

Συμπεριφορά Γεωαφρών EPS σε Θλίψη υπό Μόνιμα Φορτία

Behavior of EPS Geof foam in Compression

ΜΙΣΥΡΛΗΣ, Ε.Γ. Πολιτικός Μηχανικός, Διδάκτορας, Παν/μιο Πατρών
ΠΑΠΑΣΤΥΛΙΑΝΟΥ, Π. Πολιτικός Μηχανικός, Υποψήφιος Διδάκτορας, Παν/μιο Πατρών
ΑΤΜΑΤΖΙΔΗΣ, Δ. Κ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής, Παν/μιο Πατρών
ΧΡΥΣΙΚΟΣ, Δ.Α. Πολιτικός Μηχανικός, Λέκτορας, Παν/μιο Πατρών

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης, τριαξονικής φόρτισης και θλιπτικού ερπυσμού εκτελέστηκαν σε δείγματα γεωαφρών EPS με πυκνότητα 10 ως 35 kg/m³. Το μέγεθος και το σχήμα των δοκιμών έχουν αμελητέα επίδραση στην τάση διαρροής και στην θλιπτική αντοχή, αλλά επηρεάζουν σημαντικά το αρχικό μέτρο ελαστικότητας. Στην ελαστική περιοχή, ο λόγος Poisson έχει θετικές τιμές, όμως, αναμένεται συστολική συμπεριφορά σε μεγαλύτερες παραμορφώσεις. Εφαρμογή της αρχής επαλληλίας χρόνου–θερμοκρασίας καταλήγει σε καταστατική σχέση που περιγράφει τη συμπεριφορά των γεωαφρών EPS σε ερπυσμό για ορθές τάσεις ως 35% της θλιπτικής αντοχής ή για αρχικές παραμορφώσεις ως 0,6%.

ABSTRACT: Unconfined, triaxial and creep compression tests were conducted on EPS geof foam samples with densities from 10 to 35kg/m³. Sample shape and size have insignificant effects on measured yield stress and strength in unconfined compression, but significantly affect initial modulus of elasticity values. Within the elastic range, Poisson's ratio values are positive but contractive behavior is expected for higher strains. The time-temperature superposition principle was applied and a constitutive relation was obtained describing creep response for normal stresses lower than 35% of the compressive strength, or for initial axial strains less than 0.6%.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Βιομηχανικά παραγόμενα πρίσματα διογκωμένου πολυστυρένιου (“γεωαφροί EPS”) χρησιμοποιούνται σε γεωτεχνικές κατασκευές ως ελαφρύ επίχωμα ή ως συμπιεστό παρέμβλημα. Από δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης προκύπτουν τιμές για τις περισσότερες από τις απαραίτητες παραμέτρους σχεδιασμού δηλαδή, για το αρχικό μέτρο ελαστικότητας, E_i , την τάση διαρροής, σ_y , και τη θλιπτική αντοχή, σ_{c10} (ορίζεται συνήθως ως η αξονική τάση για παραμόρφωση ίση προς 10%). Επί πλέον, απαιτείται συχνά ο καθορισμός του ορίου ελαστικής συμπεριφοράς, ο προσδιορισμός τιμών του λόγου Poisson και η πρόβλεψη της ερπυστικής συμπεριφοράς υπό θλιπτικά φορτία. Προηγούμενες έρευνες έχουν καταλήξει σε συσχετισμούς μεταξύ τιμών των μηχανικών ιδιοτήτων σ_y , σ_{c10} και E_i και της

ονομαστικής πυκνότητας των γεωαφρών EPS (π.χ. Magnan and Serratrice, 1989, Horvath, 1995, Duskon, 1997, Elragi et al., 2001, O'Brien, 2001). Παρατηρείται όμως ότι (α) υπάρχουν περιορισμένες πληροφορίες σχετικά με την επίδραση που έχουν διάφορες παράμετροι εκτέλεσης των εργαστηριακών δοκιμών στις μετρούμενες τιμές των ιδιοτήτων, (β) οι μετρημένες ή υποτιθέμενες τιμές του λόγου Poisson παρουσιάζουν μεγάλη διασπορά και (γ) οι πληροφορίες για τη συμπεριφορά των γεωαφρών EPS σε συνθήκες τριαξονικής θλίψης είναι εξαιρετικά περιορισμένες (Anasthas et al., 2001, Preber et al. 1994).

Σχετικά με την συμπεριφορά των γεωαφρών EPS σε ερπυσμό έχουν προταθεί κριτήρια σχεδιασμού (Horvath, 1995, Duskon, 1997, IAPE, 1997) καθώς και καταστατικές σχέσεις (Magnan and Serratrice, 1989,

Horvath, 1998, Srirajan et al., 2001) που όμως δεν συμφωνούν μεταξύ τους ως προς την πρόβλεψη της ερπυστικής συμπεριφοράς επειδή έχουν βασιστεί σε αποτελέσματα δοκιμών με διαφορετική χρονική διάρκεια αλλά και με δοκίμια διαφορετικού μεγέθους και λόγου ύψους/διάμετρο.

Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται συνοπτικά τα κύρια αποτελέσματα εκτεταμένης εργαστηριακής διερεύνησης των μηχανικών ιδιοτήτων και της συμπεριφοράς βιομηχανικά παραγόμενων πρισμάτων γεωαφρών EPS. Ειδικότερα, ποσοτικοποιείται η επίδραση παραμέτρων της δοκιμής ανεμπόδιστης θλίψης στις μετρούμενες τιμές των ιδιοτήτων, γίνεται σύγκριση της συμπεριφοράς υπό συνθήκες ανεμπόδιστης και τριαξονικής θλίψης και παρουσιάζεται καταστατική σχέση που περιγράφει την ερπυστική συμπεριφορά των γεωαφρών EPS.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ

Τα απαραίτητα δοκίμια κόπηκαν διάσπαρτα από τον όγκο πρισμάτων γεωαφρού EPS με διαστάσεις 2,5m x 1,0m x 0,5m και ονομαστική πυκνότητα 10, 15, 20, 25, 30 και 35kg/m³. Στο κείμενο αυτό οι γεωαφροί διαφοροποιούνται με βάση την ονομαστική πυκνότητα παρ' όλο που η θλιπτική αντοχή καθιερώνεται πλέον ως η παράμετρος που διαφοροποιεί τις ποιότητες του υλικού.

Οι δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης εκτελέστηκαν με σταθερό ρυθμό παραμόρφωσης 10%/min σε (α) κύβους ακμής 50, 100, 150 και 500mm, (β) κυλίνδρους διαμέτρου 50, 100, 150 και 250mm και λόγου ύψους/διάμετρο 1,0 και (γ) κυλίνδρους διαμέτρου 100mm και λόγου ύψους/διάμετρο 0,5, 1,0 και 2,0. Σκοπός των δοκιμών ήταν η ποσοτικοποίηση της επίδρασης της γεωμετρίας του δοκιμίου στις μετρούμενες τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων.

Οι δοκιμές τριαξονικής φόρτισης έγιναν σε κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου 50mm και λόγου ύψους/διάμετρο 2,0. Στα δοκίμια εφαρμόστηκε αρχικά ισότροπη συμπίεση (πίεση θαλάμου από 5% ως 80% της τάσης διαρροής των γεωαφρών) και ακολούθως αξονική φόρτιση με σταθερό ρυθμό παραμόρφωσης (1%/min). Σε κάθε δοκιμή, επιτρεπόταν η "στράγγιση" του αέρα των κενών του δοκιμίου και καταγραφόταν η μεταβολή του όγκου του δοκιμίου για τον υπολογισμό της μέσης εγκάρσιας παραμόρφωσης.

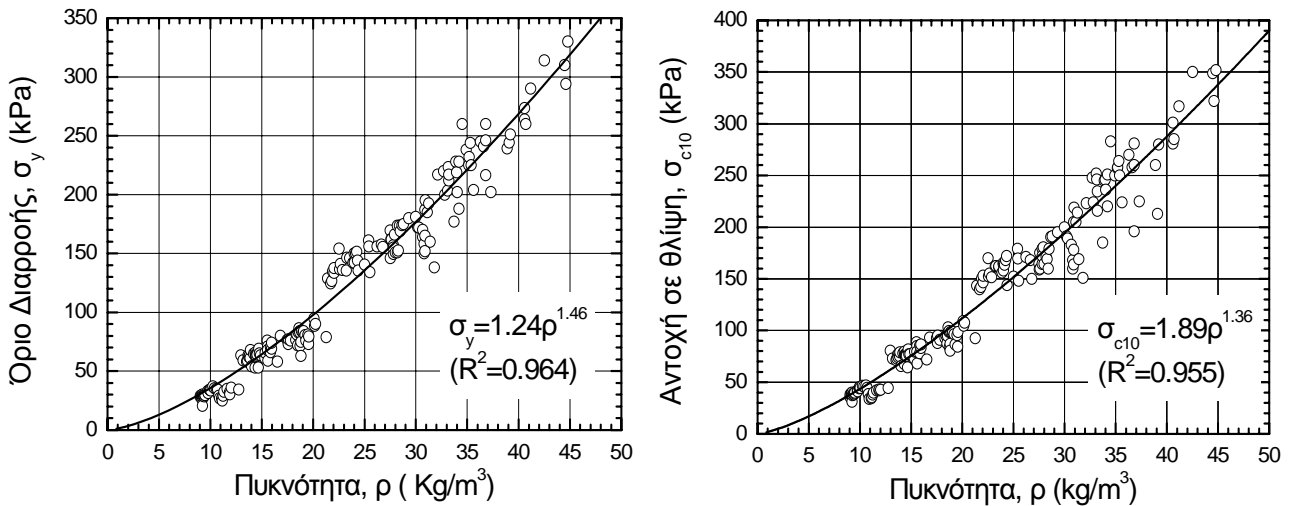
Η αρχή επαλληλίας χρόνου-θερμοκρασίας (ASTM, 1997) εφαρμόστηκε για την πρόβλεψη

της ερπυστικής συμπεριφοράς των γεωαφρών EPS. Για τις δοκιμές ερπυσμού χρησιμοποιήθηκαν κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου 100mm και λόγου ύψους/διάμετρο 2,0. Δοκίμια αυτού του μεγέθους έχουν εντελώς όμοια συμπεριφορά σε θλίψη με κύβους ακμής 500mm που θεωρούνται αντιπροσωπευτικοί της συμπεριφοράς των γεωαφρών EPS στο πεδίο (Atmatzidis and Missirlis, 2002). Κάθε δοκιμή είχε διάρκεια τριών μηνών. Εφαρμόστηκαν ορθές τάσεις που προκαλούσαν αρχικές αξονικές παραμορφώσεις 0,25%, 0,50%, 0,62%, 0,77%, 0,88% και 1,00%. Οι θερμοκρασίες θαλάμου ήταν 20, 30, 40 και 50°C και η σχετική υγρασία σταθερή και ίση προς 65%.

3. ΑΝΕΜΠΟΔΙΣΤΗ ΘΛΙΨΗ

Τα περισσότερα από τα αποτελέσματα των δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης έχουν παρουσιαστεί σε προηγούμενες εργασίες (Atmatzidis et al., 2001, Atmatzidis and Missirlis, 2002). Παρατηρήθηκε ότι το σχήμα, το μέγεθος και ο λόγος ύψους/διάμετρο των δοκιμίων είχαν αμελητέα επίδραση στις τιμές της τάσης διαρροής και της θλιπτικής αντοχής. Αν θεωρηθούν ως τιμές αναφοράς τα αποτελέσματα που προκύπτουν για κυβικά δοκίμια ακμής 50mm, η αύξηση του όγκου ισομετρικών δοκιμίων κατά τρεις τάξεις μεγέθους προκαλεί αύξηση της τάσης διαρροής και της θλιπτικής αντοχής έως και κατά 10%. Για δοκίμια με λόγο ύψους/διάμετρο 0,5 και 2,0 παρατηρήθηκε, αντίστοιχα, υποεκτίμηση και υπερεκτίμηση (-5% ως +5%) των τιμών αυτών των δύο ιδιοτήτων. Τα αποτελέσματα όλων των δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης παρουσιάζονται στο Σχήμα 1. Οι συντελεστές συσχέτισης, R², που προκύπτουν με εφαρμογή εκθετικής συνάρτησης έχουν πολύ ικανοποιητικές τιμές.

Σε αντίθεση με τα προηγούμενα, αύξηση του όγκου ισομετρικών δοκιμίων κατά τρεις τάξεις μεγέθους συνεπάγεται αύξηση της τιμής του αρχικού μέτρου ελαστικότητας κατά 100%. Ο ρυθμός μεταβολής της τιμής του αρχικού μέρους ελαστικότητας σε σχέση με τον όγκο των δοκιμίων φαίνεται στο Σχήμα 2α. Επί πλέον, παρατηρήθηκε ότι δοκίμια με λόγο ύψους/διάμετρο 0,5 και 2,0 είχαν, αντίστοιχα, χαμηλότερες (κατά 50%) και υψηλότερες (κατά 100%) τιμές του αρχικού μέτρου ελαστικότητας σε σχέση με αυτό των ισομετρικών δοκιμίων. Η εξάρτηση της τιμής του αρχικού μέτρου ελαστικότητας από το μέγεθος του δοκιμίου

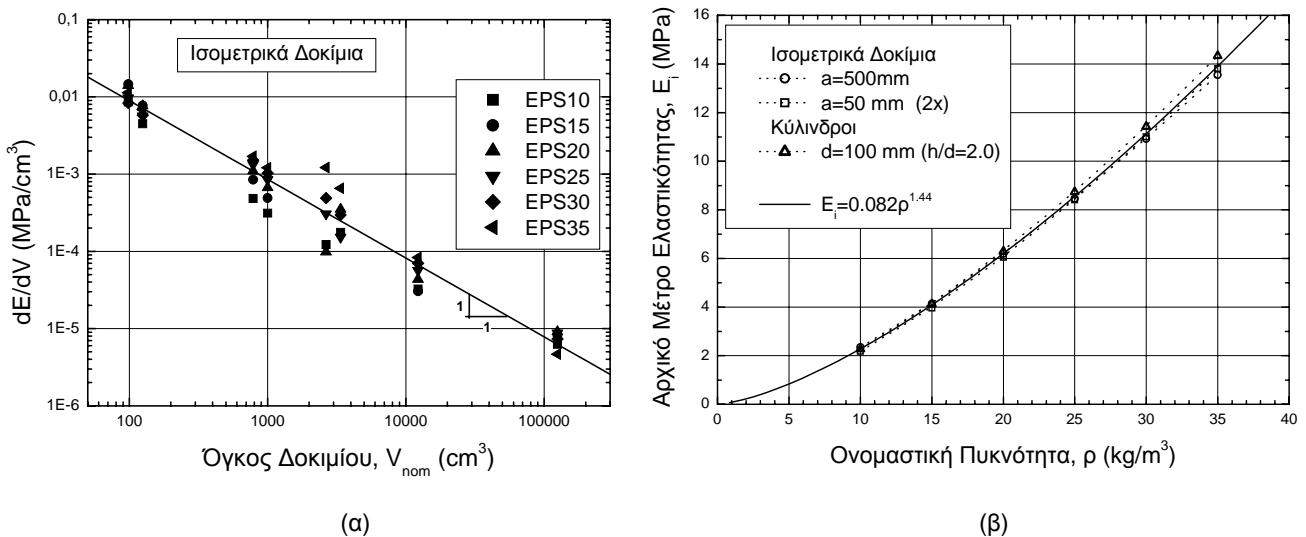


Σχήμα 1. Τάση διαρροής και θλιπτική αντοχή γεωαφρών EPS από δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης
 Figure 1. EPS geofabric yield stress and compressive strength from unconfined compression tests

έχει καταγραφεί και από τους Elragi et al. (2001). Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2β, κυβικά δοκίμια με ακμή 500mm (ίση με το πάχος των βιομηχανικά παραγόμενων πρισμάτων), έχουν μέτρο ελαστικότητας ίσο με αυτό την κυλινδρικών δοκιμών διαμέτρου 100mm και ύψους 200mm και διπλάσιο των κυβικών δοκιμών ακμής 50mm.

Η επίδραση του μεγέθους και του σχήματος του δοκιμίου στις μετρούμενες τιμές του αρχικού μέτρου ελαστικότητας αποδίδεται σε δύο παράγοντες: (α) “συμβατικός” τρόπος δοκιμής, δηλαδή με μέτρηση της συνολικής

αξονικής παραμόρφωσης του δοκιμίου μεταξύ των πλακών φόρτισης και (β) τριβές μεταξύ πλακών φόρτισης και βάσεων του δοκιμίου. Η κοπή και διαμόρφωση των δοκιμών γίνεται με θερμαινόμενο σύρμα με αποτέλεσμα (α) τη δημιουργία μιας εξωτερικής στιβάδας κυψελών του υλικού που από “κλειστού” τύπου μετατρέπονται, λόγω κοπής, σε “ανοικτού” τύπου και (β) στην εξωτερική περιοχή του δοκιμίου αναπτύσσονται παραμορφώσεις λόγω θερμοκρασιακής διαφοράς που μπορεί να υπερβαίνουν το όριο ελαστικής συμπεριφοράς του υλικού. Με βάση στοιχεία από



Σχήμα 2. Αρχικό μέτρο ελαστικότητας από δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης: (α) μεταβολή με τον όγκο του δοκιμίου και (β) συσχέτιση με την ονομαστική πυκνότητα
 Figure 2. Initial modulus of elasticity from unconfined compression tests: (a) rate of change with sample volume and (b) correlation to nominal density.

τους Gibson and Ashby (1997), έχει υπολογιστεί (Μισυρλής, 2003) ότι δημιουργείται στο δοκίμιο μια εξωτερική ζώνη με πάχος περίπου 2,2mm και μέτρο ελαστικότητας περίπου το 10% του αρχικού μετρου ελαστικότητας του αδιατάρακτου υλικού. Επειδή το πάχος αυτής της διαταραγμένης ζώνης είναι σταθερό και ανεξάρτητο του μεγέθους του δοκιμίου, η επίδρασή της στην τιμή του αρχικού μέτρου ελαστικότητας μειώνεται με την αύξηση του μεγέθους του δοκιμίου. Έχει επίσης τεκμηριωθεί ότι τα δοκίμια που ελέγχονται σε συνθήκες τριαξονικής φόρτισης, εμφανίζουν μικρότερες τιμές του μέτρου ελαστικότητας σε σύγκριση με δοκίμια που ελέγχονται σε ανεμπόδιστη θλίψη. Θεώρηση του υλικού ως ελαστικού, υποδεικνύει ότι οι εγκάρσιες τάσεις που οφείλονται στην ύπαρξη τριβών μεταξύ πλακών φόρτισης και δοκιμίου περιορίζονται στο χώρο ενός κώνου 45° σε κάθε άκρο του δοκιμίου. Ο όγκος του δοκιμίου που επηρεάζεται κατ' αυτό τον τρόπο μειώνεται με την αύξηση του λόγου ύψους/διάμετρο του δοκιμίου.

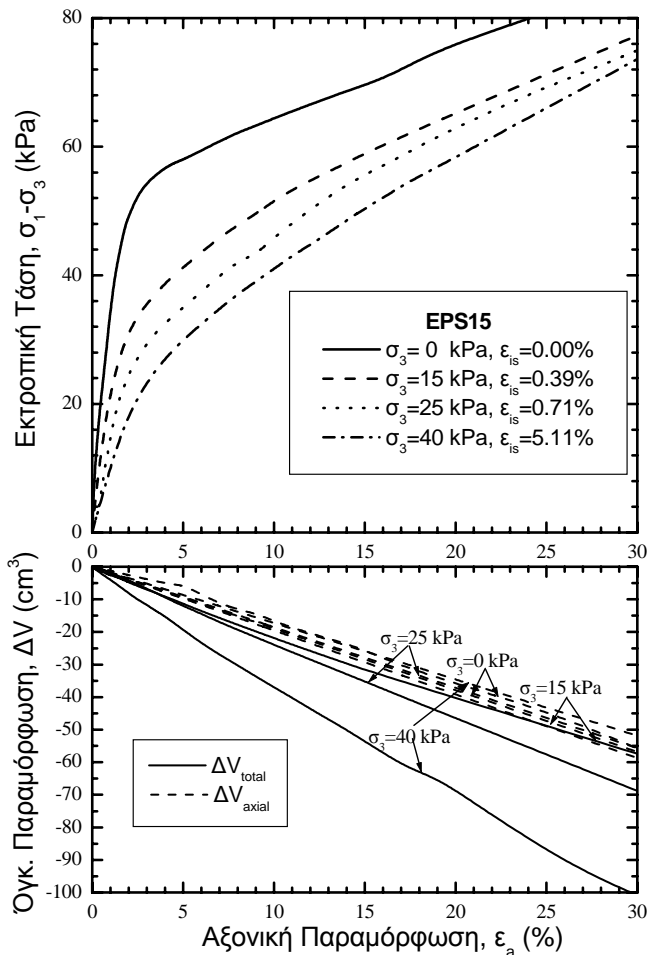
4. ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ

Τα τυπικά αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο Σχήμα 3α είναι χαρακτηριστικά της συμπεριφοράς των δοκιμίων που υποβλήθηκαν αρχικά σε ισότροπη συμπίεση και ακολούθως σε αξονική φόρτιση. Για όλα τα δοκίμια που ελέγχθηκαν, μετρήθηκαν μικρότερη τάση διαρροής, θλιπτική αντοχή και μέτρο ελαστικότητας σε σύγκριση με όμοια δοκίμια που ελέγχθηκαν σε ανεμπόδιστη θλίψη. Πάντως, για χαμηλές τιμές ισότροπης συμπίεσης (15 kPa ως 25 kPa ή 8% ως 26% της τάσης διαρροής) δηλαδή για τάσεις σαφώς μέσα στο πεδίο ελαστικής συμπεριφοράς των γεωαφρών EPS, οι τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων διέφεραν ελάχιστα από τις τιμές που προέκυπταν από δοκιμές ανεμπόδιστη θλίψης. Οι διαφορές γίνονται έντονες καθώς αυξάνεται η τιμή της τάσης υπό την οποία γίνεται η ισότροπη συμπίεση με πιο έντονη την επίδραση στο μέτρο εφελευσμού. Οι τυπικές καμπύλες μεταβολής όγκου που φαίνονται στο Σχήμα 3β υποδεικνύουν ότι (α) ανεξάρτητα από την πίεση θαλάμου, σ_3 , αύξηση της αξονικής παραμόρφωσης συνεπάγεται μείωση του συνολικού όγκου του δοκιμίου (ΔV_{total}) και (β) η μεταβολή όγκου λόγω αξονικής παραμόρφωσης (ΔV_{axial}) είναι πάντα μικρότερη από τη συνολική μεταβολή του όγκου. Κατά συνέπεια, η μέση εγκάρσια παραμόρφωση κατά το στάδιο αξονικής φόρτισης είναι σαφώς συστολική.

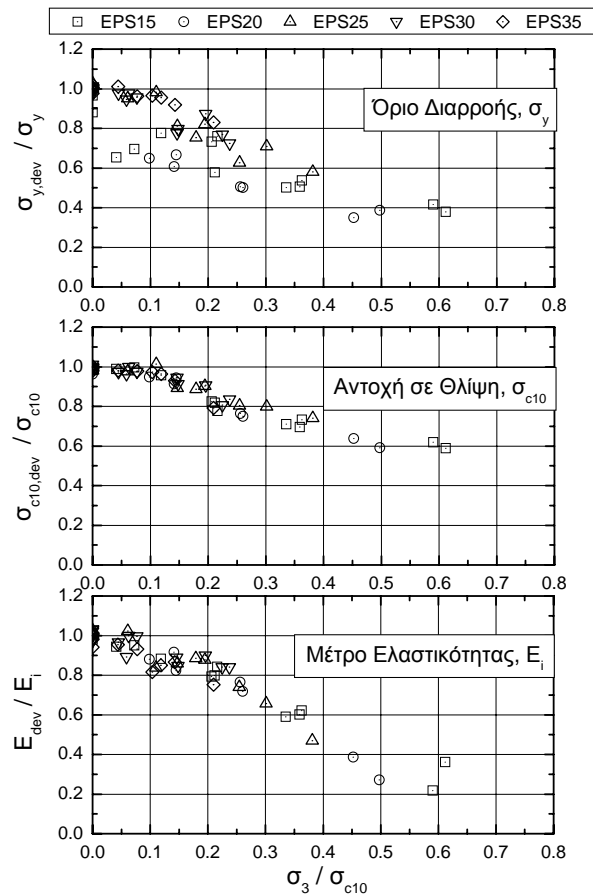
Με βάση τις μετρήσεις μεταβολής του όγκου των δοκιμίων κατά το στάδιο της ισότροπης συμπίεσης υπολογίστηκαν οι τιμές του λόγου Poisson που φαίνονται στο Σχήμα 4α. Τιμές για το μέτρο ελαστικότητας και για το όριο ελαστικής συμπεριφοράς προέκυψαν από δοκιμές ανεμπόδιστη θλίψης ($\sigma_3=0$). Οι τιμές του λόγου Poisson είναι θετικές όταν οι αξονικές παραμορφώσεις είναι μικρότερες του ορίου ελαστικής παραμόρφωσης, μηδενίζονται περίπου στο όριο ελαστικής παραμόρφωσης και λαμβάνουν αρνητικές τιμές πέρα από αυτό το όριο. Στο Σχήμα 4β παρουσιάζονται τιμές του λόγου Poisson που υπολογίστηκαν από μετρήσεις που έγιναν κατά το δεύτερο στάδιο φόρτισης (επιβολή αξονικού φορτίου). Οι τιμές αυτές υπολογίστηκαν για αξονική παραμόρφωση, ϵ_a , ίση προς 0,5% επί πλέον της παραμόρφωσης που προκλήθηκε από την ισότροπη συμπίεση. Με ελάχιστες εξαιρέσεις, οι τιμές του λόγου Poisson είναι αρνητικές. Οι παρατηρήσεις αυτές θα πρέπει να θεωρηθούν ποιοτικές αφού υπολογισμοί του λόγου Poisson δεν πρέπει να γίνονται για παραμορφώσεις πέραν του ορίου ελαστικής συμπεριφοράς του υλικού.

5. ΕΡΠΥΣΜΟΣ

Για κάθε δοκιμή ερπυσμού υπολογίστηκε η αξονική παραμόρφωση ως συνάρτηση του χρόνου με βάση τις μετρούμενες τιμές αξονικής συμπίεσης και του αρχικού ύψους του δοκιμίου. Ακολούθως, υπολογίστηκαν οι αντίστοιχες τιμές του χρονικά εξαρτώμενου μέτρου ελαστικότητας ή μέτρου ενδοτικότητας, $E(t)$. Τυπικό παράδειγμα καμπυλών μέτρου ενδοτικότητας ως συνάρτησης του χρόνου δίνεται στο Σχήμα 5α (μαύρα σύμβολα). Στο ίδιο Σχήμα δίνεται τυπικό παράδειγμα εφαρμογής της αρχής επαλληλίας χρόνου - θερμοκρασίας (λευκά σύμβολα). Οι καμπύλες δεδομένων που προέκυψαν για θερμοκρασίες υψηλότερες της θερμοκρασίας αναφοράς (20°C) μετατοπίστηκαν προς τα δεξιά έως ότου υπήρξε ικανοποιητική σύμπτωση τμημάτων των καμπυλών που προέκυψαν από δοκιμές σε διαδοχικές θερμοκρασίες. Η επικάλυψη μεταξύ διαδοχικών καμπυλών είχε έκταση τουλάχιστον δύο λογαριθμικών κύκλων στην κλίμακα του χρόνου. Το μέγεθος της απαιτούμενης μετατόπισης κάθε καμπύλης (συντελεστής μετατόπισης) δεν επηρεαζόταν σημαντικά από την ονομαστική πυκνότητα του γεωαφρού EPS ή από την εφαρμοζόμενη σταθερή ορθή τάση αλλά εξαρτώνταν από τη θερμοκρασία δοκιμής.



(α)



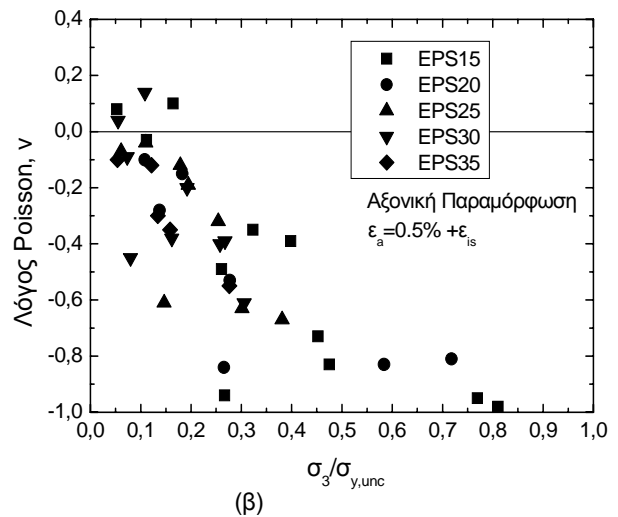
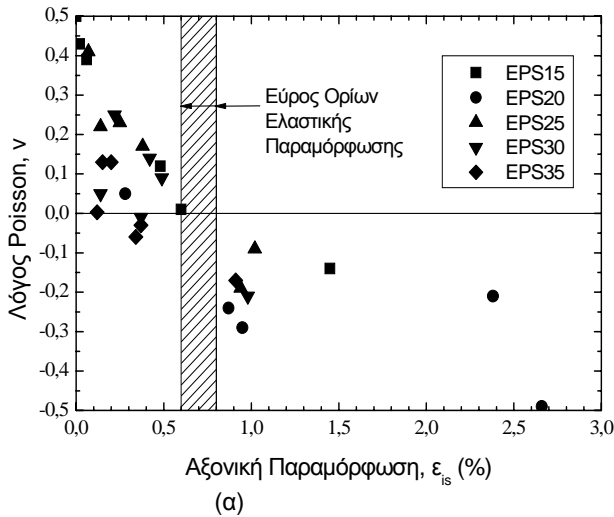
(β)

Σχήμα 3. Δοκιμές τριαξονικές φόρτισης: (α) τυπικές καμπύλες τάσεων – παραμορφώσεων και μεταβολής όγκου και (β) επίδραση της περιβάλλουσας τάσης στις τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων. Figure 3. Triaxial compression tests: (a) typical stress-strain and volume change curves and (b) effect of confining stress on mechanical behavior parameter values.

Σύμφωνα με τις αρχές της γραμμικής ιξωδοελαστικότητας, οι τιμές του συντελεστή μετατόπισης πρέπει να ακολουθούν τη σχέση του Arrhenius (Drozdov, 1998) και να επιτρέπουν τον υπολογισμό τιμής για την ενθαλπία ενεργοποίησης που για πολυστυρένιο κυμαίνεται μεταξύ 43 και 52 kcal/mol/k (Hart et al., 1973). Από γραμμική συσχέτιση των μέσων όρων των τιμών που προέκυψαν από τα πειραματικά δεδομένα, υπολογίστηκε τιμή της ενθαλπίας ενεργοποίησης ίση προς 48,1 kcal/mol/k πράγμα που επιβεβαιώνει ότι η αρχή επαλληλίας χρόνου – θερμοκρασίας ισχύει και για τους γεωαφρούς EPS.

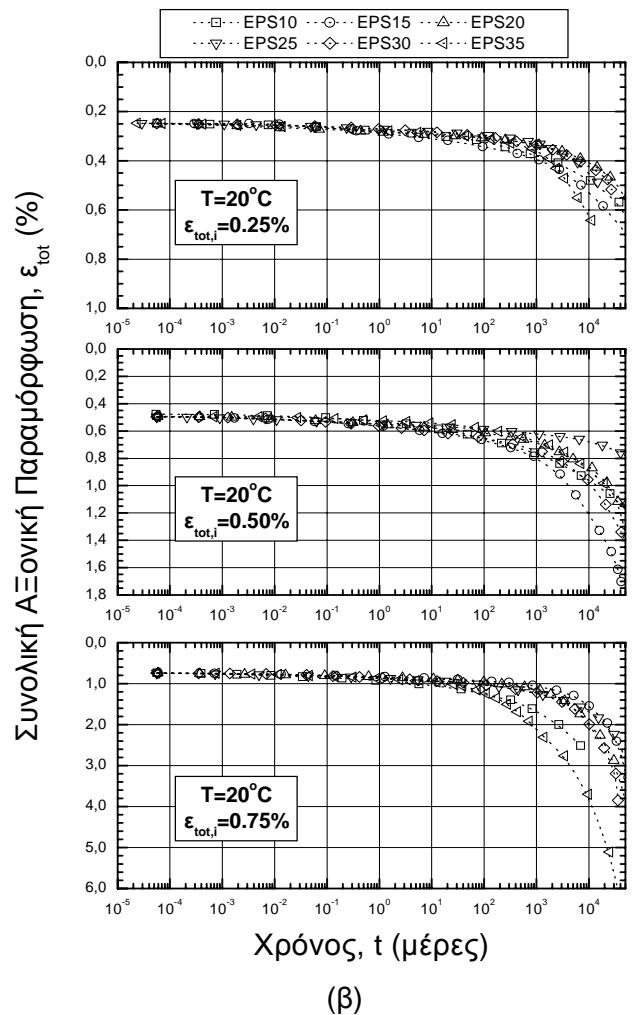
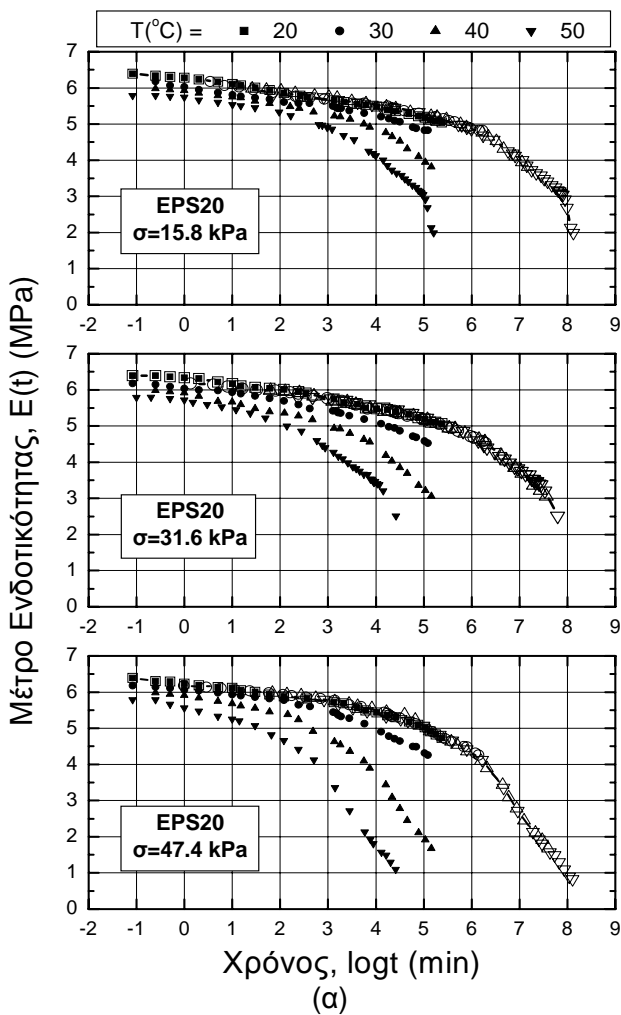
Οι τελικές καμπύλες μέτρου ενδοτικότητας – χρόνου χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της εξέλιξης της συνολικής αξονικής παραμόρφωσης ως συνάρτησης του χρόνου και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 5β

για όλους τους γεωαφρούς EPS που ελέγχθηκαν. Παρατηρείται ότι οι πληροφορίες που παρέχονται καλύπτουν περίοδο τουλάχιστον 100 ετών και ότι, γενικά, η ερπυστική συμπεριφορά δεν διαφοροποιείται αισθητά ανάλογα με τον τύπο (ονομαστική πυκνότητα) του γεωαφρού EPS. Με βάση τα δεδομένα του Σχήματος 5β, διαμορφώθηκαν ισόχρονες καμπύλες για κάθε τύπο γεωαφρού EPS που ελέγχθηκε. Παρατηρήθηκε ότι η συμπεριφορά όλων των τύπων γεωαφρού EPS παρουσίασε απόκλιση από τη γραμμικότητα μετά από 100 έως 180 ημέρες μόνο για τις υψηλότερες τιμές των ορθών τάσεων που εφαρμόστηκαν. Για τη διατύπωση καταστατικής σχέσης που να περιγράφει την ερπυστική συμπεριφορά στη γραμμική περιοχή και να ισχύει για όλους τους τύπους γεωαφρού EPS, σχεδιάστηκαν κανονικοποιημένες ισόχρονες καμπύλες με αναγωγή



Σχήμα 4. Τιμές του λόγου Poisson για γεωαφρούς EPS από δοκιμές: (α) ισότροπης συμπίεσης και (β) τριαξονικής φόρτισης.

Figure 4. EPS geof foam Poisson ratio values from (a) hydrostatic and (b) triaxial compression tests.



Σχήμα 5. Δοκιμές ερπισμού: (α) τυπική εφαρμογή της αρχής επαλληλίας χρόνου-θερμοκρασίας και (β) σύνθεση αποτελεσμάτων

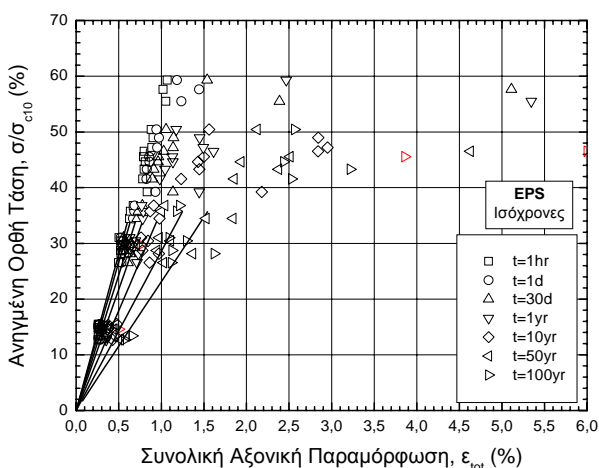
Figure 5. Creep tests: (a) typical application of the time – temperature superposition principle and (b) synthesis of results.

των ορθών τάσεων σε ποσοστό της θλιπτικής αντοχής, σ_{c10} , του κάθε γεωαφρού. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 6 όπου φαίνονται και οι γραμμικές συσχετίσεις (μέσω της αρχής των αξόνων) για τα σημεία που αντιστοιχούν σε αρχική αξονική παραμόρφωση 0,25%, 0,50% και 0,62%. Οι τιμές του συντελεστή συσχέτισης, R^2 , για αυτές τις συσχετίσεις κυμαίνονται μεταξύ 0,836 και 0,985. Η κλίση των κανονικοποιημένων ισόχρονων καμπυλών συσχετίζεται εξαιρετικά με το χρόνο ($R^2=0,999$) με εκθετική συνάρτηση. Κατά συνέπεια, διατυπώνεται καταστατική σχέση που περιγράφει τη γραμμική ιξωδοελαστική συμπεριφορά των γεωαφρών EPS:

$$\sigma / \sigma_{c10} = [59,374 - 5,982(t/t_0)^{0,167}] \cdot \varepsilon_{tot} \quad (1)$$

$$\sigma / \sigma_{c10} \leq 35\% \quad \text{ή} \quad \varepsilon_{tot}(t=0) \leq 0.60\%$$

όπου ο χρόνος, t , είναι σε ημέρες και t_0 είναι κατάλληλος συντελεστής αναγωγής τυχαίων μονάδων χρόνου σε ημέρες ώστε ο λόγος t/t_0 να είναι αδιάστατος. Για μηδενικό χρόνο, από την Εξίσωση 1 προκύπτει η τιμή του αρχικού μέτρου ελαστικότητας, E_i , που διαφέρει από τις τιμές που προκύπτουν από δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης κατά -5% και +11%. Επί πλέον, υπολογίστηκε ότι προβλέψεις με βάση την Εξίσωση 1 διαφέρουν από το μέσο όρο των πειραματικών αποτελεσμάτων των δοκιμών ερπυσμού το πολύ κατά 5%, εφ' όσον οι αρχικές αξονικές παραμορφώσεις δεν υπερβαίνουν το 0,62%.



Σχήμα 6. Κανονικοποιημένες ισόχρονες καμπύλες

Figure 6. Normalized isochronous curves

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν από αυτή την εργαστηριακή διερεύνηση εξάγονται τα εξής κύρια συμπεράσματα:

1. Το σχήμα, το μέγεθος και ο λόγος ύψους /διάμετρο των δοκιμών γεωαφρών EPS που ελέγχονται σε ανεμπόδιστη θλίψη έχουν αμελητέα επίδραση στις μετρούμενες τιμές της τάσης διαρροής και της θλιπτικής αντοχής. Το μέγεθος και ο λόγος ύψους/διάμετρο των δοκιμών έχουν σημαντική επίδραση στις μετρούμενες τιμές του αρχικού μέτρου ελαστικότητας. Όταν για το σχεδιασμό έργων χρησιμοποιούνται αποτελέσματα από δοκιμές σε κυβικά δοκίμια ακμής 50mm οι αναμενόμενες παραμορφώσεις μπορεί να υπερεκτιμηθούν ως και κατά 100%.
2. Η μηχανική συμπεριφορά των γεωαφρών EPS, όπως προκύπτει από δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης, είναι αρκούτως αντιπροσωπευτική της συμπεριφοράς των υλικών αυτών στο πεδίο εφ' όσον οι εφαρμοζόμενες ορθές τάσεις είναι μικρότερες του ορίου ελαστικής συμπεριφοράς τους. Όταν η τασική όδευση που ακολουθείται είναι πιο πολύπλοκη, όπως "στερεοποίηση" και ακολούθως "διάτμηση", οι γεωαφροί EPS εμφανίζουν κατώτερες τιμές μηχανικών ιδιοτήτων σε σύγκριση με συνθήκες ανεμπόδιστης θλίψης.
3. Για χαμηλά επίπεδα ορθών τάσεων που είναι χαρακτηριστικά των υπερελαφρών επιχωμάτων, ο λόγος Poisson των γεωαφρών EPS έχει θετική τιμή που σπάνια υπερβαίνει το 0,15 και μειώνεται με την αύξηση των αξονικών παραμορφώσεων προς το όριο ελαστικής συμπεριφοράς, πέραν του οποίου, οι γεωαφροί EPS εμφανίζουν συστολική συμπεριφορά.
4. Η αρχή επαλληλίας χρόνου- θερμοκρασίας ισχύει για τους γεωαφρούς EPS και για θερμοκρασίες ως 50°C. Με αυτή τη μέθοδο, πειραματικά δεδομένα από σχετικά βραχυχρόνιες δοκιμές (ως 3 μήνες η κάθε δοκιμή, 4 θερμοκρασίες ελέγχου) μπορούν να επεκταθούν και να καλύψουν χρονική περίοδο 100 ετών για θερμοκρασία αναφοράς 20°C.
5. Η ερπυστική συμπεριφορά των γεωαφρών EPS δεν εξαρτάται από την ονομαστική πυκνότητα για τιμή από 10 ως 35 kg/m³. Διατυπώθηκε καταστατική σχέση, που μπορεί να εφαρμοστεί αν είναι γνωστή η

τιμή της θλιπτικής αντοχής, σ_{c10} , από δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης, και περιγράφει τη γραμμική ιξωδοελαστική συμπεριφορά των γεωαφρών EPS για τουλάχιστον 100 χρόνια υπό ορθές τάσεις μικρότερες του 35% της σ_{c10} , ή υπό αρχικές αξονικές παραμορφώσεις μικρότερες του 0,6%. Η συνολική παραμόρφωση μετά από 50 χρόνια αναμένεται να είναι διπλάσια της αρχικής αξονικής παραμόρφωσης.

7. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ - ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΕΙΣ

Η έρευνα χρηματοδοτήθηκε εν μέρει από τη Γ.Γ.Ε.Τ. (ΥΠΕΡ97 ΥΡ3-67), το Πανεπιστήμιο Πατρών (Καραθεοδωρής 2000) και τον Ελληνικό Σύνδεσμο Παραγωγών Προϊόντων Διογκωμένου Πολυστυρενίου.

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

AIPE (1997), "Isolare le Fondazioni con l' EPS", Polistirene Espanso Sinterizzato, BE-MA editrice, Italy.

Anasthas, N., Negussey, D. and Sun, M. (2001), "Effect of confining stress on compressive strength of EPS geof foam", Proc. "EPS 2001", 3rd Int. Conf., Salt Lake City, USA.

ASTM (1997), "Standard test method for compressive and flexural creep and creep-rupture of plastic lumber and shapes", Standard D6112, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, USA.

Atmatzidis, D.K. and Missirlis, E.G. (2002), "Behavior of EPS geof foam in compression", Proc. 7th Int. Conf. on Geosynthetics, Nice, France, pp. 143-146.

Atmatzidis, D.K., Missirlis, E.G. and Chrysikos, D.A. (2001), "An investigation of EPS geof foam behavior in compression", Proc. "EPS 2001", 3rd Int. Conf., Salt Lake City, USA.

Drozov, A.D. (1998), "Mechanics of Viscoelastic Solids", John Wiley and Sons, Baffins Lane, West Sussex, England.

Duskov, M. (1997) "Materials research on EPS20 and EPS15 under representative conditions in pavement structures", Geotextiles and Geomembranes, Vol. 15 (1-3), pp. 147-181.

Elragi, A., Negussey, D. and Kyanka, G. (2001), "Sample size effects on the behavior of EPS geof foam", Soft Ground Technology Conf., ASCE Geotechnical

Special Publication No. 112, New York, USA.

Gibson, L.J. and Ashby, M.F. (1997), "Cellular Solids: Structure and Properties", Cambridge University Press, UK.

Hart, G.M., Balazs, C.F. and Clipper, R.B. (1973), "Prediction of the long term compressive creep behavior of cellular polystyrene", Journal of Cellular Plastics, May/June, pp. 139-144.

Horvath, J.S. (1995), "Geofoam Geosynthetic", Horvath Engineering P.C., Scarsdale, USA.

Horvath, J.S. (1998), "Mathematical modelling of the stress-strain-time behavior of geosynthetics using the Findley equation: General theory and application to EPS-block geof foam", Res. Rep. CE/GE-98-3, Manhattan College, New York, USA.

Magnan, J.P. and Serratrice, J.F. (1989), "Proprietes mecaniques du polystyrene expanse pour des applications en remblai routier", Bulletin Liaison Laboratoire Ponts e Chaussees, Vol. 164, pp. 25-31, Paris, France.

Μισυρλής, Ε.Γ. (2003), "Συμβολή στην τεκμηρίωση της μηχανικής συμπεριφοράς γεωαφρών EPS για γεωτεχνικές κατασκευές", Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Πολ. Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών.

O' Brien, A.S. (2001), "EPS behavior during static and cyclic loading from 0.05% strain to failure", Proc. "EPS 2001", 3rd Int. Conf. Salt Lake City, USA.

Preber, T., Bang, S., Ching, Y. and Cho, Y. (1994), "Behavior of expanded polystyrene blocks", Transportation Research Record, Vol. 1462, pp. 36-46.

Srirajan, S., Negussey, D. and Anasthas, N. (2001), "Creep behavior of EPS geof foam", Proc. "EPS 2001", 3rd Int. Conf., Salt Lake City, USA.