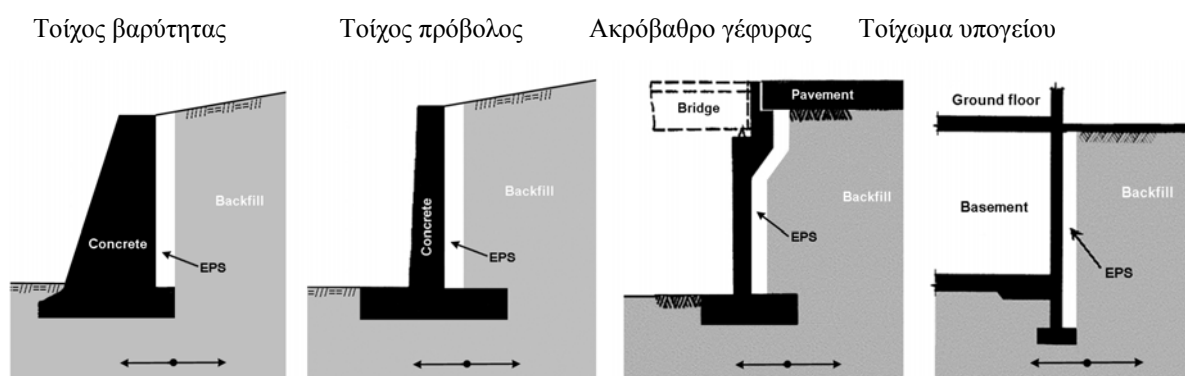
Β. Σταθοπούλου, Πολιτικός Μηχανικός, ΜΔΕ Τμ. Πολιτικών Μηχανικών, Παν. Πατρών

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην παρούσα έρευνα εξετάζεται η αποτελεσματικότητα της χρήσης συμπιεστού παρεμβλήματος EPS ως μέσου μόνωσης έναντι των σεισμικών εδαφικών ωθήσεων που ασκούνται σε κατασκευές εδαφικής αντιστήριξης. Οι κατασκευές αυτές αποτελούν σημαντική συνιστώσα πολλών έργων υποδομής αρμοδιότητας Πολιτικού Μηχανικού (Σχ. 1). Σε περιοχές υψηλής σεισμικότητας ο ανεπαρκής αντισεισμικός σχεδιασμός των κατασκευών εδαφικής αντιστήριξης μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία, για την αποφυγή της οποίας απαιτείται σε πολλές περιπτώσεις η σημαντική αύξηση των διαστάσεων της κατασκευής και του αντίστοιχου κόστους [9, 14, 15, 18, 19, 34, 36, 39, 41, 47].

Η ανωτέρω λειτουργία του EPS θεωρείται επέκταση της αντίστοιχης εφαρμογής του συμπιεστού παρεμβλήματος για τη μείωση των στατικών πλευρικών εδαφικών ωθήσεων [26, 27, 28, 29, 35, 31, 40, 42, 52,53].

Η έρευνα ακολουθεί δύο κύριες κατευθύνσεις: α) πειραματική διερεύνηση της μηχανικής συμπεριφοράς του EPS υπό δυναμική/κυκλική φόρτιση στην περιοχή παραμορφώσεων που αναπτύσσονται στις εφαρμογές της Γεωτεχνικής Μηχανικής και β) αναλυτική διερεύνηση της σεισμικής απόκρισης τοίχων αντιστήριξης σεισμικά μονωμένων με συμπιεστό παρέμβλημα.

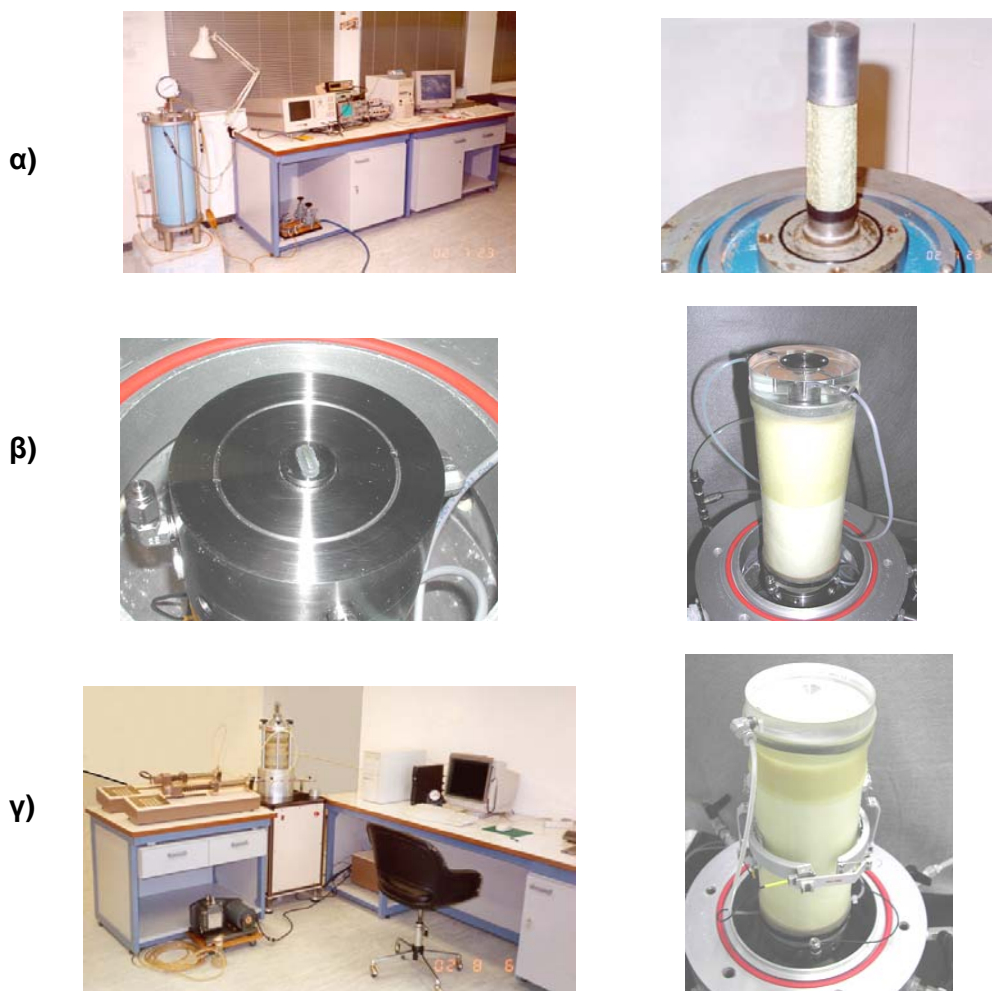


Σχήμα 1 Τύποι κατασκευών εδαφικής αντιστήριξης από οπλισμένο σκυρόδεμα

## 2. ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ EPS

Η μηχανική συμπεριφορά του γεωαφρού EPS έχει αποτελέσει αντικείμενο πολλών πειραματικών και αναλυτικών διερευνήσεων κατά την τελευταία εικοσαετία [1, 2, 5, 6, 7, 10, 11, 16, 17, 25, 37, 38, 46, 48, 49, 59, 61, 65, 67, 68, 69, 71]. Στα πλαίσια της παρούσας έρευνας η μηχανική συμπεριφορά της διογκωμένης πολυστερίνης (που από τη δεκαετία του 1990 κατατάσσεται στην κατηγορία των γεωσυνθετικών υλικών και είναι γνωστή ως “γεωαφρός διογκωμένης πολυστερίνης”, EPS geofom) διερευνήθηκε στα πλαίσια ενός εκτεταμένου προγράμματος ειδικών εργαστηριακών δοκιμών σε δοκίμια EPS με πυκνότητα κυμαινόμενη από 12 έως 30kg/m<sup>3</sup>, κάτω από ισότροπη περιβάλλουσα τάση κυμαινόμενη από 0% έως 50% της αντοχής του υλικού σε ανεμπόδιση θλίψη (στην περιοχή αυτή των θλιπτικών τάσεων η επιρροή των παραμορφώσεων ερπυσμού δεν είναι σημαντική).

Διεξήχθησαν δοκιμές συντονισμού, πιεζοκεραμικών στοιχείων και μονοτονικής / κυκλικής τριαξονικής φόρτισης, με χρήση αισθητήρων μέτρησης της τοπικής παραμόρφωσης του δοκιμίου [12,13], Σχ. 2. Εχουν διεξαχθεί επίσης δοκιμές μονοτονικής άμεσης διάτμησης για τον προσδιορισμό των παραμέτρων αλληλεπίδρασης στη διεπιφάνεια: EPS- επίχωμα [3, 75]. Για τη διαμόρφωση των δειγμάτων EPS χρησιμοποιήθηκε σφυριδόπανο (αντί της κο-



Σχήμα 2 Είδη εργαστηριακών δοκιμών που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό των δυναμικών ιδιοτήτων του EPS. α) Δοκιμές συντονισμού, β) Δοκιμές πιεζοκεραμικών στοιχείων, γ) Δοκιμές κυκλικής/μονοτονικής τριαξονικής φόρτισης με χρήση αισθητήρων μέτρησης της τοπικής παραμόρφωσης του δοκιμίου

πής με θερμαινόμενο σύρμα) για να αποφευχθεί η θερμική διαταραχή του επιφανειακού στρώματος του υλικού [7, 68].

Τα πειραματικά αποτελέσματα επιτρέπουν την περιγραφή της μηχανικής συμπεριφοράς του EPS στην περιοχή παραμορφώσεων από  $10^{-6}$  έως  $10^{-1}$  και υποδεικνύουν ότι η συμπεριφορά είναι γραμμική για παραμορφώσεις  $<10^{-4}$  (0.01%), μπορεί όμως να θεωρηθεί ως “περίπου γραμμική” και για παραμορφώσεις μέχρι  $10^{-3}$ . Για παραμορφώσεις μεγαλύτερες του  $10^{-3}$  (0.1%) η συμπεριφορά του υλικού είναι μη-γραμμική και θεωρείται αναγκαίο να λαμβάνεται υπόψη το χαρακτηριστικό αυτό στις εξεταζόμενες εφαρμογές του συμπιεστού παρεμβλήματος. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τις γεωτεχνικές εφαρμογές παρουσιάζει η σημαντική διαφοροποίηση του εύρους της περιοχής γραμμικής συμπεριφοράς EPS σε σχέση με το αντίστοιχο εύρος των εδαφικών υλικών.

Τα πειραματικά αποτελέσματα υποδεικνύουν [74, 76] ότι τόσο η θλιπτική αντοχή όσο και τα μέτρα παραμορφωσιμότητας του EPS αυξάνονται με την αύξηση της πυκνότητας του υλικού και μειώνονται με την αύξηση της περιβάλλουσας τάσης. Τα μέτρα παραμορφωσιμότητας μειώνονται επίσης σημαντικά με την αύξηση της παραμόρφωσης του υλικού. Παρατηρήθηκε ότι η τιμή του μέτρου παραμορφωσιμότητας, για συγκεκριμένο πλάτος και ρυθμό παραμόρφωσης, εξαρτάται από το είδος της φόρτισης (μονοτονική ή κυκλική) όπως έχει παρατηρηθεί και για τα εδαφικά υλικά [33,45]. Συγκεκριμένα, για την περίπτωση της κυκλικής φόρτισης το μέτρο παραμορφωσιμότητας προκύπτει κατά 20% περίπου μεγαλύτερο από την αντίστοιχη τιμή για μονοτονική φόρτιση.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η διακύμανση τιμών του λόγου Poisson ο οποίος εξαρτάται κυρίως από την παραμόρφωση και την περιβάλλουσα τάση και σε πολύ μικρότερο βαθμό από την πυκνότητα του υλικού. Σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα για μικρές τιμές παραμορφώσεων και περιβάλλουσας τάσης ο λόγος Poisson του EPS χαρακτηρίζεται από τιμές παρόμοιες με αυτές ορισμένων εδαφικών υλικών (0.20 έως 0.25). Με την αύξηση όμως των παραμορφώσεων και της περιβάλλουσας τάσης η τιμή του λόγου Poisson ελαττώνεται σημαντικά, γίνεται μηδενική και είναι δυνατόν να λάβει έντονα αρνητικές τιμές (μέχρι -0.3). Κάτω από αυτές τις συνθήκες είναι δυνατόν να θεωρηθεί ότι ο γεωαφρός EPS κατατάσσεται στην κατηγορία των “αυξητικών” (auxetic) υλικών [50, 66].

Τα πειραματικά αποτελέσματα υποδεικνύουν επίσης ότι η τιμή του λόγου απόσβεσης του γεωαφρού EPS εξαρτάται καταρχήν σε σημαντικό βαθμό από το είδος της επιβαλλόμενης φόρτισης (θλιπτικής ή διατμητικής): κάτω από συνθήκες στις οποίες δεσπόζει η θλιπτική συνιστώσα της φόρτισης ο λόγος απόσβεσης είναι δυνατόν να λάβει τιμές τουλάχιστον τριπλάσιες σε σχέση με αυτές που αντιστοιχούν σε συνθήκες διατμητικής φόρτισης. Για μικρές τιμές παραμόρφωσης ο λόγος απόσβεσης παραμένει γενικά χαμηλός οπότε η ανωτέρω διαφοροποίηση των τιμών του δεν είναι σημαντική οπότε προτείνεται η χρησιμοποίηση κοινής τιμής  $D_o \approx 1.7\%$ . Για μεγάλες όμως παραμορφώσεις, προτείνεται η χρήση διαφορετικών τιμών λόγου απόσβεσης για τα δύο είδη επιβαλλόμενης φόρτισης:  $D_{\text{διατμ}} \approx 3\%$  και  $D_{\text{θλιπτ}} \approx 14\%$ . Τα πειραματικά αποτελέσματα υποδεικνύουν περαιτέρω ότι ο λόγος απόσβεσης αυξάνεται με το πλάτος της παραμόρφωσης και την τιμή της περιβάλλουσας τάσης ενώ μειώνεται με την αύξηση της πυκνότητας του υλικού (στην περίπτωση των μεγάλων παραμορφώσεων).

Με βάση όλα τα αποτελέσματα του προγράμματος των εργαστηριακών δοκιμών προτείνονται αναλυτικές σχέσεις (ή διαγράμματα) για τον προσδιορισμό τιμών της θλιπτικής αντοχής, των στατικών και δυναμικών μέτρων παραμορφωσιμότητας, του λόγου Poisson και του λόγου

απόσβεσης ως συνάρτηση της πυκνότητας του EPS, της ανηγμένης παραμόρφωσης και της μέσης περιβάλλουσας τάσης, Σχ. 3, Σχ. 4.

$$\sigma_{c10} = 7.68\rho - 48.3 \quad (1)$$

$$\frac{\sigma_{c10}(\sigma_3)}{\sigma_{c10}(\sigma_3=0)} = 1.0 - 0.84 \frac{\sigma_3}{\sigma_{c10}} \quad (2)$$

όπου  $\sigma_3$ =περιβάλλουσα τάση (kPa) και  $\sigma_{c10}$ = θλιπτική αντοχή EPS προσδιοριζόμενη από δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης σε κυλινδρικά δοκίμια με λόγο ύψους προς διάμετρο ίσο με 2, και παραμόρφωση ίση με 10% (kPa).

$$G_{o(\sigma_3=0)} = 0.32\rho - 1.40 \quad (3)$$

$$v_{o(\sigma_3=0)} = 0.22 + 0.0033\rho \quad (4)$$

όπου  $\rho$ = πυκνότητα EPS ( $\text{kg/m}^3$ ),  $G_o$ =μέτρο διάτμησης για μικρό πλάτος παραμόρφωσης (MPa)

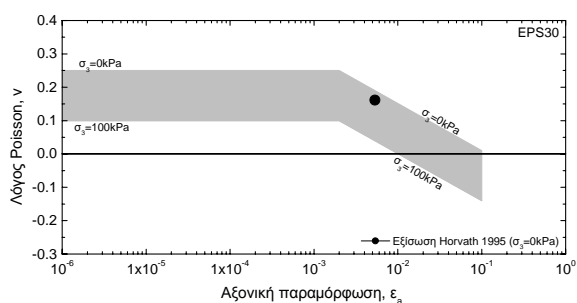
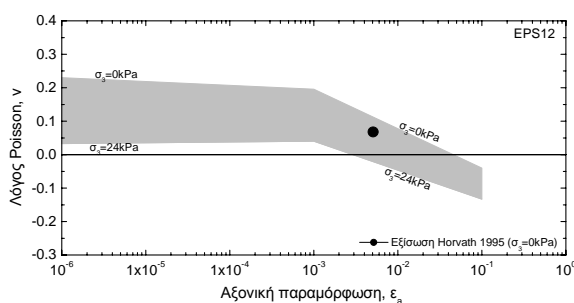
$$\frac{G_{o(\sigma_3)}}{G_{o(\sigma_3=0)}} = 1.02 + 0.599 \frac{\sigma_3}{\sigma_{c10}} - 1.41 \left( \frac{\sigma_3}{\sigma_{c10}} \right)^2 \quad (5)$$

$$v_{o(\sigma_3)} = 0.25 - 0.33 \frac{\sigma_3}{\sigma_{c10}} \quad (6)$$

Η μείωση του κανονικοποιημένου μέτρου ελαστικότητας (ή του μέτρου διάτμησης) με την αύξηση της παραμόρφωσης ( $\epsilon_c$  ή  $\gamma_c$ ) περιγράφεται από την Εξ.7:

$$\frac{E}{E_o} = \frac{1}{1 + \frac{\epsilon_c}{0.01}} \quad (7)$$

όπου  $\epsilon_c$  = πλάτος κυκλικής παραμόρφωσης

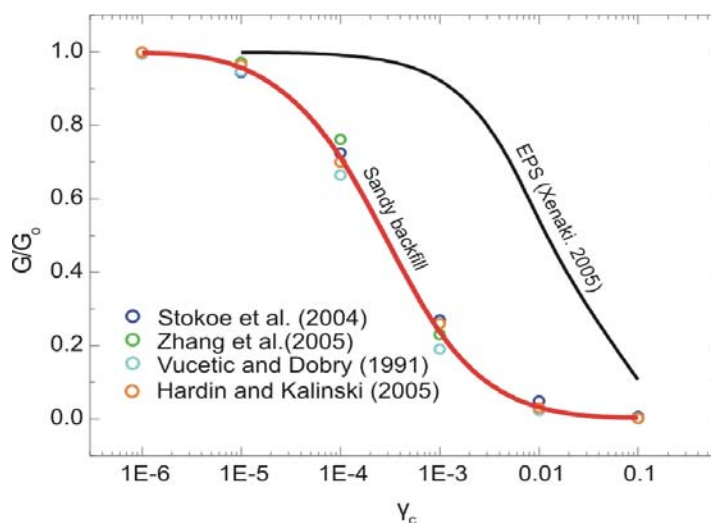


Σχήμα 3 Εξάρτηση του λόγου Poisson,  $\nu$ , του EPS από την αξονική παραμόρφωση, την περιβάλλουσα τάση και την πυκνότητα υλικού

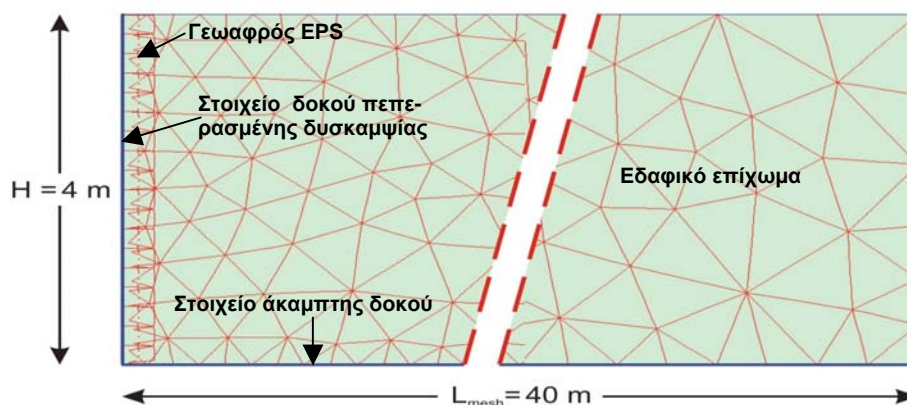
### 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΜΟΝΩΣΗΣ

Η σεισμική μονωτική ικανότητα του παρεμβλήματος γεωαφρού EPS σε κατασκευές εδαφικής αντιστήριξης διερευνάται κυρίως με τη διεξαγωγή αριθμητικών αναλύσεων [8, 22, 23, 30, 32, 43, 62, 72, 73] και μόλις κατά την τελευταία διετία έχουν δημοσιευθεί αποτελέσματα δοκιμών Σεισμικής Τράπεζας σε φυσικά ομοιώματα μικρής κλίμακας [21, 24, 63]. Στην παρούσα έρευνα η σεισμική συμπεριφορά τοίχων εδαφικής αντιστήριξης, σεισμικά μονωμένων με παρέμβλημα EPS, διερευνήθηκε με τη βοήθεια αριθμητικών αναλύσεων χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, Σχ. 5 [44]. Χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα αναλύσεων συμπεριφοράς κατακόρυφων τοίχων με οριζόντιο επίχωμα κάτω από αρμονική διέγερση βάσης, κάνοντας δεκτή ισοδύναμη-γραμμική συμπεριφορά για το εδαφικό υλικό και τον γεωαφρό EPS [20, 51, 54, 55, 56, 57, 58, 64]. Η μονωτική αποτελεσματικότητα,  $A_r$ , του συμπιεστού παρεμβλήματος ορίσθηκε ως το επί τοις εκατό ποσοστό της μείωσης της σεισμικής προσαύξησης της ώθησης (λόγω της ύπαρξης παρεμβλήματος) ως προς την τιμή της σεισμικής προσαύξησης χωρίς την ύπαρξη παρεμβλήματος:

$A_r = \text{Αποτελεσματικότητα σεισμικής μόνωσης} = (\Delta P_{\text{MON}}/P) \times 100$ , όπου :  $\Delta P_{\text{MON}} = P - P_{\text{MON}}$



Σχήμα 4 Καμπύλες μείωσης των ελαστικών μέτρων του EPS και αμμώδους εδαφικού υλικού με την αύξηση της ανηγμένης διατμητικής παραμόρφωσης



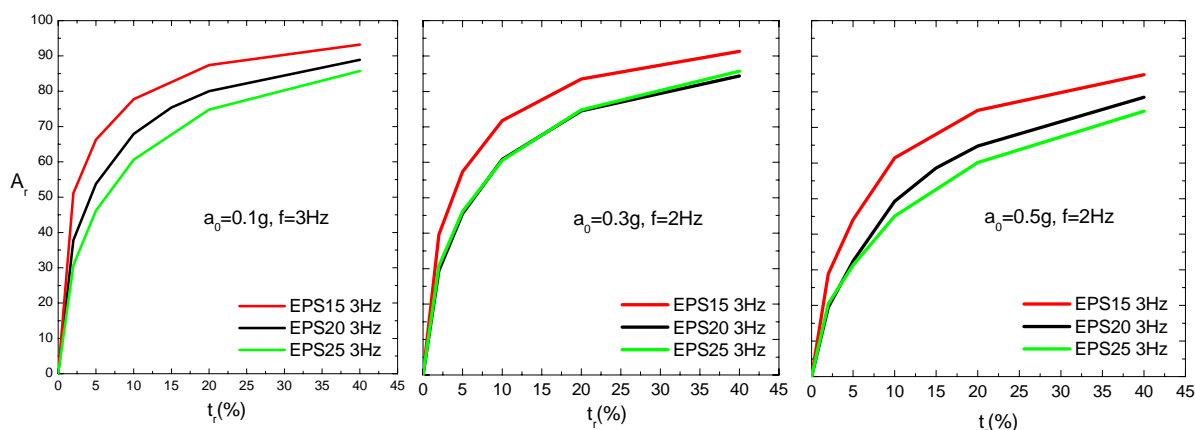
Σχήμα 5 Παράδειγμα δικτύου πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε στις αριθμητικές αναλύσεις απόκρισης τοίχου ύψους 4m, σεισμικά μονωμένου με παρέμβλημα γεωαφρού EPS

Διερευνήθηκε κατ' αρχήν η αξιοπιστία της μεθοδολογίας ανάλυσης προσομοιώνοντας την περίπτωση δημοσιευμένων δοκιμών σεισμικής τράπεζας σε φυσικό ομοίωμα τοίχου σεισμικά μονωμένου με παρέμβλημα EPS [62, 63]. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης βρέθηκαν σε καλή συμφωνία με τη μετρηθείσα συμπεριφορά του τοίχου και στη συνέχεια εξετάστηκε, με τη βοήθεια παραμετρικών αναλύσεων, η επίδραση των ακολούθων παραμέτρων: α) πυκνότητα, σχήμα, πάχος και μη-γραμμική συμπεριφορά του συμπιεστού παρεμβλήματος EPS, β) ύψος και ευκαμψία του τοίχου αντιστήριξης, και γ) ένταση και συχνότητα της κίνησης βάσης. Διερευνήθηκε επίσης η συνεισφορά των δύο χαρακτηριστικών ιδιοτήτων του EPS, δηλαδή της συμπιεστότητας και του πολύ μικρού ειδικού βάρους, στην επιτυγχανόμενη σεισμική μόνωση.

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων υποδεικνύουν [4, 70, 77] ότι το ορθογωνικό σχήμα παρεμβλήματος (δηλαδή σταθερό πάχος κατά την έννοια του βάθους) συνδυάζει τεχνικά και κατασκευαστικά πλεονεκτήματα και γι' αυτό προτείνεται η χρησιμοποίησή του στις πρακτικές εφαρμογές. Διαπιστώθηκε επίσης ότι η μονωτική ικανότητα του EPS οφείλεται κατά κύριο λόγο στη συμπιεστότητα του και σε πολύ μικρό ποσοστό στην ελαφρότητά του. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων υποδεικνύουν επιπλέον ότι η μονωτική αποτελεσματικότητα αυξάνεται με την αύξηση του πάχους του παρεμβλήματος και τη μείωση της πυκνότητας του και είναι εφικτές τιμές αποτελεσματικότητας  $A_T$  μεγαλύτερες του 80%, Σχ. 6.

Με βάση την παρατήρηση ότι η σχέση: αποτελεσματικότητα – πάχος παρεμβλήματος γίνεται έντονα μη-γραμμική για τιμές  $A_T > 50\%$ , συνιστάται από οικονομοτεχνική άποψη ο σχεδιασμός σεισμικά μονωμένων τοίχων αντιστήριξης με βάση την τιμή  $A_T = 50\%$ . Επίσης, με στόχο τη μείωση των στατικών (άμεσων και ερπυστικών) και σεισμικών παραμορφώσεων του επιχώματος συνιστάται η χρήση υλικού πυκνότητας ίσης με  $20\text{kg/m}^3$  (ή θλιπτικής αντοχής  $\sigma_{c10} \approx 100\text{kPa}$ ).

Η μη-γραμμικότητα του συνολικού συστήματος (τοίχος, συμπιεστό παρέμβλημα, επίχωμα), Σχ.4, βρέθηκε να επηρεάζει σημαντικά τη σεισμική συμπεριφορά του, με αποτέλεσμα να αυξάνεται το πάχος παρεμβλήματος που απαιτείται για την επίτευξη αποτελεσματικότητας ίσης με 50% όσο αυξάνεται το ύψος του τοίχου και η ένταση της κίνησης βάσης. Με βάση



Σχήμα 6 Αποτελεσματικότητα σεισμικής μόνωσης,  $A_r$ , παρεμβλήματος γεωαφρού EPS, ως συνάρτηση του πάχους και της πυκνότητας του παρεμβλήματος καθώς και της έντασης της κίνησης βάσης

τα διαθέσιμα αποτελέσματα των αναλύσεων προτείνονται οι ακόλουθες τιμές του πάχους παρεμβλήματος EPS 20 ( $\sigma_{c10}=100\text{kPa}$ ) που απαιτείται για την επίτευξη της τιμής  $A_r=50\%$ , ως συνάρτηση του ύψους του τοίχου και της έντασης της κίνησης βάσης, Πίν. 1.

Οι αναλύσεις υποδεικνύουν περαιτέρω ότι η ύπαρξη του συμπιεστού παρεμβλήματος δεν επηρεάζει το ύψος εφαρμογής της σεισμικής συνιστώσας της ώθησης καθώς και ότι η αποτελεσματικότητα της σεισμικής μόνωσης μειώνεται δραματικά κατά τις συνθήκες συντονισμού. Επομένως, στις εφαρμογές θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ότι η σεισμική μόνωση παραμένει πλήρως αποτελεσματική όταν η δεσπόζουσα συχνότητα της διέγερσης βάσης βρίσκεται εκτός της περιοχής  $0.3f_1$  έως  $2f_1$  όπου  $f_1$ =θεμελιώδης ιδιοπερίοδος του συστήματος τοίχος-επίχωμα.

Πίνακας 1 Προτεινόμενες τιμές του πάχους παρεμβλήματος,  $t_r$  (%), ως συνάρτηση του ύψους του τοίχου και της ζώνης σεισμικής επικινδυνότητας

Υψος τοίχου H (m)	Ποσοστιαίο πάχος παρεμβλήματος, $t_r$ (%) (*) για επίτευξη αποτελεσματικότητας σεισμικής μόνωσης $A_r=50\%$		
	Σεισμική Ζώνη I 0.16g	Σεισμική Ζώνη II 0.24g	Σεισμική Ζώνη III 0.36g
2	4	4	4
4	5	6	8
6	5.5	8	12
8	6.5	9.5	17

(\*) Για EPS 20 ( $\sigma_{c10}\approx 100\text{kPa}$ )

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- ❖ Με βάση την παρατήρηση ότι η ευκαμψία του τοίχου αντιστήριξης δεν επηρεάζει σημαντικά την αποτελεσματικότητα της σεισμικής μόνωσης (για την περίπτωση συνήθων τοίχων σκυροδέματος) προτείνεται η ακόλουθη διαδικασία δύο βημάτων για το **σχεδιασμό σεισμικά μονωμένων τοίχων αντιστήριξης από οπλισμένο σκυρόδεμα**:

- α. Διαστασιολόγηση του τοίχου αντιστήριξης λαμβάνοντας υπόψη το 50% της σεισμικής προσαύξησης που προβλέπεται από τον αντισεισμικό κανονισμό για την περιοχή του έργου.
- β. Τοποθέτηση συμπιεστού παρεμβλήματος EPS20 ( $\sigma_{c10} \approx 100$  kPa) μεταξύ τοίχου και υλικού επιχώματος, με σταθερό καθ' ύψος πάχος που επιλέγεται από τον Πίν.1 ως συνάρτηση του ύψους του τοίχου και της σεισμικής δράσης σχεδιασμού της περιοχής του έργου.
- ❖ Εφαρμογή της ανωτέρω μεθοδολογίας για την περίπτωση συνήθους τοίχου-προβόλου σκυροδέματος ύψους 4.0m οδηγεί στις ακόλουθες **μέσες μειώσεις κόστους** (σε σχέση με την κατασκευή συμβατικού τοίχου) για τις τρεις ζώνες σεισμικής επικινδυνότητας του Ελληνικού χώρου:

Ζώνη	Πάχος συμπιεστού παρεμβλήματος, $t_r$ , %	Μείωση κόστους%
I	5	18
II	6	50
III	8	70

- ❖ Η προτεινόμενη μέθοδος σεισμικής μόνωσης κατασκευών εδαφικής αντιστήριξης προσφέρεται ιδιαίτερα για τη σεισμική ενίσχυση υφισταμένων κατασκευών.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Anasthas, N., Negussey, D. and Srirajan, S., (2001), "Effect of Confining Stress on Compressive Strength of EPS Geofoam", *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference on EPS Geofoam 2001*, Salt Lake City, Utah, December 2001, 14p.
- Athanasopoulos, G.A., Pelekis, P.C. and Xenaki, V.C., 1999, "Dynamic Properties of EPS Geofoam: An Experimental Investigation", *Geosynthetics International*, Vol.6, No. 3, pp.171-194
- Athanasopoulos, G.A. and Xenaki, V.C., 2001, "Experimental Investigation of the Interaction Mechanism at the EPS Geofoam – Sand Interface by Direct Shear Testing", *Geosynthetics International*, Vol.8, No. 6, pp.471-499
- Athanasopoulos, G. A., Nikolopoulou, C. P., Xenaki, V. C. and Stathopoulou, V. D., 2007, "Reducing the Seismic Earth Pressures on Retaining Walls by EPS Geofoam Buffers - Numerical Parametric Analyses", *Proceedings of Geosynthetics 2007*, Washington DC, 16-19 January 2007, USA
- Atmatzidis, D. K., Missirlis, E. G. and Chrysikos, D. A., (2001), "An Investigation of EPS Geofoam Behavior in Compression", *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference on EPS Geofoam 2001*, Salt Lake City, Utah, December 2001, 11p.
- Atmatzidis, D. K. and Missirlis, E. G., (2002), "Behavior of EPS Geofoam in Compression", *Proceedings of the 7ICG-Nice 2002*, France, September 2002, Vol.1 pp 143-146



7. Atmatzidis, D. K., Chrysikos, D. A. and Missirlis, E. G. (2005), 'Laboratory Testing and Modelling of EPS Geofoam in Compression', *Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Conference on Computer Methods and Advances in Geomechanics*, Torino, Italy, June 2005, pp. 11-18
8. Bathurst, R. J. and Alfaro, M.C., (1996), "Review of Seismic Design, Analysis and Performance of Geosynthetic Reinforced Walls, Slopes and Embankments", *Proceedings of the International Symposium on Earth Reinforcement*, Fukuoka, Kyushu, Japan, November 1996, H. Ochiai, N. Yasufuku and K. Omine Eds. Balkema, 1997, Vol.2, pp. 887-915
9. Carville, C. A., 2001, "Damage from Collapsed Backfill Rock and Soils Behind Retaining Walls Caused by Earthquake Shaking", *Proceedings of the Fourth International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics and Symposium in Honor of Professor W. D. Liam Finn*, San Diego, California, March 26-31, 2001, 3p.
10. Chrysikos, D. A., Atmatzidis, D. K and Missirlis, E. G, "EPS Geofoam Surface Shear Resistance", *Proceedings of the 8ICG*, Yokohama, Japan, September 2006, Vol. 4, pp 1647-1650
11. Chun, B. S., Lim, H.-S., Sagong, M. and Kim, K., (2004), "Development of a Hyperbolic Constitutive Model for Expanded Polystyrene (EPS) Geofoam under Triaxial Compression Tests", *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 22, pp. 223-237
12. Clayton, C. R. I. and Khatrush, S. A., 1986, "A New Device for Measuring Local Axial Strains on Triaxial Specimens", Technical Note, *Géotechnique*, Vol. 36, No. 4, pp. 593-597
13. Clayton, C. R. I., Khatrush, S. A., Bica, A. V. D. and Siddique, A., 1989, "The Use of Hall Effect Semiconductors in Geotechnical Instrumentation", *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, March 1989, Vol. 12, No. 1, pp. 69-76
14. Crespellani, T., Madiari, C. and Vannucchi, G., 2001, "A Case History: Seismic Analysis of the Retaining Wall of the "Sacro Convento" in Assisi (Italy)", *Proceedings of the Fourth International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics and Symposium in Honor of Professor W. D. Liam Finn*, San Diego, California, March 26-31, 2001, 7p.
15. Durrani, A. J., Elnashai, A. S., Hashash, Y. M. A., Kim, S. J., and Masud, A., "Kashmir Earthquake of October, 8 2005 – A Quick Look Report", *Mid-America Earthquake Center Report*, No 05-04
16. Duškov, M., (1997), "Materials Research on EPS-20 and EPS15 Under Representative Conditions in Pavement Structures", *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 15, Nos. 1-3, pp. 147-181
17. Elragi, A., Negussey, D. and Kyanka, G., (2000), "Sample Size Effects on the Behavior of EPS Geofoam", *Soft Ground Technology*, ASCE Geotechnical Special Publication No. 112, *Proceedings of the United Engineering Foundation/ASCE Geo-Institute Soft Ground Technology Conference*, Noordwijkerhout, Netherlands, May-June 2000, J. L. Hanson and R. J. Termaat Eds., pp. 280-291

18. Fang, Y. S., Yang, Y. C. and Chen, T. J., 2003, “Retaining Walls Damaged in the Chi-Chi Earthquake”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 40, pp. 1142-1153
19. Fang, Y.-S., Cben, T.-J., Yang, Y.-C. and Tang, C.-C., 2001, “The Behavior of Retaining Walls Under 1999 Chi-Chi Earthquake”, *Proceedings of the Fourth International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics and Symposium in Honor of Professor W. D. Liam Finn*, San Diego, California, March 26-31, 2001, 6p.
20. Hardin, B.O. and Kalinski, M.E., 2005, “Estimating the Shear Modulus of Gravelly Soils”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, July 2005, pp.867-875
21. Hazarika, H., 2005, “A Soil-Structure Interaction Model With Multiple Participating Components”, *Proceedings of the Eleventh International Conference on Computer Methods and Advances in Geomechanics, 2005*, Torino, Italy, June 2005, G. Barla, M. Barla Eds., Prediction Analysis and Design in Geomechanical Applications, Vol. 3, pp. 659-666
22. Hazarika, H., 2001, “Mitigation of Seismic Hazard on Retaining Structures – A Numerical Experiment”, *Proceedings of the Eleventh (2001) International Offshore and Polar Engineering Conference*, Stavanger, Norway, June 17-22, 2001, International Society of Offshore and Polar Engineers, pp. 459-464
23. Hazarika, H., Nakazawa, J., Matsuzawa, H. and Negussey, D., 2001, “On The Seismic Earth Pressure Reduction Against Retaining Structures Using Lightweight Geofoam Fill”, *Proceedings of Fourth International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics in Honor of Professor W.D. Liam Finn, 2001*, San Diego, California, March 2001
24. Hazarika, H. and Okuzono, S., 2004, ‘Modeling the Behavior of a Hybrid Interactive System Involving Soil, Structure and EPS Geofoam’, *Soils and Foundations*, Japanese Geotechnical Society, October 2004, Vol. 44, No. 5, pp. 149-162
25. Hazarika, H., 2006, “Stress-strain Modelling of EPS Geofoam for Large-strain Applications”, *Geotextiles and Geomembranes* 21 (2006) 79-90
26. Horvath, J. S., 1991, “Using Geosynthetics to Reduce Earth Loads on Rigid Retaining Structures”, *Proceedings of Geosynthetics '91 Conference*, Atlanta, USA, 1991
27. Horvath, J. S., 1995, “*Geofoam Geosynthetic*”, Horvath Engineering, P.C. Scarsdale, N.Y. U.S.A, 217p.
28. Horvath, J. S., 1997, “The Compressible Inclusion Function of EPS Geofoam”, *Geotextiles and Geomembranes*, Vol.15, pp. 77-120
29. Horvath, J. S., 2004, “Geofoam Compressible Inclusions: The New Frontier in Earth Retaining Structures”, *Geotechnical Engineering for Transportation Projects, Proceedings of Geo-Trans 2004, ASCE Geotechnical Special Publication No. 126*, July 27-31, 2004, Los Angeles, California, M. K. Yegian and E. Kavazanjian Eds., Vol. 2, pp. 1925-1934
30. Inglis, D., Macleod, G., Naesgaard, E. and Zergoun, M., 1996, “Basement Wall with Seismic Earth Pressure and Novel Expanded Polystyrene Foam Buffer Layer”, *Proceedings of 10<sup>th</sup> Annual Symposium of the Vancouver Geotechnical Society*, Vancouver, B.C., 18p.

31. Karpurapu, R. and Bathurst, R. J., 1992, "Numerical Investigation of Controlled Yielding of Soil-Retaining Wall Structures", *Geotextiles and Geomembranes*, Vol.11, No. 2, pp. 115-131
32. Konno, H., Nakano, O., Kishi, N., Gotoh, Y. and Ishikawa, Y., (2001), "A Practical Design Method of Three-Layered Absorbing System", *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference on EPS Geofoam 2001*, Salt Lake City, Utah, December 2001, 11p.
33. Lo Presti, D.C.F., Jamiokowski, M., Pallara, O., Cavallaro, A. And Pedroni, S.(1997), "Shear Modulus and Damping of Soils", *Geotechnique* 47, No 3, 603-617
34. Matasovic, N., Caldwell, J. and Guptill, P., 2004, "The Role of Geotechnical Factors in Northridge Earthquake Residential Damage", *Proceedings of the Fifth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, 2004*, New York, NY, April 13-17, 2004
35. McGown, A., Andrawes, K. Z. and Murray, R. T., 1988, "Controlled Yielding of the Lateral Boundaries of Soil Retaining Structures", *In Proceedings of the ASCE Symposium on Geosynthetics for Soil Improvement*, 1988, ed. R.D. Holtz, Nashville, TN, USA, pp. 193-211
36. Nagayama, Y., Matsui, T., Yasukawa, I. and Kasai, H., 2001, "A Field Study and Dynamic Finite Element Analysis of Railway Retaining Structures Damaged by the Hogoken-Nambu Earthquake (1995)", *Proceedings of the Fourth International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics and Symposium in Honor of Professor W. D. Liam Finn*, San Diego, California, March 26-31, 2001, 6p.
37. Negussey, D., (1998), "Putting Polystyrene to Work", *Civil Engineering, ASCE*, March 1998, pp. 65-67
38. Negussey, D. and Anasthas, N., (2001), "Young's Modulus of EPS Geofoam by Simple Bending Test", *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference on EPS Geofoam 2001*, Salt Lake City, Utah, December 2001, 14p.
39. Negussey, D. and Srirajan, S., (2001), "Slope Stabilization Using EPS Geofoam", *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference on EPS Geofoam 2001*, Salt Lake City, Utah, December 2001, 12p.
40. Negussey, D. and Sun, M. C., (1996), "Reducing Lateral Pressure by Geofoam (EPS) Substitution", EPS Tokyo '96, *Proceedings of International Symposium on EPS Construction Method*, Japan, October 1996, pp. 202-211
41. NILIM-PWRI Joint Reconnaissance Team for the Mid Niigata Prefecture Earthquake in 2004, "Report on Damage to Infrastructures by the Mid Niigata Prefecture Earthquake in 2004"
42. Partos, A. M. and Kazaniwsky, P. M., 1987, "Geoboard Reduces Lateral Earth Pressures", *In Proceedings of Geosynthetics '87*, New Orleans, USA, February 1987
43. Pelekis, P. C., Xenaki, V. C. and Athanasopoulos, G. A., 2000, "Use of EPS Geofoam for Seismic Isolation of Earth Retaining Structures: Results of a FEM Study", *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> European Geosynthetics Conference, EuroGeo 2000*, Bologna, Italy, October 2000, A. Cancelli, D. Cazzuffi and C. Soccodato Eds., Vol. 2, pp. 843-846
44. PLAXIS, "A Finite Element Code for Soil and Rock Analyses", R. B. J. Brinkgreve, Professional Version 8.1, 2002, Balkema, Lisse

45. Pradhan, T.B.S., and Ueno, Y. (1998), "Cyclic Deformation Characteristics of Clay Under Different Consolidation Histories", in *Pre-failure Deformation Behavior of Geomaterials*, R.J Jardine, M.C.R. Davies, D.W. Hight, A.K.C. Smith, S.E. Stallebrass, Eds, ICE, Thomas Telford, 1998, Great Britain, pp.329-335
46. Preber, T., Bang, S., Chung, Y. and Cho, Y., (1994), "Behavior of Expanded Polystyrene Blocks", *Transportation Research Record* 1462, pp. 36-46
47. Puri, V. K., Prakash, S. and Widanarti, R., 2004, "Retaining Walls under Seismic Loading", *Proceedings of the Fifth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*, New York, NY, April 13-17, 2004, 7p.
48. O' Brien, A. S., (2001), "EPS Behavior During Static and Cyclic Loading from 0.05% Strain to Failure", *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference on EPS Geofoam 2001*, Salt Lake City, Utah, December 2001, 11p.
49. Sivathayalan, S., Negussey, D. and Vaid, Y. P., (2001), "Simple Shear and Bender Element Testing of Geofoam", *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference on EPS Geofoam 2001*, Salt Lake City, Utah, December 2001, 18p.
50. Stavroulakis, G. E., 2004, "Auxetic Behaviour: Appearance and Engineering Applications", Invited Presentation, *Workshop on Auxetics and Related Systems*, Organized by Krzysztof W. Wojciechowski, June 27-30 2004, Poznan, Poland, Special Issue of *Physica Status Solidi (b)*, Wiley InterScience
51. Stokoe, K.H., Darendeli, M.B., Menq, F.-Y. and Choi, W.K., 2004, "Comparison of the Linear and Nonlinear Dynamic Properties of Gravels, Sands, Silts and Clays", *Proceedings of The 11<sup>th</sup> International Conference on Soil Dynamics & Earthquake Engineering, Proceedings of The 3<sup>rd</sup> International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, University of California, Berkeley, USA, 7th-9th January 2004, ed. D. Doolin, A. Kammerer, T. Nogami, R.B. Seed, I. Towhata., pp. 628-638
52. Tsukamoto, Y., Ishihara, K., Nakazawa H., Kon, H., Masuo, T. and Hara, K., 2001, "Combined Reinforcement by Means of EPS Blocks and Geogrids for Retaining Wall Structures", *Landmarks in Earth Reinforcement, Proceedings of International Symposium on Earth Reinforcement*, Ochiai, Otani, Yasufuku and Omine Eds., Swets & Zeitlinger 2001, pp. 483-487
53. Tsukamoto, Y., Ishihara, K., Kon, H. and Masuo, T., 2002, "Use of Compressible Expanded Polystyrene Blocks and Geogrids for Retaining Wall Structures", *Soils and Foundations*, Japanese Geotechnical Society, Vol. 42, No. 4, August 2002, pp. 2
54. Veletsos, A. S. and Younan, A. H., 1994, "Dynamic Modeling and Response of Soil-Wall Systems", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 120, No. 12, December, 1994, pp. 2155-2179
55. Veletsos, A. S. and Younan, A. H., 1995, "Dynamic Soil Pressures on Vertical Walls", State of the Art, *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference on Recent Advances in Geotechnical*

- Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, April 2-7 1995, St. Louis, Missouri, Vol. 3, pp. 1589-1604
56. Veletsos, A. S. and Younan, A. H., 1996, "Dynamic Response of Cantilever Retaining Walls", *Analysis and Design of Retaining Structures Against Earthquakes, ASCE Geotechnical Special Publication No. 60*, Washington, November 10-14, 1996, S. Prakash Ed., pp. 19-20
  57. Veletsos A. S. and Younan A. H., 1997, "Dynamic Response of Cantilever Retaining Walls", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 123, No. 2, February 1997, pp.161-172
  58. Vucetic, M. and Dobry, R., 1991, "Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 117, No. 1, pp. 89-108
  59. Wong, H. and Leo, C. J., 2006, "A Simple Elastoplastic Hardening Constitutive Model for EPS Geofoam", *Geotextiles and Geomembranes*, 24 (2006) 299-310
  60. Wu, G. and Finn, W. D. L., 1999, "Seismic Lateral Design of Rigid Walls", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.36, pp. 509-522
  61. Yeo, S.-S and Husuan, Y. G., 2006, "The Compressive Creep Behaviour of an Expanded Polystyrene Geofoam", *Proceedings of the 8ICG*, Yokohama, Japan, September 2006, Vol. 4, pp 1639-1642
  62. Zarnani, S. and Bathurst, R. J., 2005, "Numerical Investigation of Geofoam Seismic Buffers Using FLAC", *In Proceedings of the North American Geosynthetic Society (NAGS)/GRI19 Conference, 2005*, Las Vegas, NV, USA, December 2005
  63. Zarnani, S. and Bathurst, R. J. and Gaskin, A., 2005, "Experimentall Investigation of Geofoam Seismic Buffers Using A Shaking Table", *In Proceedings of the North American Geosynthetic Society (NAGS)/GRI19 Conference, 2005*, Las Vegas, NV, USA, December 2005
  64. Zhang, J., Andrus, R.D. and Hsein Juang, C., 2005, "Normalized Shear Modulus and Material Damping Ratio Relationships", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, April 2005, pp.453-464
  65. Zou, Y. and Leo, C. J., (1998), "Laboratory Studies on the Engineering Properties of Expanded Polystyrene (EPS) Material for Geotechnical Applications", *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference on Ground Improvement Techniques*, Singapore, 8-9 October 1998, pp. 581-588
  66. AUXETNET: [www.bolton.ac.uk/auxnet/action/index.html](http://www.bolton.ac.uk/auxnet/action/index.html)
  67. Μισυρλής, Ε.Γ., Ατματζίδης, Δ.Κ. και Χρυσικός, Δ.Α., 2001, "Διερεύνηση της Συμπεριφοράς Γεωαφρών σε Θλίψη", *Πρακτικά 4<sup>ο</sup> Πανελληνίου Συνεδρίου Γεωτεχνικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής*, Αθήνα, 30/5-1/6 2001, Τόμος 1, σελ. 435-442
  68. Μισυρλής, Ε.Γ., 2003, "Συμβολή στην Τεκμηρίωση της Μηχανικής Συμπεριφοράς Γεωαφρών EPS για Γεωτεχνικές Κατασκευές", *Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών*, Ιούνιος 2003, 283 σελίδες

69. Μισυρλής, Ε.Γ., Παπαστυλιανού, Π., Ατματζίδης, Δ.Κ. και Χρυσικός, Δ.Α., 2006, “Συμπεριφορά Γεωαφρών EPS σε Θλίψη υπό Μόνιμα Φορτία”, *Πρακτικά 5<sup>ο</sup> Πανελληνίου Συνεδρίου Γεωτεχνικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής*, Ξάνθη, 31/5 – 2/6 2006, Τόμος 1, σελ. 559-566
70. Νικολοπούλου, Χ. Π., 2006, “Μόνωση Κατασκευών Εδαφικής Αντιστήριξης Έναντι Σεισμικών Πλευρικών Ωθήσεων με Χρήση Γεωαφρου EPS – Επίδραση της Μη-Γραμμικής Συμπεριφοράς των Υλικών”, *Διατριβή για ΜΔΕ*, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Σεπτέμβριος 2006
71. Ξενάκη, Β. Κ., Πελέκης, Π. Κ. και Αθανασόπουλος, Γ. Α., 2001, “Πειραματική Διερεύνηση των Δυναμικών Ιδιοτήτων του Γεωαφρού Διογκωμένης Πολυστερίνης”, *Πρακτικά 4<sup>ο</sup> Πανελληνίου Συνεδρίου Γεωτεχνικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής*, Αθήνα, 30 Μαΐου – 1 Ιουνίου 2001, Τόμος 1, σελ. 467-474
72. Ξενάκη, Β. Κ., Πελέκης, Π. Κ. και Αθανασόπουλος, Γ. Α., 2001α, “Χρήση του Γεωαφρού Διογκωμένης Πολυστερίνης για τη Σεισμική Μόνωση Τοίχων Αντιστήριξης: Ανάλυση με τη ΜΠΣ”, *Πρακτικά 4<sup>ο</sup> Πανελληνίου Συνεδρίου Γεωτεχνικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής*, Αθήνα, 30 Μαΐου – 1 Ιουνίου 2001, Τόμος 1, σελ. 475-482
73. Ξενάκη, Β. Κ., Πελέκης, Π. Κ., Αθανασόπουλος, Γ. Α., 2001β, “Μείωση των Σεισμικών Ωθήσεων σε Τοίχους Αντιστήριξης με χρήση του Γεωαφρού Διογκωμένης Πολυστερίνης: Ανάλυση με τη ΜΠΣ”, *2<sup>ο</sup> Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής & Τεχνικής Σεισμολογίας*, 28-30 Νοεμβρίου, 2001, Θεσσαλονίκη, Τόμος Α’, σελ. 235-244
74. Ξενάκη, Β. Κ., 2005, “Πειραματική Διερεύνηση της Μηχανικής Συμπεριφοράς Γεωαφρών Διογκωμένης Πολυστερίνης υπό Συνθήκες Στατικής και Δυναμικής/Κυκλικής Φόρτισης”, *Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών*, Μάρτιος 2005, 334 σελίδες.
75. Ξενάκη, Β. Κ., Αθανασόπουλος, Γ. Α., 2001, “Μηχανισμός Αλληλεπίδρασης στη Διεπιφάνεια Γεωαφρού Διογκωμένης Πολυστερίνης-Άμμου: Πειραματική Διερεύνηση”, *Πρακτικά 4<sup>ο</sup> Πανελληνίου Συνεδρίου Γεωτεχνικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής*, Αθήνα, 30 Μαΐου – 1 Ιουνίου 2001, Τόμος 1, σελ. 459-466
76. Ξενάκη, Β. Κ., Αθανασόπουλος, Γ. Α., 2006, “Μηχανική Συμπεριφορά του Γεωαφρού Διογκωμένης Πολυστερίνης (ΓΔΠ) υπό Συνθήκες Στατικής και Δυναμικής / Κυκλικής Φόρτισης”, *Πρακτικά 5<sup>ο</sup> Πανελληνίου Συνεδρίου Γεωτεχνικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής*, Ξάνθη, 31/5 – 2/6 2006, Τόμος 1, σελ. 567-574
77. Σταθοπούλου, Β. Δ., 2005, “Σεισμική Μόνωση Τοίχων Εδαφικής Αντιστήριξης με Γεωαφρό Διογκωμένης Πολυστερίνης – Παραμετρική Αριθμητική Ανάλυση”, *Διατριβή για ΜΔΕ*, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Ιούλιος 2005