

# ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΠΟΥ ΠΕΡΙΕΧΕΙ ΥΨΗΛΗΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΠΟΛΥΑΙΘΥΛΕΝΙΟ ΩΣ ΑΔΡΑΝΕΣ

Σταματία Γκαβέλα

*Χημικός Μηχανικός, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο*

Στυλιανός Κόλιας

*Ένωση Τσιμεντοβιομηχανιών Ελλάδος*

Κωνσταντίνος Κορδάτος

*Λέκτορας, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Χημικών Μηχανικών*

Βασιλεία Κασελούρη – Ρηγοπούλου

*Καθηγήτρια, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Χημικών Μηχανικών*

*Λέξεις κλειδιά: Σκυρόδεμα, αδρανή, θερμοπλαστικά απορρίμματα*

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Στην παρούσα εργασία γίνεται μελέτη της χρήσης θερμοπλαστικών απορριμμάτων για την αντικατάσταση μέρους των συμβατικών αδρανών του σκυροδέματος. Παρασκευάστηκαν μίγματα που περιείχαν ένα ευρείας κατανάλωσης πολυμερές, το πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (HDPE) σε ποσοστά 0, 7, 12 και 20% κατ' όγκον αδρανών. Η αντοχή σε κάμψη και θλίψη και το δυναμικό και στατικό μέτρο ελαστικότητας προσδιορίστηκαν σε διάφορες ηλικίες. Επίσης πραγματοποιήθηκε μελέτη της ομοιογένειας των προκυψάντων σκυροδεμάτων. Κρίνεται σκόπιμο να εξετασθεί η χρήση του HDPE στο σκυρόδεμα για συγκεκριμένες εφαρμογές, όπως, οδοστρώματα, δάπεδα, κυβόλιθοι, πλάκες πεζοδρομίου.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια λόγω της ανάπτυξης των μεγάλων αστικών κέντρων, της συνεχούς αύξησης του τουριστικού ρεύματος, της ανόδου του βιοτικού επιπέδου και κατ' επέκταση της αλλαγής των καταναλωτικών συνηθειών παρατηρείται μια τάση σημαντικής αύξησης της παραγωγής των αστικών απορριμμάτων. Με τα σημερινά δεδομένα, στη χώρα μας παράγονται κάθε χρόνο περισσότερο από 4,5 εκατομμύρια τόνους αστικών στερεών απορριμμάτων (απορρίμματα που προέρχονται από κατοικίες και εμπορικές δραστηριότητες), χωρίς να συμπεριλαμβάνονται στις ποσότητες αυτές τα απόβλητα της γεωργίας, του οικοδομικού τομέα και της βιομηχανίας. Από

αυτά, η παραγωγή αποβλήτων συσκευασίας είναι περίπου 1.061.000 τόνοι εκ των οποίων το 24,7% είναι πλαστικά απορρίμματα (Αρφανάκου Α 2004). Η ευρωπαϊκή Ένωση με την Οδηγία 94/62/ΕΟΚ και την τροποποίησή της, την Οδηγία 2004/12/ΕΚ, έχει θεσπίσει ποσοτικούς στόχους για την αξιοποίηση και την ανακύκλωση των απορριμμάτων συσκευασίας (Οδηγία 94/62/ΕΚ, Οδηγία 2004/12/ΕΚ). Η ανακύκλωση όμως των πλαστικών υπολείπεται σημαντικά του τιθέμενου ελάχιστου στόχου.

Την τελευταία δεκαετία γίνεται αξιοσημείωτη έρευνα στην αξιοποίηση διαφόρων ειδών απορριμμάτων ή βιομηχανικών παραπροϊόντων ως προσθέτων στο σκυρόδεμα το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως και έχει μεγάλο χρόνο ζωής, πράγμα που σημαίνει ότι τα απορρίμματα δεσμεύονται για μια μεγάλη χρονική περίοδο. Επειδή η ποσότητα των φυσικών αδρανών που απαιτείται για την κατασκευή του σκυροδέματος είναι μεγάλη, τα περιβαλλοντικά οφέλη δεν σχετίζονται μόνο με την ασφαλή διάθεση των απορριμμάτων αλλά και με την άμβλυνση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων μία εκ των οποίων είναι η καταστροφή του φυσικού τοπίου, που προκαλεί η εξαγωγή των φυσικών αδρανών. Εναλλακτικά αδρανή που έχουν εξεταστεί είναι ανακυκλωμένα λάστιχα αυτοκινήτων (Raghavan D και Συνεργάτες 1998, Siddique R & Naik T R 2004) και θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή (Ziara M M και Συνεργάτες 2005).

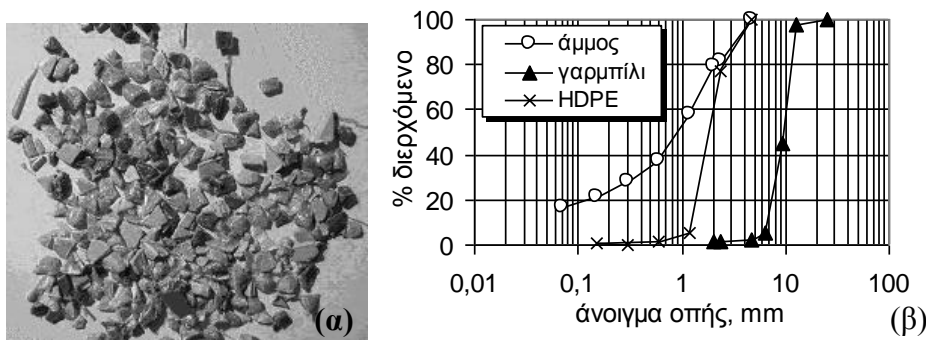
Στόχος της παρούσας εργασίας είναι να διερευνηθεί η αξιοποίηση των θερμοπλαστικών απορριμμάτων ως αδρανών στο σκυρόδεμα μελετώντας τις μηχανικές ιδιότητες και την ομοιογένεια των μιγμάτων. Συγκεκριμένα μελετάται ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο πολυμερές, το πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (High Density Polyethylene – HDPE). Σε προηγούμενη εργασία είχε μελετηθεί η δυνατότητα αξιοποίησης των θερμοπλαστικών απορριμμάτων ως αδρανή στο σκυρόδεμα λαμβάνοντας ως κριτήριο την χημική σταθερότητά τους στο αλκαλικό περιβάλλον του σκυροδέματος (Gavela S και Συνεργάτες 2005).

## 2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τσιμέντο τύπου Π 42.5, ασβεστολιθικά αδρανή (άμμος και γαρμπίλι), υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο (HDPE) που προέρχεται από μηχανική ανακύκλωση βιομηχανικών απορριμμάτων (Σχ. 1α) και πόσιμο νερό. Σε όλα τα αδρανή (γαρμπίλι, άμμος και πολυμερές) έγινε κοκκομετρική ανάλυση και προσδιορισμός του ειδικού τους βάρους και της υδαταπορρόφησης τους. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχήμα 1β και στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1. Φυσικές ιδιότητες αδρανών.

Υλικό	Ειδικό βάρος ( $\text{kg/m}^3$ )	υδαταπορρόφηση (%)
Γαρμπίλι	2680	0.92
Άμμος	2620	1.75
HDPE	910	0.00



Σχήμα 1. (α) υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο που προέρχεται από μηχανική ανακύκλωση βιομηχανικών απορριμμάτων, (β) κοκκομετρική διαβάθμιση των χρησιμοποιηθέντων αδρανών.

Παρασκευάστηκαν μίγματα σκυροδέματος που περιείχαν HDPE σε ποσοστό 0%, 7%, 12% και 20% κατ' όγκο αδρανών με λόγο νερό προς τσιμέντο  $w/c=0,6$ . Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται οι αναλογίες των μιγμάτων.

Πίνακας 2. Αναλογίες μιγμάτων.

Συστατικό	κατ' όγκο αντικατάσταση συμβατικών αδρανών (%)			
	0 (RM)	7	12	20
Νερό ( $\text{kg/m}^3$ )	205	205	205	205
Τσιμέντο ( $\text{kg/m}^3$ )	350	350	350	350
Άμμος ( $\text{kg/m}^3$ )	876	754	666	526
Γαρμπίλι ( $\text{kg/m}^3$ )	896	896	896	896
HDPE ( $\text{kg/m}^3$ )	-	48	86	136

Από κάθε μίγμα κατασκευάστηκαν πρισματικά δοκίμια διαστάσεων  $70\text{mm} \times 70\text{mm} \times 280\text{mm}$  και κυλινδρικά δοκίμια διαστάσεων  $100\text{mm} \times 200\text{mm}$ . Μετά από 24h από την κατασκευή τους τα δοκίμια ξεκαλουπώθηκαν και τοποθετήθηκαν σε θάλαμο σταθερών συνθηκών θερμοκρασίας και υγρασίας ( $20^\circ\text{C}$  και  $\text{RH} > 95\%$ ). Μετά από παρέλευση 7,

28 και 90 ημερών από την κατασκευή των πρισματικών δοκιμίων έγινε προσδιορισμός την αντοχής τους σε κάμψη και θλίψη (με την μέθοδο του ισοδύναμου κύβου) και του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας. Το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας υπολογίζεται από τη σχέση:

$$E_d = 4 \cdot 10^{-15} \cdot n^2 \cdot L^2 \cdot p \quad (1)$$

όπου  $n$  = η θεμελιώδης συχνότητα συντονισμού (Hz),  $L$  = το μήκος του δοκιμίου (m) και  $p$  = η πυκνότητα του δοκιμίου ( $\text{kg/m}^3$ ).

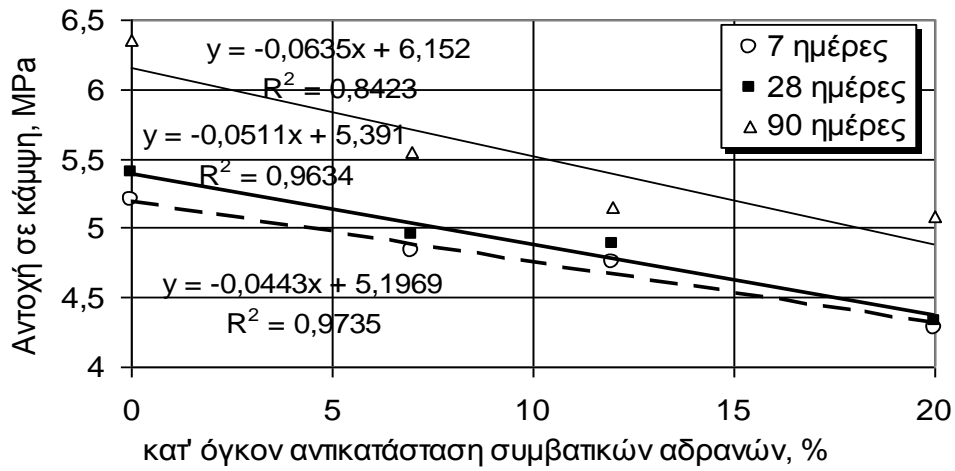
Η θεμελιώδης συχνότητα συντονισμού προσδιορίζεται με την μέθοδο που περιγράφεται στο πρότυπο ASTM C215-91.

Το ειδικό βάρος των συστατικών ενός μίγματος είναι μία βασική αιτία απόμιξης. Το χαμηλό ειδικό βάρος των πολυμερών θα μπορούσε να οδηγήσει σε απόμιξη του μίγματος. Για τον λόγο αυτό έγινε μελέτη ψηφιακών εικόνων που ελήφθησαν μετά από σάρωση των τομών δειγμάτων από όλα τα μίγματα. Οι τομές των κυλινδρικών δοκιμίων έγιναν παράλληλα προς την κατεύθυνση χύτευσης. Με οπτική παρατήρηση των τομών μπορούσε να παρατηρηθεί η ομοιογένεια των μιγμάτων, παρόλα αυτά για καλύτερα αποτελέσματα έγινε σάρωση και ψηφιακή επεξεργασία των τομών.

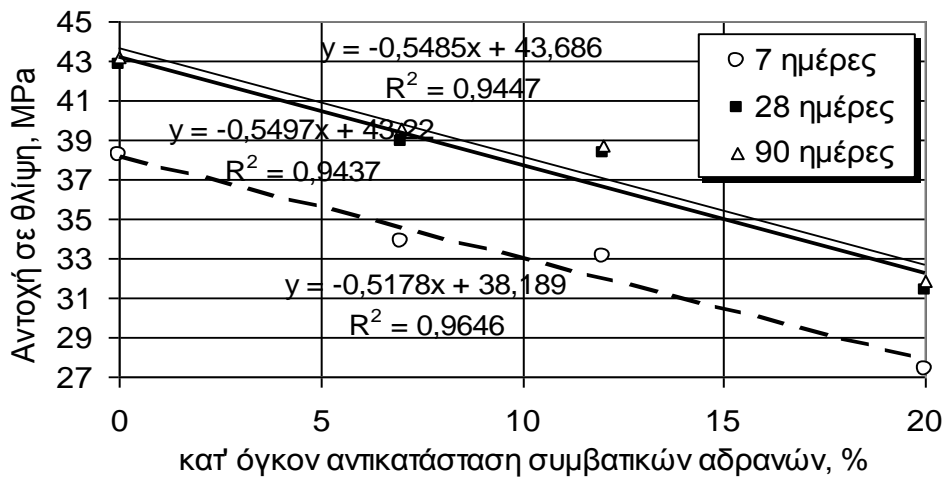
### 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

#### 3.1 Αντοχή σε θλίψη και κάμψη

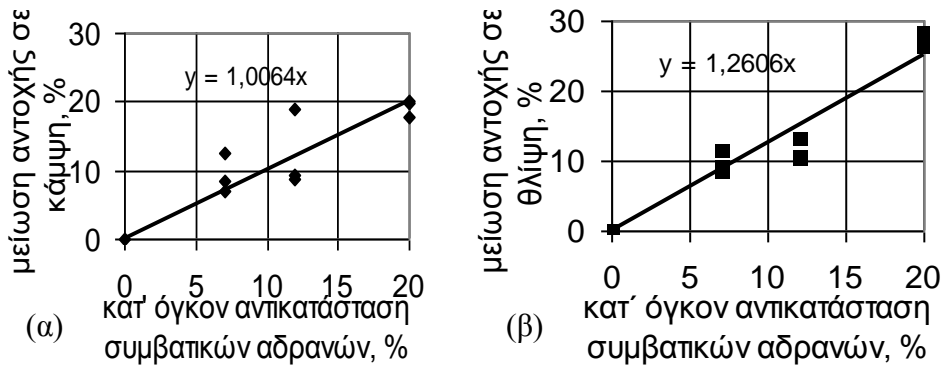
Τα αποτελέσματα των δοκιμών αντοχής σε θλίψη και κάμψη παρουσιάζονται στα σχήματα 2 και 3. Υπάρχει μια μείωση της αντοχής τόσο σε θλίψη όσο και σε κάμψη όταν αυξάνει το ποσοστό του πολυμερούς στο μίγμα. Η μείωση της αντοχής αποδίδεται αφενός στην μικρότερη αντοχή του πολυμερούς σε σχέση με αυτή των συμβατικών αδρανών και αφετέρου στην σχετικά ασθενέστερη συνάφεια μεταξύ του πολυμερούς και του τσιμεντοπολτού από ότι αυτή των συμβατικών αδρανών και του τσιμεντοπολτού. Η επί τοις εκατό μείωση της αντοχής σε συνάρτηση με το ποσοστό της κατ' όγκον αντικατάστασης των συμβατικών αδρανών παρουσιάζεται στα σχήματα 4α και 4β.



Σχήμα 2. Αντοχή σε κάμψη.



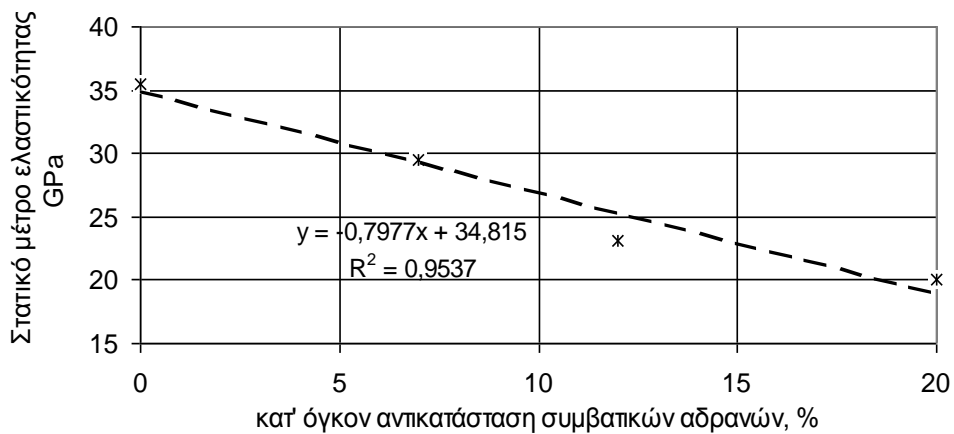
Σχήμα 3. Αντοχή σε θλίψη.



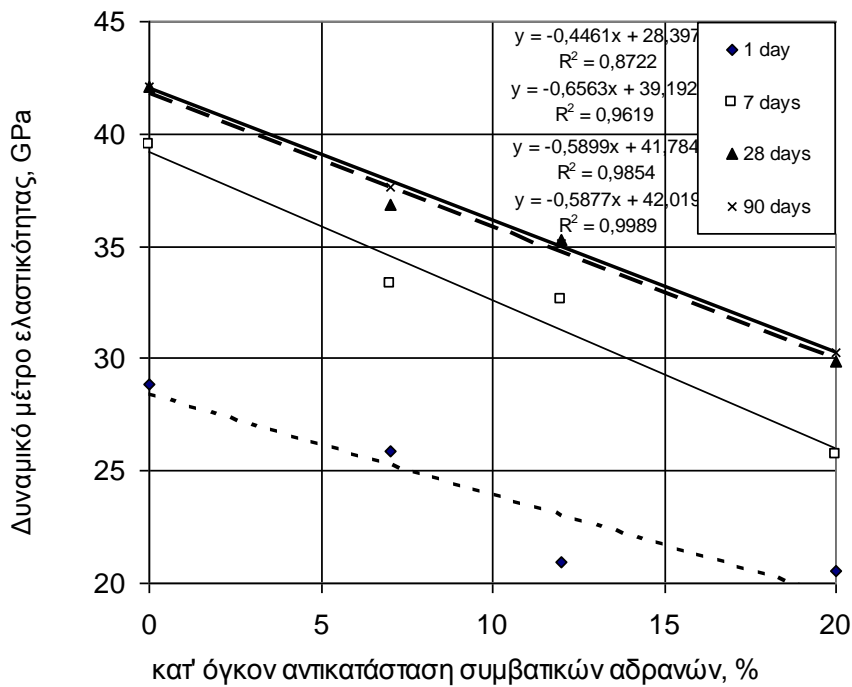
Σχήμα 4. Επί τοις εκατό μείωση αντοχής (α) σε κάμψη και (β) σε θλίψη.

### 3.2 Μέτρο Ελαστικότητας

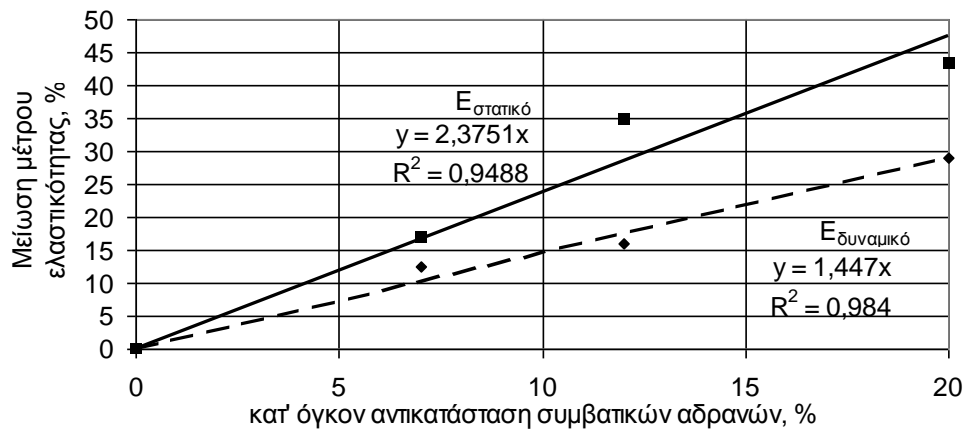
Στα σχήματα 5 και 6 παρουσιάζεται το στατικό και το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας σκυροδέματος που περιέχει πολυμερές σε διάφορα ποσοστά. Όπως φαίνεται, το μέτρο ελαστικότητας μειώνεται καθώς το ποσοστό του πολυμερούς στο μίγμα αυξάνει. Η μείωση αυτή οφείλεται στο ότι το πολυμερές που προστίθεται έχει μικρότερο μέτρο ελαστικότητας από τα συμβατικά αδρανή.



Σχήμα 5. Στατικό μέτρο ελαστικότητας.



Σχήμα 6. Δυναμικό μέτρο ελαστικότητας.

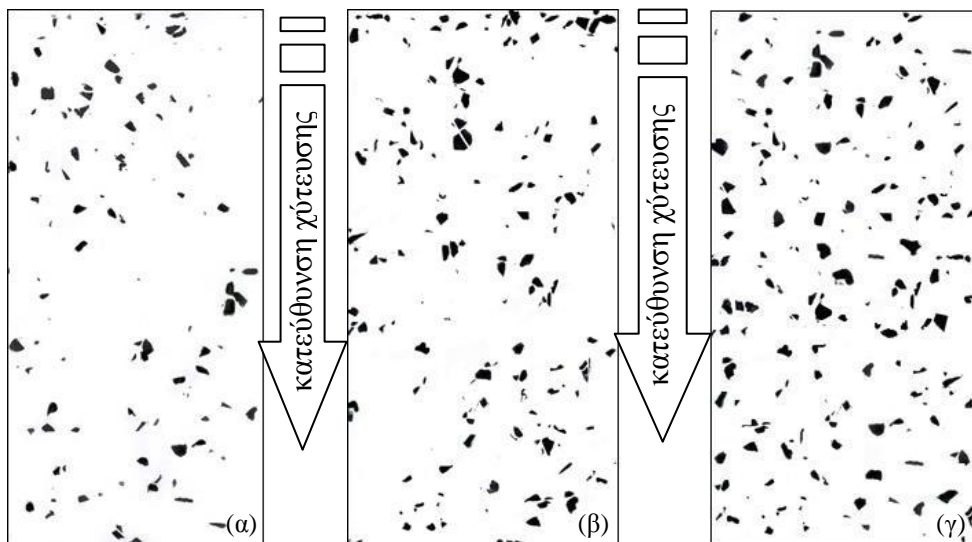


Σχήμα 7. Επί τοις εκατό μείωση του στατικού και δυναμικού μέτρου ελαστικότητας στην ηλικία των 28 ημερών σε συνάρτηση με την κατ' όγκον αντικατάσταση των συμβατικών αδρανών.

Στο σχήμα 7 παρουσιάζεται η επί τοις εκατό μείωση του στατικού και του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας σε συνάρτηση με την κατ' όγκον αντικατάσταση των συμβατικών αδρανών. Φαίνεται πως η μείωση του στατικού μέτρου ελαστικότητας είναι μεγαλύτερη από τη μείωση του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας. Αυτό αποδίδεται στο γεγονός ότι η συμπεριφορά των πολυμερών επηρεάζεται από την συχνότητα φόρτισης και την τιμή του φορτίου πολύ περισσότερο απ' ό,τι η συμπεριφορά των κοινών αδρανών σκυροδέματος (Courtney T H 1990).

### 3.3 Ομοιογένεια των μιγμάτων

Μία αντιπροσωπευτική εικόνα από κάθε μίγμα που περιέχει HDPE ως αντικατάσταση των συμβατικών αδρανών και που ελήφθησαν με σάρωση των τομών των δειγμάτων φαίνεται στο σχήμα 8. Με μαύρο χρώμα παρουσιάζονται τα πολυμερή ενώ με άσπρο τα συμβατικά αδρανή και ο τσιμεντοπολτός. Όπως φαίνεται, δεν έχει πραγματοποιηθεί απόμιξη και τα πολυμερή είναι διεσπαρμένα ομοιόμορφα σε ολόκληρο το μίγμα.



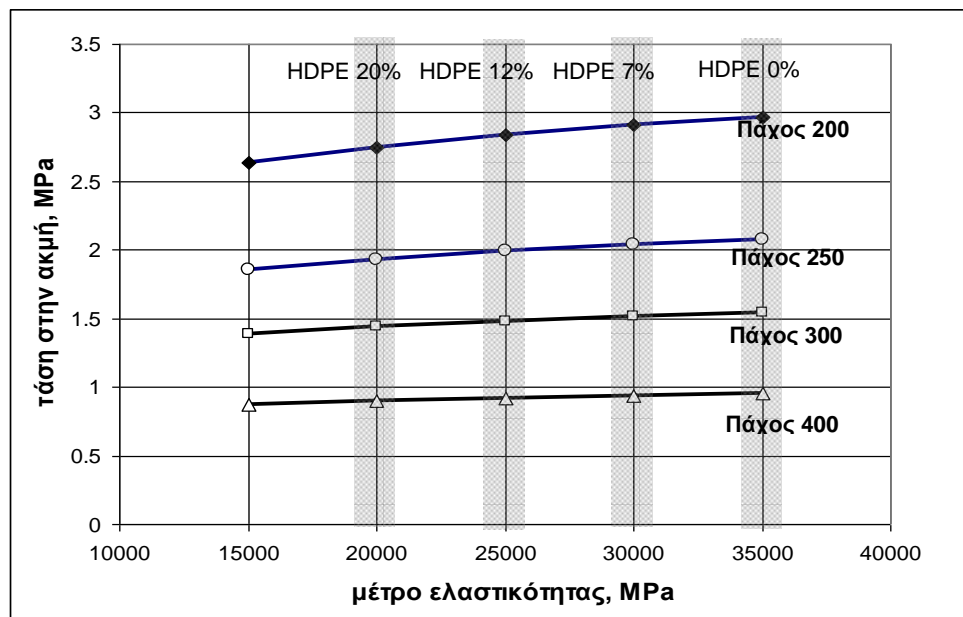
Σχήμα 8. Αντιπροσωπευτικές εικόνες που ελήφθησαν μετά από ψηφιακή επεξεργασία των τομών των δειγμάτων που περιέχουν (α) 7% κατ' όγκον αδρανών HDPE, (β) 12% κατ' όγκον αδρανών HDPE, (γ) 20% κατ' όγκον αδρανών HDPE.

### 3.3 Εφαρμογή του υπολογισμού των αναπτυσσόμενων τάσεων σε πλάκα

Σε περίπτωση δαπέδων ή οδοστρωμάτων από σκυρόδεμα η μείωση του μέτρου ελαστικότητας με την αντικατάσταση μέρους των κοινών αδρανών



με αδρανή από πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας παρουσιάζει ενδιαφέρον για περαιτέρω διερεύνηση δεδομένου ότι η μείωση αυτή συνεπάγεται και μείωση των τάσεων που αναπτύσσονται στο δάπεδο/οδόστρωμα είτε αυτές οφείλονται σε φορτία ή σε παρεμποδιζόμενη παραμόρφωση λόγω ευθύγραμμης κατανομής της θερμοκρασίας καθ' ύψος της διατομής .

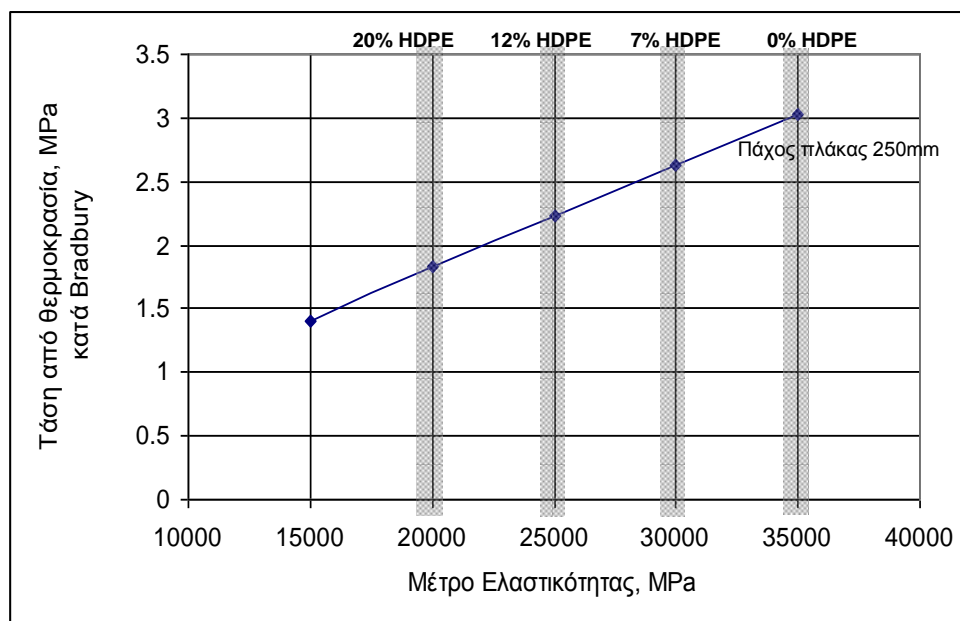


Σχήμα 9. Μεταβολή της αναπτυσσόμενης τάσης στην ακμή πλάκας σκυροδέματος με την μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας του σκυροδέματος. Φορτίο τροχού 50kN, μέτρο αντιστάσεως εδάφους  $k=0.07/\text{mm}^3$ , πίεση ελαστικών  $p=0.7$  MPa.

Στο Σχήμα 9 παρουσιάζεται η μείωση της αναπτυσσόμενης τάσης στην ακμή πλάκας από σκυρόδεμα πάχους 200 mm, 250 mm, 300mm και 400mm κατά Westergaard/Losberg για μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας από 35000MPa σε 15000MPa (Κόλιας Σ 1991). Στο σχήμα αυτό έχουν σημειωθεί με γκρι σκίαση οι ζώνες των τιμών του μέτρου ελαστικότητας που αντιστοιχούν στα μίγματα σκυροδέματος που εξετάστηκαν. Παρατηρείται ότι, για μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας από 35000MPa σε 20000MPa, η μείωση των τάσεων είναι μεγαλύτερη όσο η πλάκα έχει μικρότερο πάχος (11% για πάχος 200mm και 9% για πάχος 400mm). Είναι φανερό όμως ότι για τα συνήθη πάχη των οδοστρωμάτων (200-300mm) η μείωση αυτή είναι σχετικώς μικρή και δεν ισοφαρίζει την αντίστοιχη

μείωση της αντοχής σε κάμψη. Επομένως το απαιτούμενο πάχος της πλάκας από σκυρόδεμα που περιέχει HDPE θα είναι ελαφρώς μεγαλύτερο από το απαιτούμενο πάχος πλάκας χωρίς HDPE.

Οι αναπτυσσόμενες τάσεις λόγω ευθύγραμμης θερμοκρασιακής κατανομής κατά την έννοια του πάχους ( $\Delta t=0.06^{\circ}\text{C}/\text{mm}$ ) παρουσιάζονται στο Σχήμα 10. Ο υπολογισμός βασίστηκε στις σχέσεις Westergaard/Bradbury (Huang Y H 2004) για συντελεστή συστολής σκυροδέματος  $\alpha=10^{-5}$  και πλάκα πάχους 250mm, μήκους 5,0m και πλάτους 3,75m. Είναι φανερό ότι οι τάσεις μειώνονται σημαντικά (43%) για μείωση του μέτρου ελαστικότητας από 35000 σε 20000MPa. Επομένως τα μη στεγασμένα δάπεδα και τα οδοστρώματα, που υφίστανται τις θερμοκρασιακές μεταβολές, παρουσιάζουν σημαντικό πλεονέκτημα όταν ένα μέρος των αδρανών αντικαθίσταται από HDPE, γιατί μειώνονται οι θερμοκρασιακές τάσεις. Ανάλογα με τη χρήση του δαπέδου και την επιρροή της θερμοκρασίας πάνω σε αυτό μπορεί να έχουμε μια κατάσταση που να πλεονεκτεί η χρήση του HDPE και αυτό είναι ένα θέμα που πρέπει να διερευνηθεί συστηματικά.



Σχήμα 10. Μεταβολή της αναπτυσσόμενης τάσης λόγω ευθύγραμμης θερμοκρασιακής κατανομής με την μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας του σκυροδέματος.

Σημειώνεται ότι οι θερμοκρασιακές αυτές τάσεις επιβάλλουν στην πλάκα φόρτιση σχετικά μεγάλης διάρκειας (2-4 ώρες) γεγονός που συνεπάγεται ότι θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η χαλάρωση των τάσεων αυτών λόγω ερπυσμού. Ο ερπυσμός των σκυροδεμάτων με αδρανή από πολυαιθυλένιο αναμένεται να είναι μεγαλύτερος οπότε και οι αναπτυσσόμενες τάσεις ακόμη μικρότερες. Αυτό όμως αποτελεί επίσης ένα θέμα περαιτέρω εργαστηριακής έρευνας.

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η αντικατάσταση μέρους των συμβατικών αδρανών του σκυροδέματος από το εξετασθέν πολυμερές έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του μέτρου ελαστικότητας και της αντοχής. Η μείωση αυτή οφείλεται αφενός στην μικρότερη αντοχή και στο μικρότερο μέτρο ελαστικότητας του πολυμερούς σε σχέση με τα συμβατικά αδρανή και αφετέρου στην σχετικά ασθενέστερη συνάφεια μεταξύ του πολυμερούς και του τσιμεντοπολτού από ότι αυτή των συμβατικών αδρανών και του τσιμεντοπολτού. Παρόλα αυτά, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι το υλικό είναι πιο παραμορφώσιμο, η μείωση της αντοχής δεν είναι κατ' ανάγκη πρόβλημα διότι συνοδεύεται με μείωση του μέτρου ελαστικότητας γεγονός που επιφέρει μείωση των αναπτυσσόμενων τάσεων. Ειδικότερα οι τάσεις από φορτία ελαττώνονται αλλά η μείωση των αντοχών είναι μεγαλύτερη από την μείωση των τάσεων, ενώ στην περίπτωση των θερμοκρασιακών επιπονήσεων η μείωση των αναπτυσσόμενων τάσεων είναι σημαντική και μεγαλύτερη εκείνης των τάσεων από φορτία. Η μελέτη της ομοιογένειας των μιγμάτων έδειξε ότι για τα συγκεκριμένα μίγματα δεν υπάρχει πρόβλημα απόμιξης και τα πολυμερή είναι διεσπαρμένα ομοιόμορφα στο μίγμα.

#### 5. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστίες απευθύνονται στο εργαστήριο της Ένωσης Τσιμεντοβιομηχανιών Ελλάδος, όπου έγιναν οι μηχανικές δοκιμές.

#### 6. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Courtney, T. H., "Mechanical Behaviour of materials", McGraw Hill, Singapore (1990)

Gavela, S., Babou, F., Tarantili, P.A., Magoulas C. & Kasselouri – Rigopoulou, V., "Study of utilization of thermoplastic wastes as aggregates in concrete". 2<sup>nd</sup> Conference on Plastics, Athens, Greece (In Greek), (2005).

Huang, Y.H., “Pavement Analysis and Design”, Prentice Hall, New Jersey (2004)

Raghavan, D., Huynh, H. & Ferraris, C.F., “Workability, mechanical properties, and chemical stability of a recycled tyre rubber – filled cementitious composite”. J. of Materials Science, Vol. 33, (1998) 1745-1752

Siddique, R & Naik, TR., “Properties of concrete containing scrap-tire rubber – an overview”. Waste Management, Vol.24, (2004) 563-569

Ziara, M M, Dweik, H S, & Hadidoun M S., “Engineering properties of concrete made with ground melamine – formaldehyde thermosetting plastics as sand replacement”. Proceedings of the 6th international conference on concrete technology for developing countries, Jordan, (2002) 233-242

Αρφανάκου, Α. “Ανακύκλωση με εναλλακτική διαχείριση”. 16ο Συνέδριο Πανελληνίου Δικτύου οικολογικών Οργανώσεων, Τριχωνίδα (2004)

Κόλιας, Σ., “Υπολογισμός Δύσκαμπτων Οδοστρωμάτων”. ΕΜΠ, Τομέας Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής, (1991)

Οδηγία 94/62/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 20ης Δεκεμβρίου 1994 για τις συσκευασίες και τα απορρίμματα συσκευασίας.

Οδηγία 2004/12/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 11ης Φεβρουαρίου 2004 που τροποποιεί την Οδηγία 94/62/ΕΚ για τις συσκευασίες και τα απορρίμματα συσκευασίας.