ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

# "ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ ΑΝΑΚΥΚΛΩΜΕΝΑ ΕΛΑΣΤΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΩΝ"

**ΧΡΗΣΤΟΣ Π. ΣΑΡΑΚΑΤΣΑΝΟΣ**
Α.Μ.: 2004.05.0055

**ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ**

**ΤΣΟΜΠΑΝΑΚΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ**
Επίκουρος Καθηγητής Γενικού Τμήματος (Επιβλέπων)

**ΚΑΡΑΤΖΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ**
Καθηγητής Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος

**ΓΚΟΤΣΗΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ**
Αναπληρωτής Καθηγητής Γενικού Τμήματος

**[ΧΑΝΙΑ 2009]**

# ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Κατ'αρχάς, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Ιωάννη Τσομπανάκη, Επίκουρο Καθηγητή του Γενικού Τμήματος του Πολυτεχνείου Κρήτης που μου έδωσε την ευκαιρία να συνεργαστώ μαζί του. Επιπλέον, τον ευχαριστώ για την καθοδήγηση, την βοήθεια και τον πολύτιμο χρόνο που μου αφιέρωσε ώστε να ολοκληρωθεί η παρούσα διπλωματική εργασία.

Για την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφεραν τόσο κατά την εκμάθηση του προγράμματος Plaxis όσο και για την όλη συνεργασία που είχαμε κατά το χρονικό διάστημα που διήρκησε η αριθμητική διερεύνηση της παρούσας εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Δρ. Πολιτικό Μηχανικό κ. Πρόδρομο Ψαρρόπουλο και την Υποψήφια Διδάκτωρ . Βαρβάρα Ζανιά.

Ακόμη ευχαριστώ τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, τον κ. Καθηγητή Γεώργιο Καρατζά, Πρόεδρο του Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος και τον κ. Γκότση Αλέξανδρο Αναπληρωτή Καθηγητή του Γενικού Τμήματος του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συμφοιτητές μου για την βοήθεια που μου πρόσφεραν όλα αυτά τα χρόνια καθώς και την οικογένεια μου που στηρίζει τις επιλογές μου και είναι δίπλα μου.

**Χ. Π. ΣΑΡΑΚΑΤΣΑΝΟΣ**
**ΧΑΝΙΑ, 2009**

# ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σύμφωνα με την ισχύουσα νομοθεσία στην Ελλάδα και σε πολλές χώρες, τα ελαστικά των οχημάτων δεν επιτρέπεται να καταλήγουν ανεξέλεγκτα στο περιβάλλον μετά το τέλος της ζωής τους. Αντιθέτως, με την κατάλληλη επεξεργασία υπάρχει η δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης τους σε διάφορες εφαρμογές. Υπό το πρίσμα αυτό, αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της δυνατότητας χρησιμοποίησης ανακυκλωμένων ελαστικών οχημάτων σε κτιριακά έργα πολιτικού μηχανικού.

Μία νέα προοπτική για τη χρήση των ανακυκλωμένων ελαστικών αποτελεί η αντικατάσταση των αδρανών υλικών του σκυροδέματος. Μέχρι σήμερα έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές μελέτες για τις ιδιότητες του σκυροδέματος στο οποίο έχει γίνει προσθήκη ανακυκλωμένων ελαστικών (rubber concrete). Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας παρουσιάζεται αρχικώς μία εκτενής επισκόπηση αυτών των μελετών, προκειμένου να κατανοηθούν καλύτερα τα χαρακτηριστικά του νέου αυτού υλικού. Επιπροσθέτως, μελετάται η επίδραση της διάδοσης των σεισμικών κυμάτων σε ένα απλό κτίριο κατασκευασμένο από το νέο υλικό. Συγκεκριμένα, εξετάζονται τρία προσομοιώματα που εμφανίζουν διαφορετικά χαρακτηριστικά κατασκευής και θεμελίωσης. Στο πρώτο προσομοίωμα εξετάζεται μια κατασκευή από κανονικό σκυρόδεμα πάνω σε μια οριζόντια εδαφική στρώση η οποία διεγείρεται από τρεις διαφορετικούς σεισμούς. Στο δεύτερο προσομοίωμα οι ίδιες σεισμικές καταγραφές επιβάλλονται στην ίδια εδαφική στρώση με την διαφορά ότι η κατασκευή στην επιφάνεια του εδάφους δημιουργήθηκε από το νέο υλικό (rubber concrete). Τέλος, στο τρίτο προσομοίωμα εξετάζεται για τις ίδιες χρονοϊστορίες η κατασκευή από κανονικό σκυρόδεμα, στη θεμελίωση της οποίας έχει τοποθετηθεί ένα στρώμα από μίγμα άμμου και ανακυκλωμένων ελαστικών (rubber-sand).

Η αριθμητική προσομοίωση των μοντέλων της παρούσας διερεύνησης έγινε με χρήση κατάλληλου λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων (PLAXIS), το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως για την επίλυση διδιάστατων προβλημάτων της γεωτεχνικής σεισμικής μηχανικής. Επιδιώχθηκε η όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ορθότητα της προσομοίωσης του συστήματος του εδάφους και του κτιρίου, καθώς και της μεταξύ τους αλληλεπίδρασης. Τα αποτελέσματα της παρούσας διερεύνησης δίνουν μια πρώτη εκτίμηση για τη δυνατότητα χρήσης των ανακυκλωμένων στον αντισεισμικό σχεδιασμό κατασκευών.

# ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ


## Περίληψη
## Κεφάλαιο 1
## Εισαγωγή

1.1. Ανακύκλωση 1
1.2. Ανακυκλωμένα ελαστικά οχημάτων 1
1.3. Κατηγορίες ελαστικών οχημάτων 3
1.4. Σύσταση ελαστικών αποβλήτων 3
1.5. Νομικό πλαίσιο 4
1.6. Συλλογικό σύστημα εναλλακτικής διαχείρισης ελαστικών 4
1.7. Επεξεργασία ελαστικών αποβλήτων 7
1.8. Κατηγορία προϊόντων επεξεργασίας ελαστικών 11
1.9. Ενδεικτικές εφαρμογές rubber concrete 12

## Κεφάλαιο 2
## Βιβλιογραφική επισκόπηση

2.1.Ιδιότητες νωπού σκυροδέματος 22
2.1.1.Κάθιση 22
2.1.2.Περιεκτικότητα σε αέρα 24
2.1.3.Ειδικό βάρος 26
2.1.3.1 Ξηρό ειδικό βάρος 27
2.2.Βασικές μηχανικές ιδιότητες 29
2.2.1.Θλιπτική αντοχή 30
2.2.2.Μέτρο ελαστικότητας 42
2.2.3. Διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων 43
2.2.4.Καμπτική αντοχή 44
2.3.Άλλες ιδιότητες 51
2.3.1. Τήξη και πήξη 51
2.3.2 Αντοχή πρόσκρουσης 53
2.3.3. Ρηγμάτωση 53

2.3.4. Ανθεκτικότητα 53
2.3.5. Αντίσταση ολισθήσεως 54
2.3.6. Αντίσταση τριβής 55

**Κεφάλαιο 3**
**Αριθμητικές αναλύσεις**
3.1 Εισαγωγή 56
3.2 Περιγραφή προσομοιωμάτων 57
3.2.1 Προσομοίωμα Α1 57
3.2.2 Προσομοίωμα Α2 59
3.2.3 Προσομοίωμα Α3 60
3.3 Αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων 61
3.3.1 Προσομοίωμα Α1 61
3.3.2 Προσομοίωμα Α2 63
3.3.3 Προσομοίωμα Α3 65
3.3.4 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα 67

**Κεφάλαιο 4**
**Συμπεράσματα-Προτάσεις** 68

**Βιβλιογραφία** 71

**Παράρτημα Α**
**Ο Κώδικας PLAXIS** 73
Α.1 Εισαγωγή στο PLAXIS 73
Α.2 Υποπρόγραμμα εισαγωγής δεδομένων (input) 74
Α.2.1 Γενικές ρυθμίσεις 74
Α.2.2 Γεωμετρία προσομοιώματος 77
Α.2.3 Φορτία και συνοριακές συνθήκες 78
Α.2.4 Ιδιότητες υλικών 79
Α.2.5 Δημιουργία πλέγματος στοιχείων 82
Α.2.6 Αρχικές συνθήκες 84
Α.3 Υποπρόγραμμα υπολογισμών (calculations) 85
Α.3.1 Ορισμός μιας νέας φάσης υπολογισμών 86
Α.3.2 Γενικές ρυθμίσεις 86
Α.3.3 Τύποι επίλυσης 87

Α.3.4 Παράμετροι υπολογισμών 89
Α.3.4.1 Παράμετροι ελέγχου (Control parameters) 90
Α.3.4.2 Παράμετροι ελέγχου επαναληπτικής διαδικασίας 91
Α.3.4.3 Εισαγωγή δεδομένων φόρτισης (Loading input) 92
Α.3.5 Σύστημα πολλαπλασιαστών 93
Α.4 Υποπρόγραμμα εξαγωγής αποτελεσμάτων (output) 95
Α.5 Υποπρόγραμμα σχεδιασμού γραφημάτων (curves) 97

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ

# ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 Ανακύκλωση

Η ανακύκλωση είναι μια διαδικασία όπου τα απορριπτόμενα υλικά συλλέγονται, ταξινομούνται και μετατρέπονται σε πρώτη ύλη και στη συνέχεια μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή νέων προϊόντων.

Σε μερικές περιπτώσεις η ανακύκλωση απαιτεί σημαντικές ποσότητες ενέργειας και είναι μια ρυπογόνος διαδικασία. Ωστόσο, θεωρείται ως μία πολύ σημαντική πρακτική αν την συγκρίνουμε με την ενέργεια που απαιτείται και την μόλυνση που παράγεται κατά την παραγωγή από κανονικά υλικά. Επίσης, τα περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη που προκύπτουν από την ανακύκλωση υπερβαίνουν κατά πολύ αυτά της υγειονομικής ταφής ή της αποτέφρωσης. Ενδεικτικά πλεονεκτήματα:

- Εξοικονόμηση φυσικών πόρων. Η τεχνολογική εξέλιξη στις διαδικασίες ανακύκλωσης έχουν βελτιώσει πολύ την ποιότητα των ανακυκλωμένων υλικών.
- Μείωση της ρύπανσης και των υγειονομικών κινδύνων που σχετίζονται με την αποτέφρωση και την υγειονομική ταφή.
- Μείωση της ποσότητας των αποβλήτων και του κόστους διάθεσης.

## 1.2 Ανακυκλωμένα ελαστικά οχημάτων

Με τον όρο ανακυκλωμένα ελαστικά οχημάτων χαρακτηρίζονται τα ελαστικά τα οποία έχουν συμπληρώσει το χρόνο λειτουργίας τους και δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν πλέον σε οχήματα. Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν τα ελαστικά από κάθε είδους όχημα, όπως επιβατικά αυτοκίνητα, φορτηγά, μοτοποδήλατα, τρίκυκλα, ελαφρά τετράτροχα καθώς και μηχανήματα έργων και γεωργικά. Τα ελαστικά των οχημάτων αυτών μετατρέπονται σε απόβλητα όταν δεν χρησιμοποιούνται άλλο.

Τα ελαστικά δεν αποσυντίθενται εύκολα και γι' αυτό όταν τοποθετούνται ανεξέλεγκτα σε ρεματιές και οπουδήποτε αλλού -μια συνηθισμένη μέχρι σήμερα εικόνα- παραμένουν για πολύ μεγάλο διάστημα και γίνονται εστίες μόλυνσης. Γενικά, όταν καταλήγουν ανεξέλεγκτα στο περιβάλλον και ιδιαίτερα όταν καίγονται μπορούν να προκαλέσουν σοβαρά προβλήματα στην ανθρώπινη υγεία αφού ελευθερώνονται πολύ βλαβερές ουσίες, όπως οι πολυαρωματικοί υδρογονάνθρακες, βενζόλιο και φαινόλες, ουσίες με καρκινογόνες ιδιότητες.

Πολλές ήταν οι χώρες που επέλεξαν την ταφή των ελαστικών ως λύση για τη διαχείριση των παλαιών ελαστικών. Όμως, η επιλογή αυτή σύντομα εγκαταλείφθηκε αφού τα ελαστικά καταλαμβάνουν τεράστιο όγκο στους χώρους ταφής κι αυξάνουν τον κίνδυνο ανάφλεξης των σκουπιδιών. Η στεγανότητα των χώρων ταφής δεν εξασφαλίζεται πάντα, γεγονός που σημαίνει ότι οι επικίνδυνες ουσίες που δημιουργούνται κατά την αποσύνθεση των ελαστικών μπορούν να διαπεράσουν το έδαφος και να επηρεάσουν τη γύρω περιοχή. Με αυτόν τον τρόπο μπορούν να ρυπάνουν τα νερά και το έδαφος και να έχουν πολύ βλαβερές συνέπειες. Η ταφή των ελαστικών εγκαταλείφθηκε, όμως, και για έναν ακόμα λόγο: τα ελαστικά μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν και να αξιοποιηθούν.

Στην Ευρώπη το ποσό των χρησιμοποιημένων ελαστικών που συγκεντρώνεται ανέρχεται στα 250 εκατομμύρια τεμάχια, ενώ περίπου το 60% αυτών καταλήγει στις χωματερές. Τα ελαστικά αυτά αποτελούν ένα μεγάλο πρόβλημα παγκοσμίως καθώς:

- καταλαμβάνουν μεγάλο όγκο,
- έχουν πολύ ανθεκτική δομή κατασκευής τόσο φυσικά όσο και χημικά, με συνέπεια να δυσχεραίνεται οποιαδήποτε διαδικασία επεξεργασίας και κατ' επέκταση ανακύκλωσής τους.

Τα παλαιά ελαστικά αποτελούν ένα από τα πιο δύσκολα στη διάθεσή τους προϊόντα, λόγω της μεγάλης αντοχής τους στο χρόνο. Η εναλλακτική διαχείριση των μεταχειρισμένων ελαστικών συμβάλει στην επιμήκυνση του διαθέσιμου χρόνου ζωής των Χώρων Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (Χ.Υ.Τ.Α) που αποτελεί ένα ιδιαίτερα οξύ πρόβλημα στη χώρα μας.

Φωτογραφία 1.1 Εικόνα παλαιών ελαστικών

## 1.3 Κατηγορίες ελαστικών οχημάτων

Τα παλαιά ελαστικά κατατάσσονται στις εξής κατηγορίες:

- ελαστικά επιβατικών αυτοκινήτων,
- ελαστικά ημιφορτηγών – φορτηγών,
- ελαστικά αγροτικών οχημάτων,
- ελαστικά μοτοσικλετών, μοτοποδηλάτων, ποδηλάτων,
- ελαστικά βιομηχανικών και χωματουργικών οχημάτων.

Ο κύκλος ζωής των ελαστικών ποικίλλει από 35.000-40.000 km για τα επιβατικά αυτοκίνητα, από 60.000-70.000 km για τα ημιφορτηγά και από180.000-200.000 km για τα φορτηγά βαριάς κατασκευής. Τα ελαστικά ταξινομούνται με βάση τον Ευρωπαϊκό Κατάλογο Αποβλήτων στην ίδια κύρια κατηγορία με τα οχήματα στο τέλος κύκλου ζωής (Κωδικός 16 01) και πιο συγκεκριμένα έχουν τον κωδικό 16 01 03.

## 1.4 Σύσταση ελαστικών αποβλήτων

Τα ελαστικά οχημάτων κατασκευάζονται από φυσικό και συνθετικό καουτσούκ, ενώ χρησιμοποιείται επίστρωση από χάλυβα προκειμένου να αυξηθεί η αντοχή τους στο σημείο όπου ενώνονται με τις ζάντες. Περιέχουν, επίσης και άλλα συστατικά, όπως λινά, οξείδιο ψευδαργύρου, θείο και διάφορες άλλες οργανικές ουσίες. Στα ελαστικά των φορτηγών η αναλογία είναι 25% μέταλλο, 45% συνθετικό καουτσούκ και το υπόλοιπο 16% λινό. Παρατηρούμε μια μικρή διαφοροποίηση δεδομένων στα λάστιχα των επιβατικών αυτοκινήτων. Στον παρακάτω πίνακα απεικονίζεται η μέση σύσταση των ελαστικών επιβατικών αυτοκινήτων και φορτηγών στην Ε.Ε.

| Υλικό | Επιβατικά | Φορτηγά |
|---|---|---|
| Φυσικό ή συνθετικό καουτσούκ | 47% | 45% |
| Άνθρακας | 21,5% | 22% |
| Μέταλλα | 16,5% | 25% |
| Υφάσματα | 5,5% | - |
| Οξείδιο ψευδαργύρου | 1% | 2% |
| θείο | 1% | 1% |
| Πρόσθετα | 7,5% | 5% |

Πίνακας 1.1:Μέση σύσταση ελαστικών αποβλήτων
Πηγή: End-of-Life Tire Management: Storage Options, final report for the Ministry of Environment of New Zealand, July 2004.

## 1.5 Νομικό πλαίσιο

Ειδικότερα ως προς την εναλλακτική διαχείριση των αποβλήτων έχουν εκδοθεί τα ακόλουθα:

1. Ν.2939/01 «Συσκευασίες και εναλλακτική διαχείριση των συσκευασιών και άλλων προϊόντων»
Άλλα προϊόντα: «νοούνται τα προϊόντα όπως οχήματα, λάστιχα, καταλύτες οχημάτων, ορυκτέλαια, μπαταρίες και συσσωρευτές, ηλεκτρικά είδη, ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συσκευές, υλικά τηλεπικοινωνιών, υλικά εκσκαφών και κατεδαφίσεων, είδη επίπλωσης, εφημερίδες και περιοδικά, είδη χάρτινης γραφικής ύλης κ.α. τα οποία μετά την χρήσης τους και αφού καταστούν απόβλητα (στερεά ή επικίνδυνα), κατά την έννοια των διατάξεων της κείμενης νομοθεσίας υπόκεινται σε επαναχρησιμοποίηση ή αξιοποίηση.»

2. Σύμφωνα με τη νομοθεσία (29407/3508/2002 ΚΥΑ «Μέτρα και όροι για την υγειονομική ταφή των αποβλήτων») δεν επιτρέπεται να πετάγονται στο περιβάλλον ή να μεταφέρονται σε χώρους ταφής σκουπιδιών ολόκληρα ή τεμαχισμένα μεταχειρισμένα ελαστικά οχημάτων. Εξαίρεση αποτελούν τα υλικά που προορίζονται για χρήση σε κατασκευαστικά έργα εντός του ΧΥΤΑ.

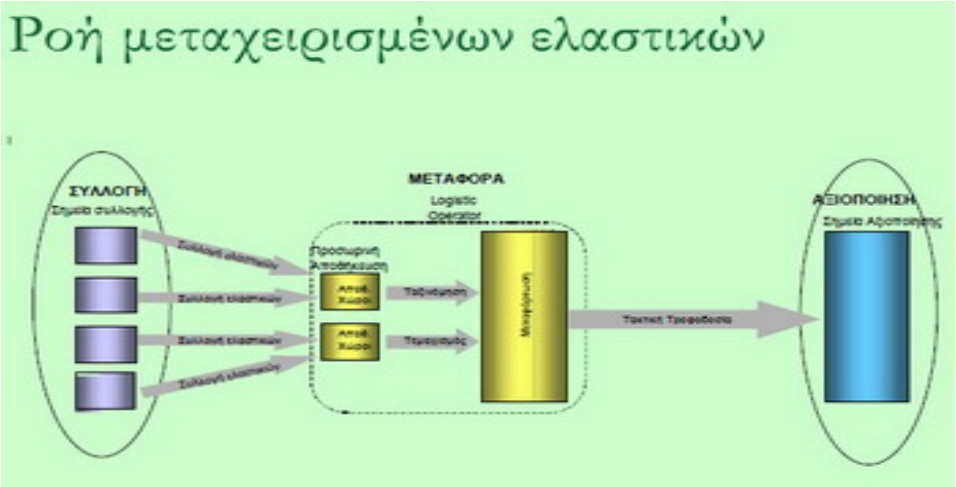
Οι εισαγωγείς ελαστικών έχουν (είτε ατομικά, είτε σε συνεργασία με άλλους) την ευθύνη «εναλλακτικής διαχείρισής τους», δηλαδή να οργανώσουν τη συλλογή, μεταφορά, προσωρινή αποθήκευση, επαναχρησιμοποίηση και αξιοποίηση των μεταχειρισμένων ελαστικών οχημάτων, ώστε μετά την επαναχρησιμοποίηση ή αξιοποίησή τους να επιστρέφουν στο ρεύμα της αγοράς. Δεν επιτρέπεται να κυκλοφορούν στην αγορά ελαστικά που ο εισαγωγέας τους δεν έχει οργανώσει μόνος τους ή μαζί με άλλους τη συλλογή και τη διαχείρισή τους.

3. Σύμφωνα με το Προεδρικό Διάταγμα 109/ ΦΕΚ Α 75/ 5-3-2004 σε εφαρμογή των διατάξεων του Ν. 2939/2001 (διατάξεις των άρθρων 15, 16, 17 και 18) πρέπει κατά προτεραιότητα να επιτυγχάνεται η πρόληψη παραγωγής αποβλήτων από ελαστικά των οχημάτων, και μετά η επαναχρησιμοποίηση, ανακύκλωση και η ενεργειακή αξιοποίηση τους, ώστε να μειώνεται η ποσότητα των αποβλήτων που οδηγούνται σε χώρους ταφής και να βελτιώνεται η περιβαλλοντική επίδοση όλων όσων συμμετέχουν στο κύκλο ζωής των ελαστικών.

## 1.6 Συλλογικό σύστημα εναλλακτικής διαχείρισης ελαστικών

Για το σκοπό αυτό έχει εγκριθεί μετά από υποβολή σχετικού φακέλου και θετική εισήγηση από την Επιτροπή Παρακολούθησης Εναλλακτικής Διαχείρισης Συσκευασιών και άλλων Προϊόντων (ΕΠΕΔ) με την Υπουργική Απόφαση του ΥΠΕΧΩΔΕ (ΦΕΚ 1145/28-07-2004) η λειτουργία ενός φορέα, στον οποίο συμμετέχουν οι εταιρίες εισαγωγής ελαστικών που ονομάζεται Συλλογικό Σύστημα Εναλλακτικής Διαχείρισης, ECOELASTIKA AE.

Φωτογραφία 1.2:Εργοστάσιο επεξεργασίας ελαστικών ECOELASTICA.




Διάγραμμα 1.1:Ροή μεταχειρισμένων ελαστικών

Το σύστημα εναλλακτικής διαχείρισης παλαιών ελαστικών “ECOELASTICA Α.Ε.” ξεκίνησε τη λειτουργία του την 1-11-2004 εξυπηρετώντας τους Νομούς Βοιωτίας και Φθιώτιδας. Από 25/9/2006 εξυπηρετείται ολόκληρη η χώρα. Σήμερα, το σύστημα, μέσω τον συμβεβλημένων συνεργατών του εξυπηρετεί τους νομούς :

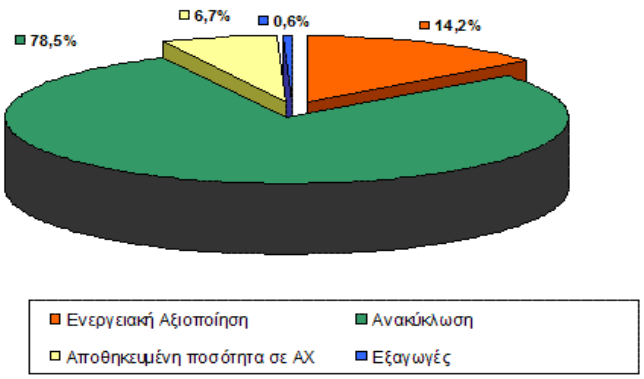
Αιτωλοακαρνανίας, Αργολίδας, Αρκαδίας, Άρτας, Αττικής, Αχαΐας, Βοιωτίας, Γρεβενών, Δράμας, Έβρου, Εύβοιας, Ευρυτανίας, Ηλείας, Ημαθίας, Ηρακλείου, Θεσπρωτίας, Θεσσαλονίκης, Ιωαννίνων, Καβάλας, Καρδίτσας, Καστοριάς, Κιλκίς, Κοζάνης, Κορινθίας, Λακωνίας, Λάρισας, Λευκάδας, Μαγνησίας, Ξάνθης, Πέλλας, Πιερίας, Πρέβεζας, Ρεθύμνου, Σερρών, Τρικάλων, Φθιώτιδας, Φλώρινας, Φωκίδας, Χαλκιδικής, Χανίων, όπως επίσης τα νησιά της Ρόδου, Ζακύνθου, Κέρκυρας, Κεφαλονιάς και της Λέσβου.

Η διαχείριση ξεκινάει με τη συλλογή των μεταχειρισμένων ελαστικών από τα βουλκανιζατέρ, τις μονάδες τεμαχισμού-αποσυναρμολόγησης ΟΤΚΖ, τα συνεργεία και τα αναγομωτήρια. Οι ισχύουσες χρηματικές εισφορές από 1/10/2006 είναι οι εξής:

Κατηγορία Α: 0,70 euro/τεμ.
Κατηγορία Β: 4,00 euro/τεμ.
Κατηγορία Γ: 0,25 euro/τεμ.

Σημειώνεται πως ελαστικά οποιασδήποτε κατηγορίας με εξωτερική διάμετρο μεγαλύτερη από 1400mm εξαιρούνται από τις παραπάνω κατηγορίες και δεν χρεώνεται σε αυτά χρηματική εισφορά. Επιπροσθέτως, η μέση εισφορά σε Ευρωπαϊκό επίπεδο είναι 2€ και 7€ για ελαστικά κατηγορίας Α και Β, αντίστοιχα.

Κατά το χρονικό διάστημα Ιανουαρίου 2005 – Δεκεμβρίου 2005 η Ecoelastika διαχειρίστηκε συνολικά 24.869 τόνους μεταχειρισμένων ελαστικών εκ των οποίων το 56% ανακυκλώθηκε και 21% αξιοποιήθηκε στην τσιμεντοβιομηχανία. Στο διάστημα λειτουργίας του το σύστημα έχει αυξήσει σημαντικά τον αριθμό των σημείων συλλογή φτάνοντας τα 1569 σημεία (Απρίλιο 2006) και καλύπτοντας πλέον το 90% της χώρας, μιας και ο εκτιμώμενος αριθμός για την 100% κάλυψη αγγίζει τα 2050 σημεία συλλογής. Η εκτιμώμενη ποσότητα αποσυρόμενων ελαστικών για το 2005 ήταν σύμφωνα με το σύστημα 45.670 tn. Κατά το χρονικό διάστημα Ιανουαρίου 2008 – Δεκεμβρίου 2008 η Ecoelastika διαχειρίστηκε συνολικά 46.697 τόνους μεταχειρισμένων ελαστικών εκ των οποίων το 78,5% ανακυκλώθηκε και 14,2% αξιοποιήθηκε ενεργειακά στην τσιμεντοβιομηχανία όπως φαίνεται στο διάγραμμα 1.2.




Διάγραμμα 1.2. Ποσοστιαία ανάλυση διαχειριζόμενων ποσοτήτων

## 1.7. Επεξεργασία ελαστικών αποβλήτων

Οι κυριότερες μέθοδοι εναλλακτικής διαχείρισης μεταχειρισμένων ελαστικών είναι η παραγωγή τρίμματος για ανακύκλωση μέσω μηχανικής ή κρυογεννούς κοκκοποίησης, η ενεργειακή ή θερμική αξιοποίηση μέσω συναποτέφρωσης σε τσιμεντοβιομηχανίες και η επαναχρησιμοποίηση (αναγόμωση, εμπόριο μεταχειρισμένων). Η ενεργειακή αξιοποίηση είναι εύκολα παρεξηγήσιμη διαδικασία, γιατί ο μοναδικός τρόπος πραγματοποίησής της στην Ελλάδα είναι η θερμική καύση για την παραγωγή τσιμέντου και οι συνειρμοί από την καύση ελαστικών είναι μάλλον δυσάρεστοι, αφού απελευθερώνεται βενζόλιο και άλλες τοξικές ουσίες. Οι υψηλές θερμοκρασίες που απαιτούνται στην παραγωγική διαδικασία του τσιμέντου, οι οξειδωτικές συνθήκες, οι μεγάλοι χρόνοι παραμονής των καυσαερίων, οι μεγάλες απαιτήσεις θερμικής ενέργειας καθώς και η γεωγραφική διασπορά των μονάδων της τσιμεντοβιομηχανίας και το νομοθετικό πλαίσιο που καθορίζεται με την Οδηγία Ε.Ε 2000/75, καθιστούν την συναποτέφρωση επιλεγμένων ρευμάτων αποβλήτων στην τσιμεντοβιομηχανία μία οικονομική και περιβαλλοντικά ασφαλή εναλλακτική λύση στο πρόβλημα της διάθεσης αποβλήτων.

Για την ανακύκλωση του ελαστικού είναι απαραίτητος ο τεμαχισμός του. Ο σκοπός της μείωσης του μεγέθους είναι διπλός:

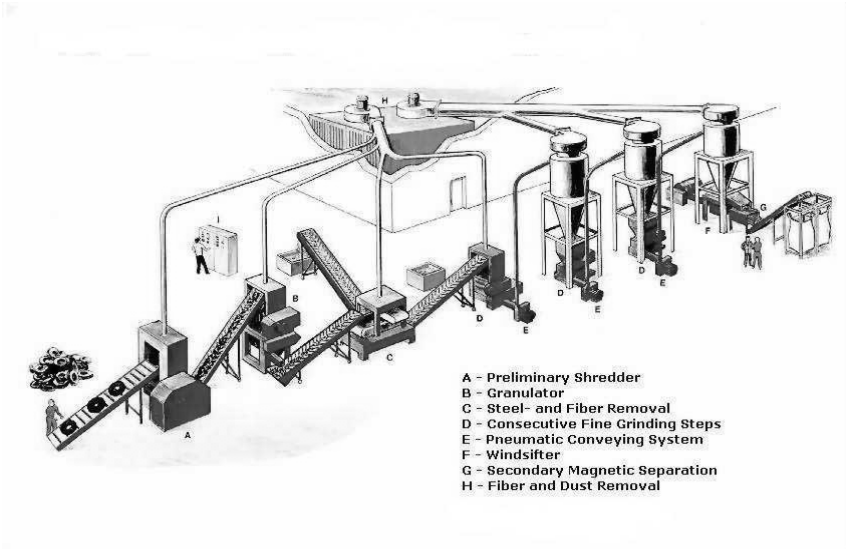
- Απελευθέρωση των ατσαλοσυρμάτων και των ινών
- Περαιτέρω επεξεργασία του ελαστικού κλάσματος (καουτσούκ) ώστε να επιτευχθούν εμπορεύσιμα μεγέθη κόκκων.

Υπάρχουν δύο βασικές μέθοδοι κοκκοποίησης του παλαιού ελαστικού:

- η μηχανική κοκκοποίηση,
- η κρυογενής κοκκοποίηση.

<u>Μηχανική κοκκοποίηση</u>

Η μηχανική επεξεργασία «σε συνθήκες περιβάλλοντος» των ελαστικών ονομάζεται έτσι διότι πραγματοποιείται σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος –ή κοντά σε αυτές– σε αντίθεση με τη κρυογενή όπου η επεξεργασία πραγματοποιείται σε συνθήκες ψύξης (-80 $^{o}$C έως 120 $^{o}$C).
Ένα σχηματικό διάγραμμα της μηχανικής επεξεργασίας παρουσιάζεται στο διάγραμμα 1.3. Έπειτα από το πρώτο στάδιο τεμαχισμού (Shredding) ακολουθούν διαδοχικά βήματα κοκκοποίησης (Granulating). Κάθε βήμα κοκκοποίησης ακολουθείται από σύστημα διαχωρισμού των ατσαλοσυρμάτων με τη βοήθεια ηλεκτρομαγνήτη είτε μόνιμου μαγνήτη, δονούμενης μεταφορικής ταινίας και σύστημα διαχωρισμού των ινών με τη βοήθεια κόσκινου και αερο-διαχωριστή.
Στάδια:
1.Τεμαχισμός (*Shredding*)
2. Κοκκοποίηση (*Granulating*)
3. Άλεση (*Cutting mill*)

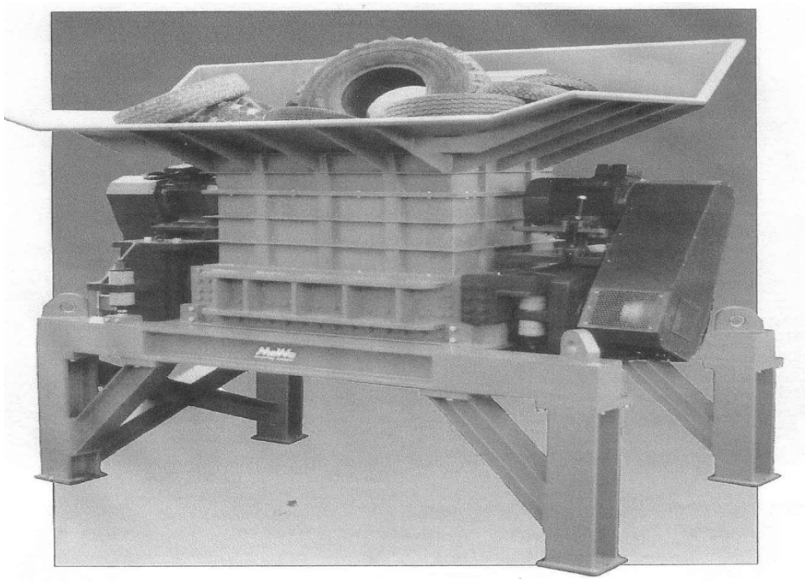



Φωτογραφία 1.3: Διάταξη μηχανικής επεξεργασίας

Τα βήματα κοκκοποίησης δίνονται στο κάτωθι πίνακα.

| | Επιλογή 1 | Επιλογή 2 |
|---|---|---|
| Βήμα 1 | από 50mm σε < 20mm | από 50mm σε < 30mm |
| Βήμα 2 | από 20mm σε < 8mm | από 30mm σε < 16mm |
| Βήμα 3 | από 8mm σε < 4mm | από 16mm σε < 10mm |
| Βήμα 4 | από 10mm σε < 4mm | |

Πίνακας 1.2:Τα διαδοχικά βήματα της κοκκοποίησης

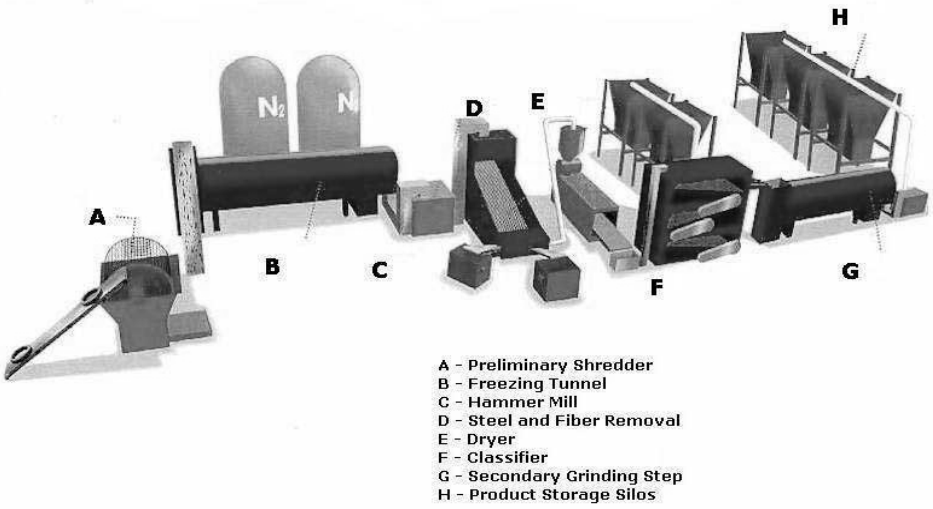


Φωτογραφία 1.4: Ενδεικτική φωτογραφία Shredder

Φωτογραφία 1.5: Μορφή ελαστικού μετά τον προ-τεμαχισμό

Κρυογενής κοκκοποίηση

Στη κρυογενή επεξεργασία ολόκληρα ελαστικά ή τεμάχια chips 50mm ή μικρότερα, ψύχονται σε θερμοκρασία κάτω από -80 $^{o}$C (-112$^{o}$F). Κάτω από αυτή τη θερμοκρασία «θερμοκρασία υαλώδους μετάβασης» το ελαστικό υαλοποιείται και η μείωση του μεγέθους πραγματοποιείται ευκολότερα. Γενικά, η κρυογενής επεξεργασία είναι αναγκαία εάν απαιτούνται προς διάθεση κόκκοι ελαστικού κάτω των (0.6mm).




Διάγραμμα 1.6: Διάταξη κρυογενούς επεξεργασίας

Σύγκριση μηχανικής και κρυογενούς επεξεργασίας

Η ερώτηση ποια είναι η «καλύτερη» τεχνολογία επεξεργασίας ελαστικών τίθεται συχνά. Η απάντηση εξαρτάται από μία σειρά παράγοντες και δεν είναι μονοσήμαντη. Ο κάτωθι πίνακας παρουσιάζει τις σημαντικότερες παραμέτρους.

| Παράμετρος | Μηχανική | Κρυογενής |
|---|---|---|
| Θερμοκρασία λειτουργίας | Μέγιστη 120 $^{o}$C | Κάτω από –80 $^{o}$C |
| Βασική αρχή μείωσης του μεγέθους | Κοπή, «ξύρισμα». | Τεμαχισμός «κρυογονικά» των ελαστικών τεμαχίων. |
| Μορφολογία κόκκων | Σπογγώδης και τραχιά. | Ομαλή και λεία. |
| Κατανομή μεγέθους κόκκων | Σχετικά περιορισμένη κατανομή μεγεθών, περιορισμένη μείωση μεγέθους ανά βήμα. | Ευρύ φάσμα μεγεθών (10mm έως 0.2mm σε ένα μόνο βήμα. |
| Κατανομή ηλεκτρικής ενέργειας | Υψηλότερη. | Χαμηλότερη. |
| Κατανάλωση Αζώτου | Δεν απαιτείται. | 0.5 – 1.0kg υγρού Αζώτου ανά kg εισερχομένων ελαστικών. |

Πίνακας 1.3: Σύγκριση μηχανικής – κρυογενούς επεξεργασίας

Η επιλογή της μεθόδου επεξεργασίας εξαρτάται από τα επιθυμητά προϊόντα και τις τιμές πώλησης αυτών. Στους Πίνακες 1.4 και 1.5 που ακολουθούν απεικονίζονται τα προϊόντα που παράγονται κατά την επεξεργασία των ελαστικών και οι πιθανές χρήσεις αυτών.

| *Στάδιο επεξεργασίας* | *Χρήσεις - Διάθεση υλικών* |
|---|---|
| **Προ-τεμαχισμός (Pre-shredding)** | Καύση, υλικά κατασκευών, τεχνητές επιφάνειες, σταθεροποιητές, ηχομονώσεις, διάθεση σε ΧΥΤΑ |
| **Τεμαχισμός (Shredding)** | Αποχετεύσεις, μονώσεις, υλικά για πλήρωση κενών |
| **Μηχανική κοκκοποίηση/ άλεση (Granulators/ Cutting mills)** | Αθλητικές εγκαταστάσεις και δάπεδα, στρώματα, τροχοί, πλακάκια, παγκάκια, υλικά για στέγες, ασφαλτοστρώσεις, υλικά οδοπροστασίας. |
| **Κρυογενής κοκκοποίηση** | Σόλες παπουτσιών, αθλητικός εξοπλισμός, επικάλυψη καλωδίων, μέρη αυτοκινήτου, επιστρώσεις, πλακάκια, αντιολισθητικά, δάπεδα παιδότοπων, οδοσήματα κλπ. |

Πίνακας 1.4. Χρήσεις των τελικών προϊόντων της ανακύκλωσης των ελαστικών

| Βαθμός επεξεργασίας | Ποσοστό | Χρήσεις |
|---|---|---|
| Παραγωγή κόκκων | 63% | Κάλυψη αθλητικών επιφανειών. Γήπεδα ποδοσφαίρου κ.ά. Πρόσθετο στην άσφαλτο. |
| Τεμάχια | 12% | Έργα πολιτικού μηχανικού, έργα αποχέτευσης, θερμικές – ηχητικές μονώσεις , υποστρώματα. |
| Ολόκληρα ελαστικά | 10% | Έργα πολιτικού μηχανικού: Έργα ακτών, σιδηροτροχιών, τοιχώματα και βάσεις ΧΥΤΑ |
| Πούδρα | 8% | Πρώτη ύλη βιομηχανικών προϊόντων: Πλακίδια δαπέδων, ηχομονωτικά υλικά αντικραδασμικές βάσεις, υλικά οδο-σημάνσεων, εξαρτήματα αυτοκινήτων. |
| Ειδικές εφαρμογές | 5% | // |
| Διάφορα | 2% | |

Πίνακας 1.5 : Βαθμός επεξεργασίας των ελαστικών

Στη μηχανική κοκκοποίηση μια σειρά τεμαχιστών (shredder) κόβουν το ελαστικό σε μικρά και μικρότερα κομμάτια, και ακολούθως ο κοκκοποιητής (granulator) μειώνει περισσότερο την τάξη μεγέθους των προϊόντων. Στην έξοδο του κοκκοποιητή τοποθετούνται μαγνητικοί διαχωριστές και κόσκινα για την απομάκρυνση του ατσαλιού και των λοιπών μετάλλων του ελαστικού αλλά και του λινού. Τα μέταλλα πωλούνται στη Χαλυβουργική και το λινό στην ασβεστοποιία αντικαθιστώντας το πετρέλαιο καύσης.

## 1.8. Κατηγορία προϊόντων επεξεργασίας ελαστικών

Ανάλογα με το μέγεθος των προϊόντων επεξεργασίας αυτά διακρίνονται σε:

-Τα τεμάχια ελαστικού (μέγεθος τεμαχίων : 40 – 300mm)
-Τα chips ελαστικού (μέγεθος: 10mm – 50mm)
-Το τρίμμα ελαστικού (μέγεθος τρίμματος: 1mm – 10 mm)
-Την πούδρα ελαστικού (μέγεθος κόκκων: 0mm – 1mm)

Φωτογραφία 1.7:Δείγματα από τρίμμα ελαστικού

Το τρίμμα ελαστικού μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην εγχώρια αλλά και τη διεθνή αγορά ως πρώτη ύλη σε πληθώρα προϊόντων που σήμερα παράγονται από πρωτογενές υλικό (π.χ. ιμάντες, αθλητικά και βιομηχανικά δάπεδα, αντικραδασμικά και μονωτικά υλικά, κλπ) καθώς ως πρόσθετο στην οδοποιία για κατασκευή αντιολισθητικού ασφαλτοτάπητα.

Ειδικά στην κατασκευή αντιολισθητικού ασφαλτοτάπητα αναμένεται να υπάρξει μεγάλη απορρόφηση του προϊόντος, καθώς το τρίμμα ελαστικού τοποθετείται κατά την κατασκευή της τελικής στρώσης κυκλοφορίας των οχημάτων και επομένως χρησιμοποιείται τόσο στην κατασκευή νέων οδών και αεροδρομίων, όσο και στη συντήρηση και αναβάθμιση του υπάρχοντος οδικού δικτύου.

Φωτογραφία 1.5: Δείγμα από πούδρα ελαστικού

Με την περαιτέρω επεξεργασία του ελαστικού τρίμματος προκύπτει η πούδρα ελαστικού η οποία είναι απαλλαγμένη από λινά και μέταλλο. Συνήθως χρησιμοποιείται για τη δημιουργία πλαστικών ειδών από ανακυκλωμένα υλικά (κάδοι απορριμάτων, κ.α.).

## 1.9 Ενδεικτικές εφαρμογές rubber concrete

Για το συγκεκριμένο υλικό rubber concrete έχουν πραγματοποιηθεί έρευνες όχι μόνο σε θεωρητικό επίπεδο αλλά και σε πρακτικές εφαρμογές. Συγκεκριμένα, στην Ελλάδα έχουν γίνει αρκετές εφαρμογές και στη συνέχεια παρουσιάζονται μερικές από αυτές.

<u>1.Σε δάπεδα αθλοπαιδιών</u>

Σύμφωνα με τη μελέτη που έχουν πραγματοποιήσει ο Μπάτσιος και οι συνεργάτες, έχουμε την δυνατότητα να παρατηρήσουμε τη συμπεριφορά του ανακυκλωμένου ελαστικού σε μίγματα σκυροδέματος για δάπεδα αθλοπαιδιών. Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε δάπεδα συμβατικού σκυροδέματος και σκυροδέματος με ανακυκλωμένο ελαστικό. Για τον σκοπό αυτό παρασκευάσθηκαν μίγματα σκυροδέματος δαπέδων κατηγορίας αντοχής C16/20 στα οποία καθορίστηκαν η κατακόρυφη αντίδραση σε διάφορα είδη αλμάτων, παράλληλα με τις μηχανικές αντοχές (θλίψη, κάμψη, διάρρηξη, δυναμικό και

στατικό μέτρο ελαστικότητας). Σε δεύτερη φάση μέρος της άμμου (30 και 60% κατ' όγκο αναλογία) αντικαταστάθηκε με ανακυκλωμένο ελαστικό αυτοκινήτων αντίστοιχης κοκκομετρίας (0-4mm) και μετρήθηκαν τα παραπάνω μεγέθη προς σύγκριση με τις συμβατικές αναλογίες υλικών.

Παρασκευάστηκαν 4 σειρές μιγμάτων σκυροδέματος:

- Η 1η σύνθεση συνιστάται από 33% άμμο (0-4mm), 27% ρύζι και 40% γαρμπίλι.

Πίνακας 1.Αναλογίες της 1ης σύνθεσης σκυροδέματος

| | |
|---|---|
| Τσιμέντο CEM IV/B 32.5 | 325,0 Kg |
| Νερό (N/T=0,60) | 195,0 Kg |
| Άμμος (33%) | 598,5 Kg |
| Ρύζι (27%) | 489,7 Kg |
| Γαρμπίλι (40%) | 725,5 Kg |
| Ρευστοποιητής 1% κ.β.τσιμ. | 3,25 Kg |
| Νέος λόγος N/T=0,55 | 178,7 Kgr |
| Κάθιση | 4,0 cm |
| Φαιν. ειδ. βάρος νωπού σκυρ/τος | 2,3 t/m³ |

- Η 2η σύνθεση συνιστάται από 35% άμμο (0-4mm), 15% ανακυκλωμένο ελαστικό (μέγεθος κόκκου 2mm) και 50% ρύζι.

Πίνακας 2.Αναλογίες της 2ης σύνθεσης σκυροδέματος

| | |
|---|---|
| Τσιμέντο CEM IV/B 32.5 | 325,0 Kg |
| Νερό (N/T=0,60) | 195,0 Kg |
| Άμμος (50%) | 634,8 Kg |
| Ρύζι (50%) | 906,8 Kg |
| Λάστιχο 30% κ.ό. της άμμου | 92,9 Kg |
| Ρευστοποιητής 1% κ.β.τσιμ. | 3,25 Kg |
| Νέος λόγος N/T=0,50 | 162,5 Kgr |
| Κάθιση | 1,5 cm |
| Φαιν. ειδ. βάρος νωπού σκυρ/τος | 2,1 t/m³ |

- Η 3η και 4η σύνθεση συνιστάται από 20% άμμο (0-4mm), 30% ανακυκλωμένο ελαστικό (μέγεθος κόκκου 2mm) και 50% ρύζι.

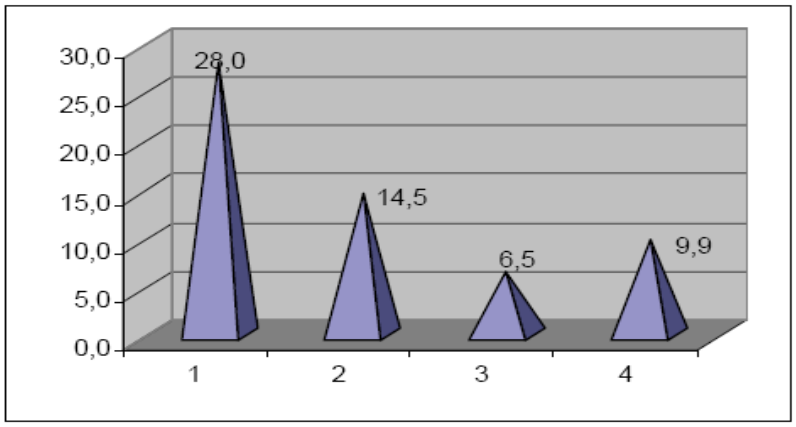
Πίνακας 3.Αναλογίες της 3ης σύνθεσης σκυροδέματος

| | |
|---|---|
| Τσιμέντο CEM IV/B 32.5 | 325,0 Kg |
| Νερό (N/T=0,60) | 195,0 Kg |
| Άμμος (50%) | 362,7 Kg |
| Ρύζι (50%) | 906,8 Kg |
| Λάστιχο 60% κ.ό. της άμμου | 186,2 Kg |
| Ρευστοποιητής 1%κ.β. τσιμ. | 3,25 Kg |
| Νέος λόγος N/T=0,45 | 146,2 Kgr |
| Κάθιση | 2,5 cm |
| Φαιν. ειδ. βάρος νωπού σκυρ/τος | 2,0 t/m³ |

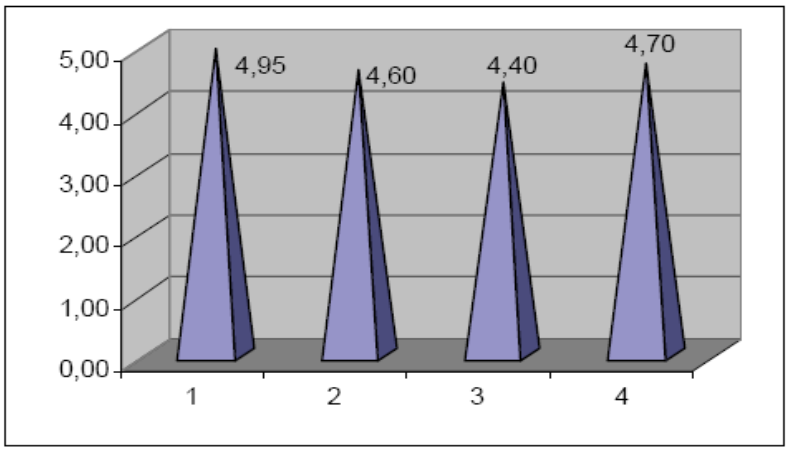
Πίνακας 4.Αναλογίες της 4ης σύνθεσης σκυροδέματος

| | |
|---|---|
| Τσιμέντο **CEM I 42.5** | 300,0 Kg |
| Νερό (N/T=0,70) | 210,0 Kg |
| Άμμος (50%) | 358,0 Kg |
| Ρύζι (50%) | 895,0 Kg |
| Λάστιχο 60% κ.ό. της άμμου | 183,0 Kg |
| Ρευστοποιητής 1%κ.β. τσιμ. | 3,0 Kg |
| Νέος λόγος N/T=0,42 | 126,3 Kgr |
| Κάθιση | 2,0 cm |
| Φαιν. ειδ. βάρος νωπού σκυρ/τος | 2,0 t/m³ |

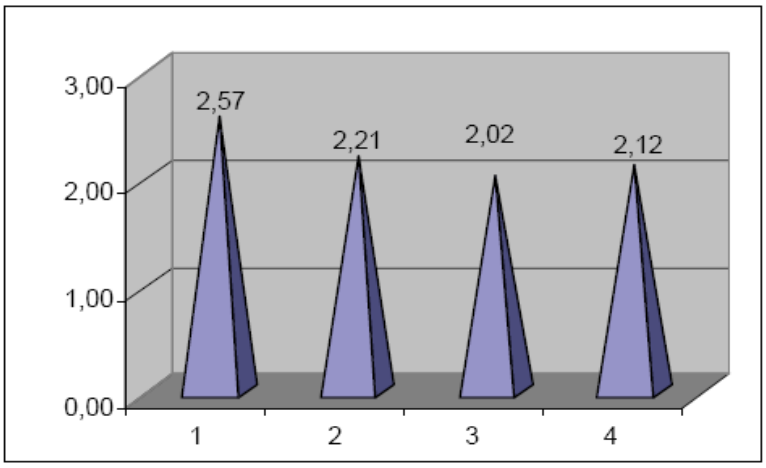
Οι μέσοι όροι των αποτελεσμάτων δίνονται στα παρακάτω ιστογράμματα:



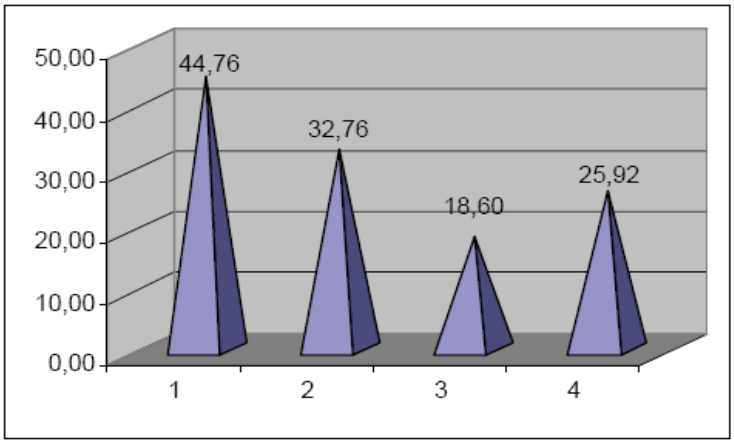

Διάγραμμα 1.5.Θλιπτικη αντοχή κυβικών δοκιμίων 28 ημερών (Mpa)



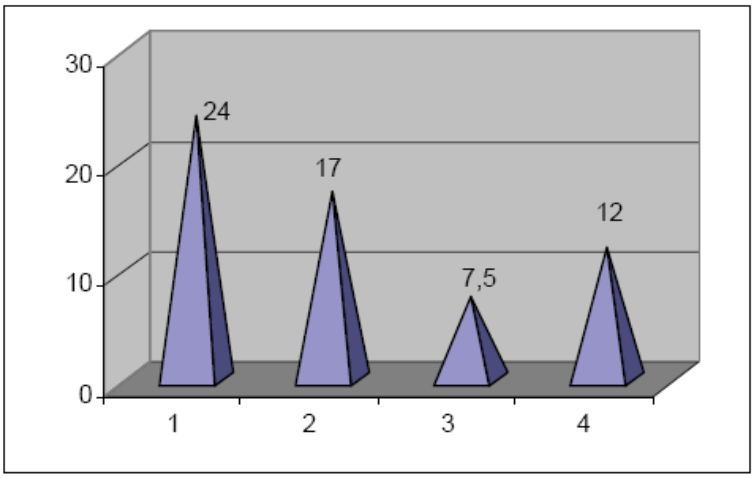

Διάγραμμα 1.6.Αντοχή σε κάμψη (MPa)



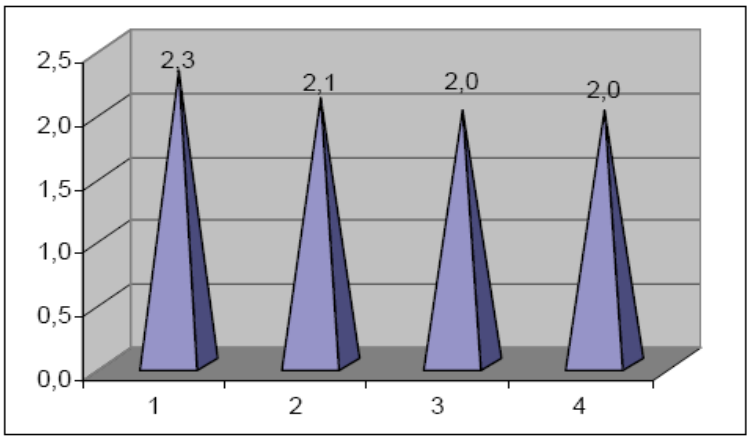

Διάγραμμα 1.7.Αντοχή σε διάρρηξη(MPa)



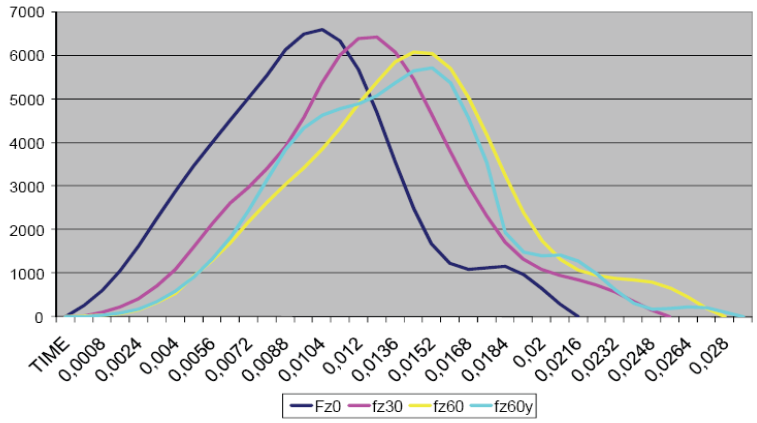

Διάγραμμα 1.8. Δυναμικό μέτρο ελαστικότητας (GPa)




Διάγραμμα 1.9. Στατικό μέτρο ελαστικότητας (GPa)




Διάγραμμα 1.10. Ειδικό βάρος (t/m$^3$)




Διάγραμμα 1.11. Κατακόρυφες αντιδράσεις εδάφους (Fz) σε Nt συναρτήσει του χρόνου σε msec για τις διάφορες συνθέσεις.

Με βάση το παραπάνω διάγραμμα 1.11 παρατηρείται μείωση της απόλυτης τιμής της κατακόρυφης αντίδρασης του εδάφους για τις συνθέσεις με μεγαλύτερο ποσοστό ελαστικού σε σύγκριση με το κανονικό σκυρόδεμα με παράλληλη καθυστέρηση στο χρόνο εκδήλωσης της μέγιστης τιμής (tFz). Αυτό το γεγονός είναι αρκετά σημαντικό στην προετοιμασία του μυϊκού συστήματος του αθλούμενου ούτως ώστε να δεχθεί πιο ομαλά την αντίδραση. Τέλος, η κλίση της καμπύλης της αντίδρασης δηλώνει καθυστέρηση στο ρυθμό εμφάνισης της κατακόρυφης αντίδρασης στα δοκίμια με το ελαστικό. Οι τιμές αυτές φαίνονται στον παρακάτω πίνακα 1.6. Σύμφωνα με τις μετρήσεις, η αντικατάσταση της άμμου με ελαστικό έδωσε μειωμένες μηχανικές αντοχές σε σχέση με το κανονικό σκυρόδεμα, οι οποίες είναι όμως ικανοποιητικές για δάπεδα αθλοπαιδιών, όπως π.χ. οι αυλές σχολείων. Επομένως, η προσθήκη ελαστικού σε μίγματα σκυροδέματος δαπέδων αθλοπαιδιών φαίνεται να λειτουργεί ικανοποιητικά.

| Σύνθεση | contact (msec) | Fz (Nt) | tFz (msec) |
|---|---|---|---|
| 1η | 22,4 | 6599 | 11,2 |
| 2η | 26,4 | 6430 | 13,6 |
| 3η | 28,0 | 6084 | 15,2 |
| 4η | 28,8 | 5727 | 16,0 |

Πίνακας1.6. Αποτελέσματα μέτρησης κατακόρυφων αντιδράσεων εδάφους, χρόνου επαφής και χρόνου εκδήλωσης της μέγιστης κατακόρυφης αντίδρασης για τις διάφορες συνθέσεις.

## 2. Βελτίωση ιδιοτήτων σκυροδέματος

Στην έρευνα που έχουν πραγματοποιήσει ο Οικονόμου και οι συνεργάτες του μελετήθηκαν τσιμεντοκονιάματα με φθαρμένο ελαστικό αυτοκινήτων σε αντικατάσταση μέρους του αδρανούς (άμμου) με σκοπό τη βελτίωση της συνάφειας μεταξύ ελαστικού και τσιμεντόπαστας. Παρασκευάσθηκαν δοκίμια είτε με προσθήκη φθαρμένου ελαστικού και πρόσμικτων είτε με προσθήκη προ-επεξεργασμένου, με διάφορα φυσικά και χημικά μέσα, ελαστικού οχημάτων αυτοκινήτων.

Στις συνθέσεις που μελετήθηκαν (βλ. πίνακα 1.7) είχε γίνει αντικατάσταση 5% κ.β. από πούδρα ελαστικού και επίσης η εργασιμότητα των τσιμεντοκονιαμάτων διατηρήθηκε μεταξύ 11±1cm. Όλα τα δοκίμια είχαν διαστάσεις 4x4x16cm, συντηρήθηκαν σε νερό και σε θάλαμο θερμοκρασίας 20±2 $^{o}$C. Στον πίνακα 1.8 αναφέρονται τα αποτελέσματα των ελέγχων του ειδικού βάρους, του πορώδους καθώς και των μηχανικών ιδιοτήτων των τσιμεντοκονιαμάτων.

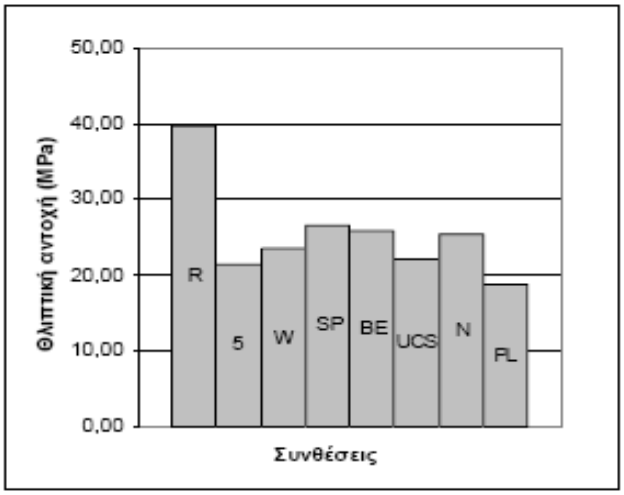
| Συστατικά \ Συνθέσεις | R | 5 | W | N | UCS | SP | PL | BE |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Τσιμέντο IV/B 32,5N (g) | 450.0 | 450.0 | 450.0 | 450.0 | 450.0 | 450.0 | 450.0 | 450.0 |
| Άμμος πρότυπη, (g) | 1350.0 | 1282.5 | 1282.5 | 1282.5 | 1282.5 | 1282.5 | 1282.5 | 1282.5 |
| Ελαστικό, % κ.β. άμμου | 0.0 | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 5.0 |
| Τρόπος επεξεργασίας | | | Νερό | NaOH | UCS | SP | Latex | BE |
| Πρόσμικτο %κ.β. τσιμέντου | | | | | 1.0 | 1.0 | 5.0 | 5.0 |
| Νερό, (g) | 225.0 | 225.0 | 225.0 | 225.0 | 225.0 | 200.0 | 216.0 | 216.0 |
| Εξάπλωση, (cm) | 12.0 | 10.8 | 10.7 | 10.6 | 10.5 | 10.2 | 12.5 | 11.0 |

Πίνακας 1.7. Συνθέσεις τσιμεντοκονιαμάτων

| Χαρακτηριστικά \ Συνθέσεις | R | 5 | W | N | UCS | SP | PL | BE |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ειδικό βάρος (g/cm$^3$) | 2.23 | 2.03 | 2.09 | 2.08 | 2.12 | 2.05 | 1.99 | 2.03 |
| Θλιπτική αντοχή (MPa) | 40.75 | 21.33 | 23.55 | 25.32 | 22.15 | 26.15 | 18.83 | 25.80 |
| Εφελκυστική καμπτική αντοχή (MPa) | 9.0 | 5.7 | 5.9 | 6.35 | 5.85 | 6.6 | 5.3 | 6.40 |
| Δυναμικό μέτρο ελαστικότητας (GPa) | 39.67 | 27.67 | 30.44 | 30.45 | 28.75 | 29.64 | 24.52 | 27.65 |
| Ενεργό Πορώδες (%) | 8.81 | 7.37 | 7.18 | 7.10 | 7.25 | 6.60 | 5.61 | 5.86 |

Πίνακας 1.8. Αποτελέσματα ελέγχων τσιμεντοκονιαμάτων

Στο διάγραμμα 1.12 παρατηρούμε πως η θλιπτική αντοχή μειώθηκε με την προσθήκη, 5% κ.β. της άμμου, ελαστικού σε ποσοστό 47.7% ενώ η μείωση αυτή ήταν μικρότερη για τα δοκίμια των συνθέσεων BE, SP και N, όπου η μείωση κυμάνθηκε σε ποσοστά 36.7, 34.7 και 37.9 %, αντίστοιχα, σε σχέση με την πρότυπη σύνθεση (R).




Διάγραμμα 1.12. Θλιπτική αντοχή των τσιμεντοκονιαμάτων

Η μέτρηση του ενεργού πορώδους έγινε σύμφωνα με την προδιαγραφή RILEM CPC 11.3, με προσθήκη ελαστικού σε ποσοστό 5 %κ.β. της άμμου παρατηρήθηκε μείωση του πορώδους σε ποσοστό 16.3% (σύνθεση με κωδικό 5, στον πίνακα 1.8). Ικανοποιητικά αποτελέσματα έδωσαν όλες οι υπόλοιπες συνθέσεις (W, N, SP, PL, BE, UCS) με καλύτερες τις συνθέσεις με κωδικό PL, BE λόγω των περιεχόμενων ρητινών, καθώς και της σύνθεσης με κωδικό SP. Η μείωση του πορώδους για τα δοκίμια των συνθέσεων αυτών υπολογίσθηκε ίση με 23.9, 33.5 και 25.1%, αντίστοιχα.

Από τα αποτελέσματα παρατηρείται αναμενόμενη μείωση των μηχανικών αντοχών των τσιμεντοκονιαμάτων, η οποία αποδίδεται στη μη επαρκή συνάφεια μεταξύ του ελαστικού και της τσιμεντόπαστας. Ωστόσο η μελέτη φυσικών

χαρακτηριστικών, της κατανομής των πόρων έδειξαν σημαντική βελτίωση των χαρακτηριστικών των τσιμεντοκονιαμάτων με κωδικούς N, SP και BE.

3.Ανάμειξη τριμμάτων με άμμο για θεμελίωση κτιρίων

Στην παρακάτω έρευνα που έχει πραγματοποιηθεί από τους Senetakis et al (2009) μελετήθηκε η αντικατάσταση του εδάφους με μίγματα από κομμάτια ελαστικού-άμμου. Αρχικά, έγινε προσπάθεια να υπολογιστεί η αποτελεσματικότητα της αντικατάστασης του εδάφους από το μίγμα ελαστικού-άμμου (rubber/soil mixtures-RSM) σε σχέση με τη σεισμική συμπεριφορά προσδιορίζοντας τις διαφοροποιήσεις που επιφέρει στα χαρακτηριστικά του συστήματος.

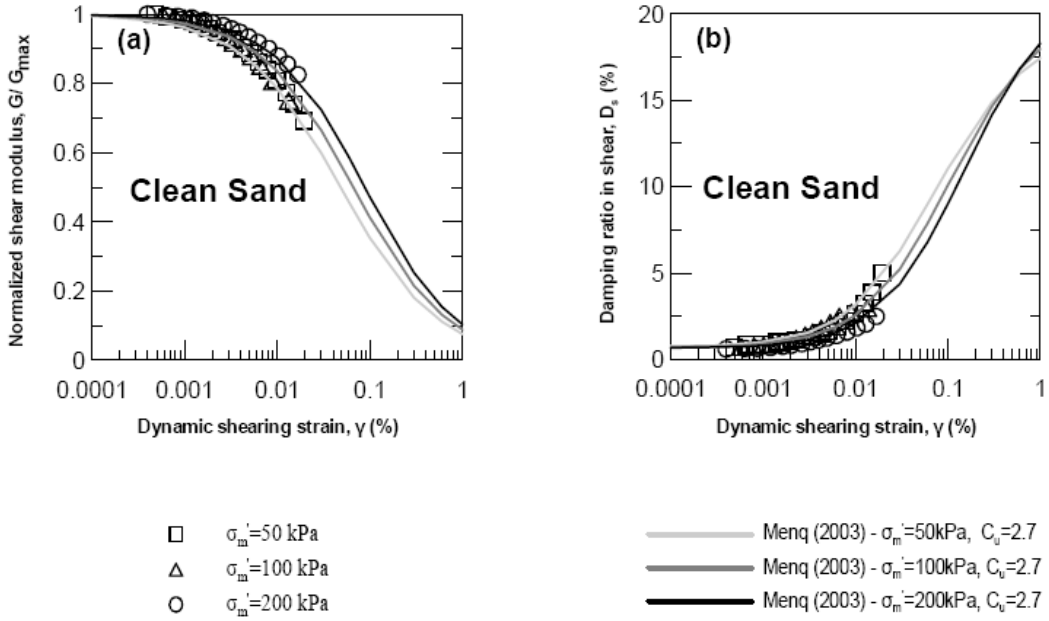
Στη συγκεκριμένη μελέτη εξετάζονται οι δυναμικές ιδιότητες μιας άμμου σε δυναμικά εργαστηριακά πειράματα. Στην πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκε καθαρή άμμος (ελάχιστα διαβαθμισμένη) με μέση διάμετρο κόκκων $D_{50}$=0,6 mm και συντελεστή συνοχής $C_u$=2.7 καθώς και ομοιογενές δείγμα κοκκοποιημένων ελαστικών οχημάτων με μέση διάμετρο κόκκων $D_{50}$ = 2,75 mm και συντελεστή ομοιογένειας $C_u$=2.37. Εξετάστηκαν ένα δείγμα καθαρής άμμου και δύο μίγματα με 5% και 15% ελαστικού κατά βάρος (άμμος/ελαστικό), ή 10% και 30% κατ' όγκο, αντίστοιχα. Τα δείγματα ήταν υπό ξηρές συνθήκες και είχαν διαστάσεις 71,1mm διάμετρο και 142,2 mm ύψος, σύμφωνα με τον κανονισμό ASTM D4015-92. Στον πίνακα 1.7 συνοψίζονται όλα τα πειραματικά δεδομένα.

| sample code | rubber percentage* (%) | e** | γd** (kN/m³) | range of σm' (kPa) | γ reference*** (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| Clean Sand | 0 | 0.588 | 17.00 | 50 – 200 | $4x10^{-4} – 7x10^{-4}$ |
| RSM5 | 5 | 0.494 | 16.50 | 25 – 200 | $5x10^{-4} – 6x10^{-4}$ |
| RSM15 | 15 | 0.471 | 14.85 | 50 – 400 | $3x10^{-4} – 4x10^{-4}$ |

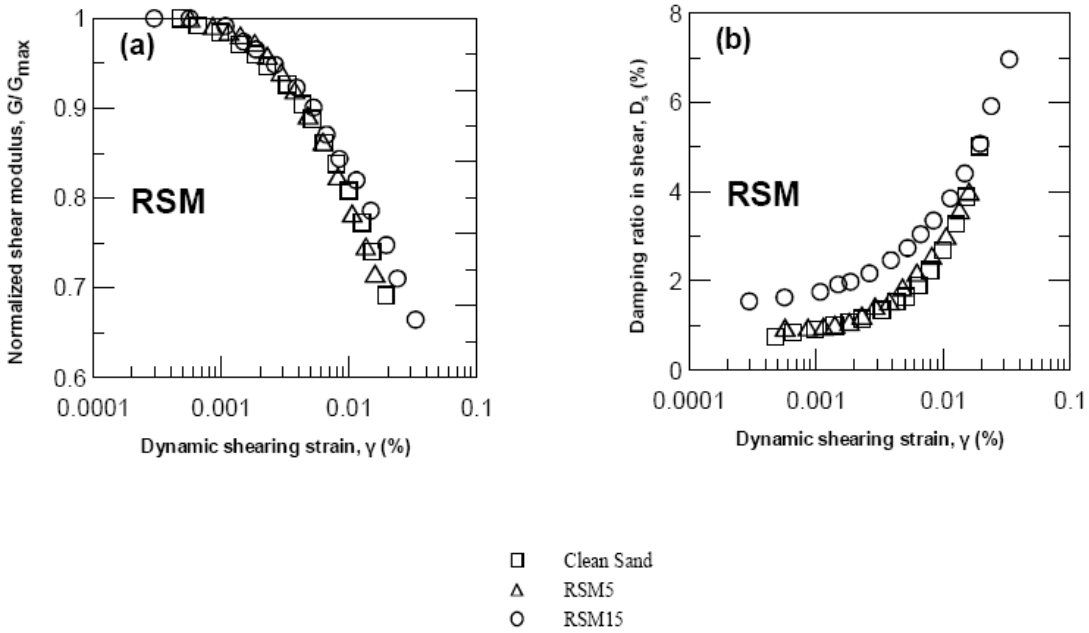
Πίνακας 1.9. Πειραματικά δεδομένα

Οι μη γραμμικές δυναμικές ιδιότητες των δοκιμίων που προέκυψαν υπό τη μορφή των καμπυλών απομείωσης του μέτρου διάτμησης $G/G_{max}$-γ και αύξηση του ποσοστού απόσβεσης D(%)-γ συναρτήσει της διατμητικής παραμόρφωσης (γ) φαίνονται στα διαγράμματα 1.13 και 1.14. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε στο διάγραμμα 1.13 στις $G/G_{max}$-γ και D(%)-γ καμπύλες του καθαρού αμμώδους εδάφους στην περιοχή της μέσης συμπίεσης, η εικόνα που παρουσιάζεται συμπίπτει με εκείνη των εμπειρικών καμπυλών που προτείνονται στη βιβλιογραφία για κοκκώδη εδάφη. Το μίγμα RSM 15% εμφανίζει πιο γραμμική συμπεριφορά και σημαντικά μεγαλύτερο ποσοστό απόσβεσης στην περιοχή μικρών παραμορφώσεων, σε σχέση με το δείγμα καθαρού εδάφους. Αντίθετα, το καθαρό έδαφος και το RSM 5% δοκίμιο δίνουν παρόμοιες καμπύλες ποσοστού απόσβεσης. Συγκεκριμένα, στην περιοχή της μέσης συμπίεσης το

αμμώδες υλικό δίνει μια μικρή τιμή ποσοστού απόσβεσης, περίπου 0,7%, ενώ για το RSM 5% και RSM 15% οι τιμές είναι 0.95% και 1.55%, αντίστοιχα.




Διάγραμμα1.13. Πειραματικές μη-γραμμικές ιδιότητες για καθαρή άμμο: (α) Απόμείωση του μέτρου διάτμησης $G/G_{max}$, (b) Αύξηση του ποσοστού απόσβεσης D(%) συναρτήσει της διατμητικής παραμόφωσης (γ).




Διάγραμμα1.14. Πειραματικές μη-γραμμικές ιδιότητες για τα μίγματα άμμου-ελαστικού: (α) Απόμείωση του μέτρου διάτμησης $G/G_{max}$, (b) Αύξηση του ποσοστού απόσβεσης D(%) συναρτήσει της διατμητικής παραμόφωσης (γ).

| Parameter | Description | values |
|---|---|---|
| $f_{fixed}$ (Hz) | fixed base structure eigenfrequency | 2.5, 5.0 |
| $m_{norm}$ | normalized structural mass | 1.0 |
| $h_{norm}$ | normalized structural height | 2.0 |
| soil type | soil category according to Eurocode 8 [9] | B, C |
| $V_{S,30}$ | top 30m weighted mean shear wave velocity (m/sec) | 400 , 290 |
| $V_{S,RSM5}$ | mean shear wave velocity of the RSM5 (m/sec) | 200 |
| $V_{S,RSM15}$ | mean shear wave velocity of the RSM15 (m/sec) | 140 |

Πίνακας1.10. Παράμετροι θεμελίωσης άμμου-εδάφους Senetakis et al.(2009)

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ

# ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ

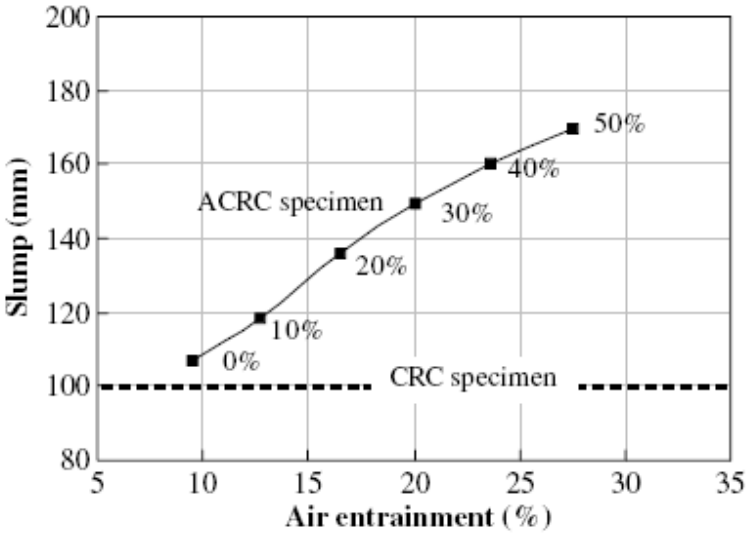
Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται μια επισκόπηση των μελετών που έχουν πραγματοποιηθεί από διάφορους ερευνητές στον τομέα της χρησιμοποίησης των ανακυκλωμένων ελαστικών οχημάτων στο σκυρόδεμα για την πλήρη ή μερική αντικατάσταση των αδρανών του.

## 2.1. Ιδιότητες νωπού σκυροδέματος

### 2.1.1 Κάθιση

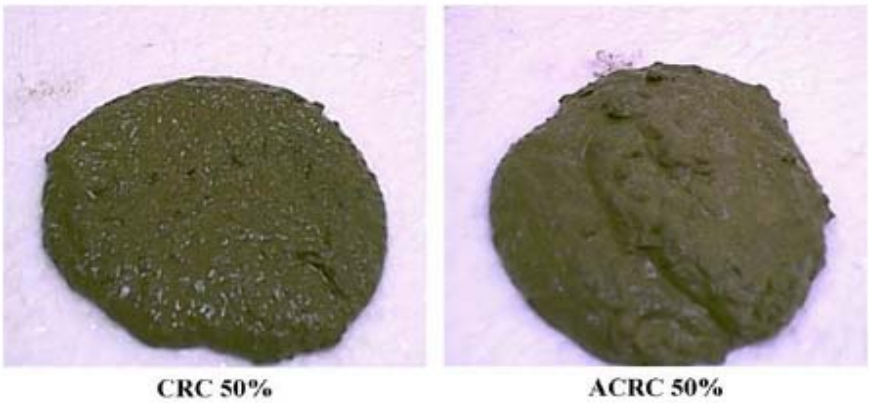
Η κάθιση είναι ένα μέτρο εργασιμότητας του σκυροδέματος το οποίο εκφράζεται με την απώλεια ύψους, σε cm, την οποία παρουσιάζει μια κωνική στήλη νωπού σκυροδέματος, όταν ανασυρθεί η κωνική μήτρα (κώνος καθίσεως). Πολλοί ερευνητές έχουν αναφερθεί στην κάθιση του μίγματος από ανακυκλωμένα ελαστικά. Αρχικά ο Raghvan (1998) έχει αναφέρει ότι τα μίγματα με ενσωματωμένα τεμάχια ελαστικού παρουσίασαν ευκολία στη χρήση (ανάμιξη, μεταφορά και τοποθέτηση), συγκρίσιμη ή και καλύτερη από το μίγμα χωρίς ελαστικά. επίσης, οι Khatib και Bayomy (1999) ερεύνησαν την ικανότητα επεξεργασίας του rubbercrete και ανέφεραν ότι υπάρχει μια μείωση στη κάθιση ανάλογη με την αύξηση του περιεχομένου ελαστικού, ως ποσοστό του συνολικού όγκου. Ανέφεραν δε ότι σε ποσοστό ελαστικού 40%, η κάθιση ήταν σχεδόν μηδενική με αποτέλεσμα το σκυρόδεμα να μην μπορεί να υποστεί επεξεργασία με το χέρι. επίσης, παρατηρήθηκε ότι τα μίγματα που δημιουργήθηκαν με πιο λεπτό κομμάτι ελαστικού ήταν πιο εύκολο να τοποθετηθούν, συγκριτικά με εκείνα που δημιουργήθηκαν από χονδροειδή κομμάτια ελαστικών. Επιπροσθέτως, στη μελέτη του Bennazouk et al. (2006) παρατηρείται η επιρροή της περιεκτικότητας του μίγματος σς αέρα στην κάθιση του σκυροδέματος. Η ικανότητα επεξεργασίας του νωπού μίγματος ACRC (aerated cement rubber composite) βελτιώνεται

σημαντικά λόγω της εισαγωγής διογκωτικού ( δηλαδή αυξημένου ποσοστού αέρα) στο μίγμα.




Διάγραμμα 2.1. Επίδραση της περιεκτικότητας αέρα στη κάθιση ενός φρέσκου μίγματος με διάφορες αναλογίες όγκου ελαστικού (0-50%).

Η κάθιση, ως μέτρο ρευστότητας του υλικού, αυξάνεται ανάλογα με την περιεκτικότητα σε αέρα. πριν την εισαγωγή αέρα στο μίγμα, η κάθιση όλων των μιγμάτων ήταν 90-100 mm. Για το ACRC (aerated cement rubber composite), που περιέχει 50% μόρια ελαστικού, σε σύγκριση και με το αντίστοιχο CRC (cement rubber composite), παρατηρήθηκε βελτίωση αφού οι τιμές της κάθισης κυμάνθηκαν από 100 έως 169,5 mm. Στη φωτογραφία 2.1 εμφανίζονται δείγματα των CRC και ACRC, και συγκεκριμένα δείγματα νωπών μιγμάτων με περιεκτικότητα ελαστικού ίση με 50%.




Φωτογραφία 2.1. Δείγματα νωπών μιγμάτων CRC και ACRC με περιεκτικότητα σε ελαστικό ίση με 50%.

Σε μια ακόμα μελέτη, που πραγματοποιήθηκε από τους Khatib και Bayomy (1999), ερευνήθηκε η επιρροή της περιεκτικότητας ελαστικού στην κάθιση και στο ειδικό βάρος. Όπως φαίνεται στον πίνακα 2.1, η αύξηση της περιεκτικότητας του

μίγματος σε κομμάτια ελαστικού οδήγησε σε μείωση τόσο στην κάθιση όσο και στο ειδικό βάρος των μιγμάτων.

| Περιεκτικότητα ελαστικού (%)[a] | Αναλογίες μιγμάτων ($kg/m^3$ του σκυροδέματος) | | | | | Αναλογία νερού τσιμέντου w/c | Κάθιση (mm) | Ειδικό βάρος ($kg/m^3$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Νερό | Τσιμέντο | Χονδροειδή μείγματα αδρανών | Λεπτά μείγματα αδρανών | Ελαστικό | | | |
| 0 | 252 | 446 | 961 | 585 | 0 | 0.56 | 75.33 | 2399 |
| 20 | 252 | 446 | 961 | 468 | 67.51 | 0.56 | 60.7 | 2217 |
| 40 | 252 | 446 | 961 | 351 | 135 | 0.56 | 35.7 | 2068.3 |
| 60 | 252 | 446 | 961 | 234 | 202.5 | 0.56 | 17.7 | 1987 |
| 80 | 252 | 446 | 961 | 117.2 | 270 | 0.56 | 10.3 | 1830.6 |
| 100 | 252 | 446 | 961 | 0 | 337.6 | 0.56 | 4.7 | 1740.6 |

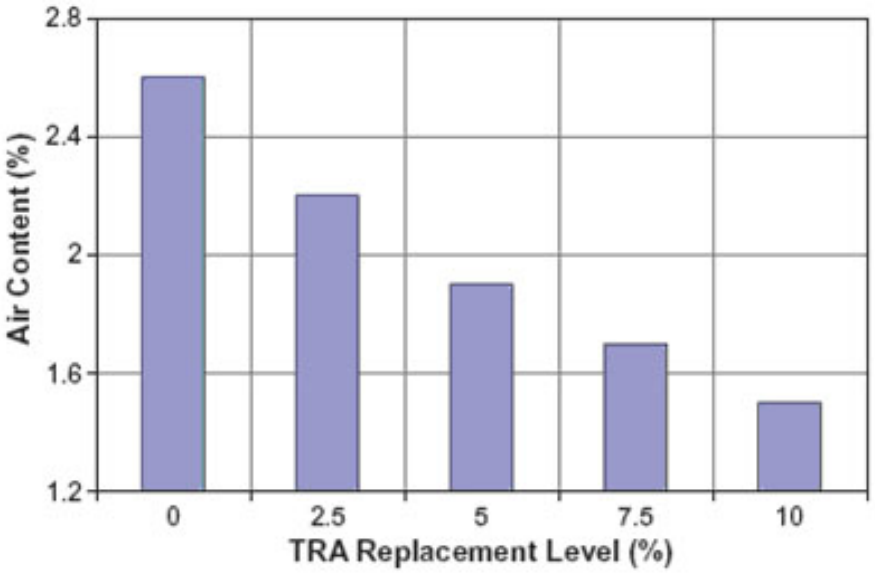
[α] αντικατάσταση ποσοστού κ.ο.

Πίνακας 2.1. Αναλογίες μιγμάτων και ιδιότητες νωπού σκυροδέματος

## 2.1.2 Περιεκτικότητα σε αέρα

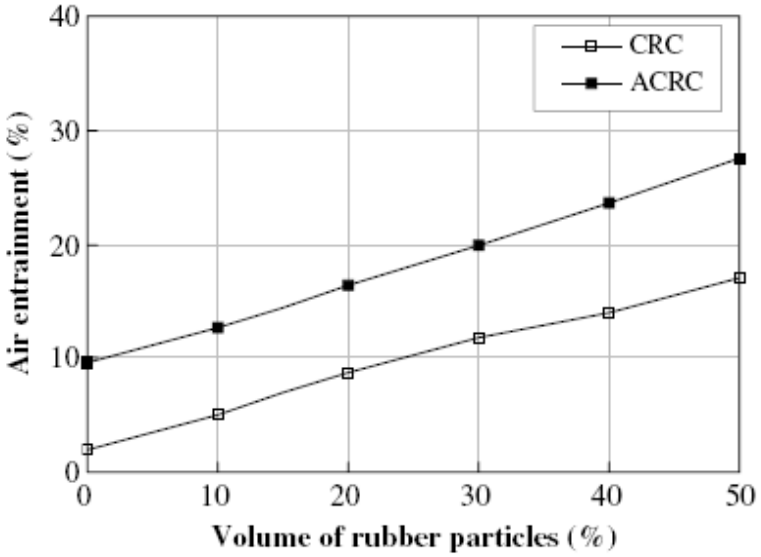
Ο Fedroff (1996) κατέγραψε υψηλότερη περιεκτικότητα σε αέρα στα μίγματα rubber concrete σε σχέση με τα μίγματα κανονικού σκυροδέματος. Παρόμοιες παρατηρήσεις έγιναν επίσης από τους Khatib και Bayomy (1999). Αυτό πιθανόν οφείλεται στη μη πολική φύση των ελαστικών μορίων και στην τάση τους να παγιδεύουν τον αέρα στις τραχιές επιφάνειές τους. Επιπλέον, όταν προστίθεται ελαστικό σε ένα συγκεκριμένο μίγμα, μπορεί να προσελκύσει αέρα δεδομένου ότι έχει την τάση να απομακρύνει το νερό, και επομένως ο αέρας να προσκολληθεί στα ελαστικά μόρια. Συμπερασματικά, η αύξηση του ελαστικού περιεχομένου οδηγεί σε υψηλότερη περιεκτικότητα αέρα στα μίγματα rubber concrete, μειώνοντας με αυτόν τον τρόπο το ειδικό βάρος των μιγμάτων.

Επίσης ο Al-akhras παρουσίασε την επίδραση της προσθήκης πούδρας από καύση ελαστικών TRA (Tire Rubber Ash) στην περιεκτικότητα αέρα του νωπού μίγματος. Η περιεκτικότητα σε αέρα εμφάνισε μείωση ανάλογη με την αύξηση του επιπέδου TRA. Συγκεκριμένα, η περιεκτικότητα του αέρα από 2,6% για το κανονικό σκυρόδεμα μειώθηκε σε 1,5% για μίγμα που περιείχε 10% TRA. Κατ' επέκταση το ποσοστό μείωσης στην περιεκτικότητα του αέρα ήταν 15%, 27%, 35%, και 42% για τα μίγματα με περιεχόμενο TRA 2,5%, 5%, 7,5%, και 10%, αντίστοιχα (διάγραμμα 2.2). Η μείωση στην περιεκτικότητα αέρα με την αύξηση του επιπέδου προσθήκης TRA μπορεί να αποδοθεί στην επίδραση της TRA όπου τα μόρια TRA γεμίζουν μερικά από τα κενά αέρα του μίγματος.




Διάγραμμα 2.2. Επίδραση της αντικατάστασης TRA στην περιεκτικότητα σε αέρα του νωπού rubber concrete

Ο Benazzouk (2002) παρατήρησε ότι όσο αυξάνεται το ποσοστό του ελαστικού στο μίγμα του νέου σκυροδέματος τόσο αυξάνεται η περιεκτικότητα σε αέρα. Στο διάγραμμα 2.3 εμφανίζονται τα ποσοστά εισαγωγής αέρα για τα δείγματα CRC (cement rubber composite) και ACRC (aerated cement rubber composite). Παρατηρείται ότι για την αναλογία όγκου ελαστικού 50%, οι περιεκτικότητες σε αέρα είναι 17,0% και 28,2%, αντίστοιχα. Η υψηλότερη περιεκτικότητα αέρα στα μίγματα μπορεί να οφείλεται στην ικανότητα των μορίων του ελαστικού να παγιδεύουν αέρα στην τραχιά επιφάνειά τους. Παρόμοιες παρατηρήσεις έγιναν κι από διάφορους άλλους ερευνητές. Η επισκόπηση της βιβλιογραφίας για την περιεκτικότητα σε αέρα του rubber concrete έδειξε ότι είναι σαφώς μια εξαιρετικά σύνθετη παράμετρος, η οποία επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες, συμπεριλαμβανομένης της διαδικασίας μίξης, την αναλογία των υλικών του μίγματος, ττο ποσοστό των λεπτών και χονδροειδών ελαστικών, τις φυσικές και χημικές ιδιότητες του τσιμέντου, την ποσότητα του ύδατος, το ποσοστό και τις ιδιότητες του αέρα και μιας σειράς άλλων παραμέτρων. Η αύξηση της περιεκτικότητας σε νερό κατά τη διάρκεια της μίξης υποβοηθάει επίσης την παγίδευση περισότερου αέρα. Προκειμένου να ελεγχθούν αυτές οι υποθέσεις, έγιναν μετρήσεις των δειγμάτων ACRC που περιέχουν ελαστικό 0%, 20% και 50% κατ' όγκο μειώνοντας την περιεκτικότητα σε νερό κατά τη διάρκεια της μίξης. Τα αποτελέσματα των δοκιμών που έγιναν συνοψίζονται στον πίνακα 2.2.




Διάγραμμα 2.3. Μεταβολή του ποσοσστού αέρα σε σχέση με την κατ' όγκο αναλογία ελαστικού.

| w/c | Air-entrainment (%) | | |
|---|---|---|---|
| | 0% Rubber | 20% Rubber | 50% Rubber |
| 0.26 | 6.3 | – | – |
| 0.30 | 9.5 | 15.8 | – |
| 0.35 | – | 16.5 | – |
| 0.47 | – | – | 28.7 |
| 0.52 | – | – | 28.2 |

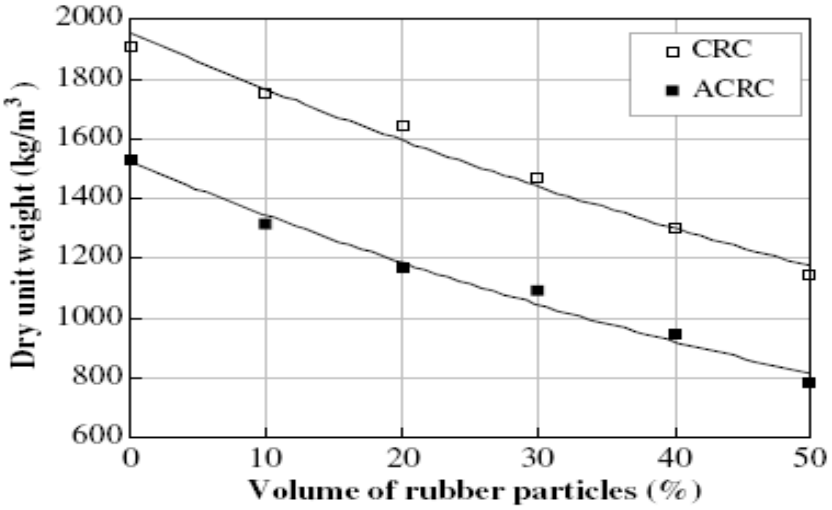
Πίνακας 2.2. Ποσοστό αέρα για διάφορους λόγους νερού/τσιμέντου σε μίγματα τύπου ACRC.

## 2.1.3 Ειδικό βάρος

Λόγω της χαμηλής πυκνότητας των ελαστικών μορίων, το ειδικό βάρος των μιγμάτων που περιέχουν ελαστικό μειώνεται ανάλογα με την αύξηση του ποσοστού του ελαστικού. Επιπλέον, η αύξηση στο περιεχόμενο του ελαστικού αυξάνει την περιεκτικότητα σε αέρα, η οποία μειώνει στη συνέχεια το ειδικό βάρος των μιγμάτων. Η μείωση του ειδικού βάρους του rubbercrete είναι ωστόσο αμελητέα όταν το περιεχόμενο ελαστικού είναι χαμηλότερο από 10-20% του συνολικού όγκου (Khatib και Bayomy, 1999).

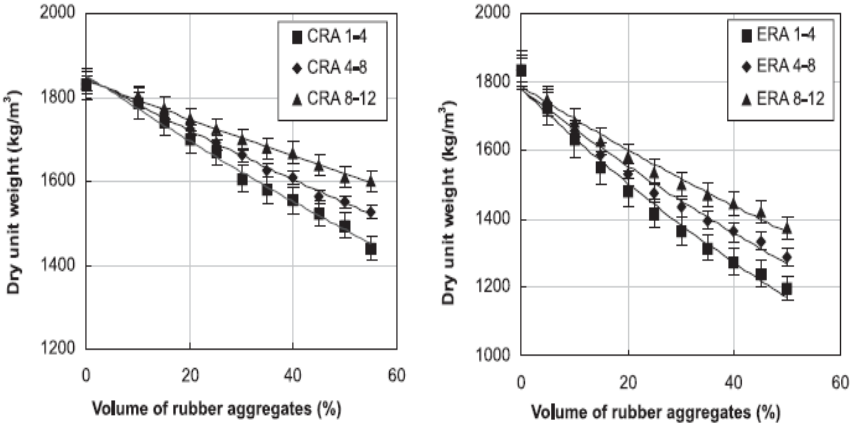
### 2.1.3.1 Ξηρό ειδικό βάρος

Οι Bennazouk et al. (2006) μελέτησαν το ξηρό ειδικό βάρος των μιγμάτων CRC (cement rubber composite) και ACRC (aerated cement rubber composite) σε σχέση με την περιεκτικότητα σε ελαστικό. Παρατηρούμε ότι η προσθήκη των ελαστικών μορίων μειώνει γραμμικά το ξηρό ειδικό βάρος. Οι τιμές μειώνονται από τα 1910 km/m$^3$ για το σκυρόδεμα χωρίς ελαστικό σε 1150 kg/m$^3$ και 785 kg/m$^3$ για CRC και ACRC που περιέχουν 50% ελαστικού, αντίστοιχα. Αυτές οι τιμές αντιστοιχούν σε μείωση 40% και 50% του ειδικού βάρους. Πρέπει να σημειωθεί ότι η μείωση στο ξηρό ειδικό βάρος του ACRC, εξαιτίας του μεγαλύτερου ποσοστού αέρα έναντι του CRC, είναι ανεξάρτητη από την αναλογία όγκου-ελαστικού και προέρχεται από τη σταθερή τιμή του ποσοστού των αεροφυσαλίδων.




Διάγραμμα 2.4.Μεταβολή ξηρού ειδικού βάρους με την περιεκτικότητα ελαστικού.

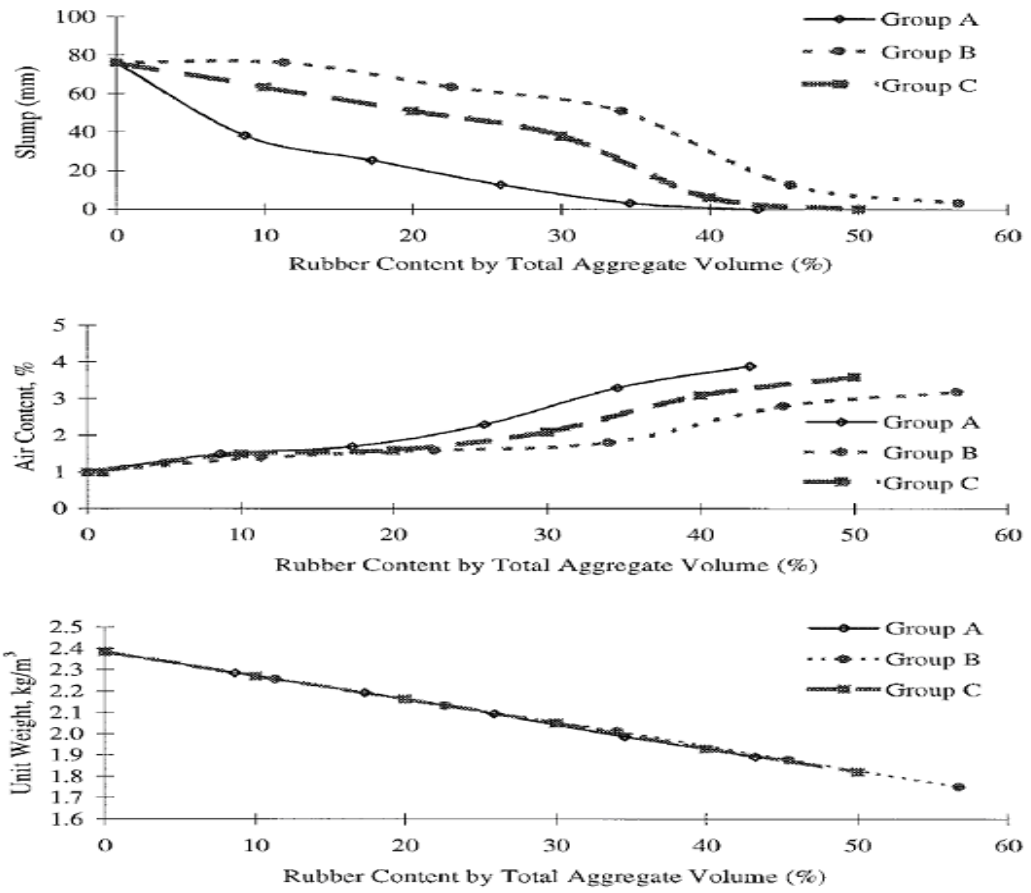
Σε άλλη μελέτη ο Bennazouk (2002) παρατήρησε ότι καθώς το ποσοστό του ελαστικού αυξάνεται στο μίγμα, το ξηρό ειδικό βάρος της σύνθεσης μειώνεται, λόγω της χαμηλής πυκνότητας του. Το διάγραμμα 2.5 παρουσιάζει αυτές τις μεταβλητές για δύο τύπους ελαστικών με διαφορετικά μεγέθη μορίων. Μείωση μέχρι 22% και 35% του ξηρού ειδικού βάρους, ανάλογα με την αναλογία ελαστικού, καταγράφηκε για τα CRAC (compact rubber aggregates composites) και ERAC (expanded rubber aggregates composites), αντίστοιχα. Μπορεί να διαπιστωθεί ότι η μείωση στο ειδικό βάρος είναι σημαντικότερη όταν το μέγεθος των μορίων ελαστικού είναι μικρότερο.




Διάγραμμα 2.5: Ξηρό ειδικό βάρος ως προς την ποσοστιαία κ.ο. αναλογία ελαστικού, για διαφορετικά μεγέθη τεμαχιδίων ελαστικού.

Στην έρευνα των Khatib και Bayomy μελετήθηκαν οι εξής παράμετροι: η κάθιση, η περιεκτικότητα αέρα και το ειδικό βάρος. Οι παραπάνω ιδιότητες του νωπού σκυροδέματος rubber concrete παρουσιάζονται στο διάγραμμα 2.6. Σε περιεκτικότητα ελαστικού 80% (40% από το συνολικό όγκο), η κάθιση ήταν περίπου μηδενική και το μίγμα δεν ήταν κατάλληλο για χειρωνακτική μίξη. Τα δείγματα με αυτό το υψηλό περιεχόμενο ελαστικού έπρεπε να συμπυκνωθούν χρησιμοποιώντας δονητή. Η μείωση στην εργασιμότητα, όπως υποδεικνύεται από τη μείωση των τιμών κάθισης σε υψηλότερα ποσσοστά κ.ο. ελαστικού, αύξησε τον περιεχόμενο αέρα και μείωσε τα ειδικά βάρη όπως φαίνεται στο διάγραμμα 2.6. Οι υψηλές τιμές της περιεκτικότητας αέρα, στα υψηλά περιεχόμενα ελαστικού, διατηρήθηκαν παρά την περεταίρω προσπάθεια συμπύκνωσης.

Το ποσοστό αύξησης στην περιεκτικότητα αέρα ήταν σχεδόν το ίδιο για τις τρεις ομάδες δοκιμίων όταν το περιεχόμενο ελαστικού ήταν <30% του συνολικού όγκου του μείγματος. Η ομάδα Β είχε χαμηλότερη περιεκτικότητα αέρα από την ομάδα Α για περιεχόμενο ελαστικού >30%. Θεωρείται ότι αυτό είναι αποτέλεσμα της πρόσθετης προσπάθειας συμπύκνωσης που απαιτείται για το δείγμα της ομάδας Β σε υψηλό περιεχόμενο ελαστικού. Γενικά, η περιεκτικότητα αέρα αυξήθηκε και το ειδικό βάρος μειώθηκε ομοιόμορφα. Το διάγραμμα 2.6 δείχνει ότι οι καμπύλες ειδικού βάρους ταιριάζουν σε μια ευθεία γραμμή και για τις τρεις ομάδες δοκιμίων. Με βάση τις ιδιότητες του νωπού σκυροδέματος, συνάγεται το συμπέρασμα ότι τα μίγματα τύπου RPCC οδηγούν σε μίγματα σκυροδέματος ελαφρύτερου βάρους. Το ειδικό βάρος μπορεί να μειωθεί έως και κατά 75% του ειδικού βάρους του κανονικού σκυροδέματος.




Διάγραμμα 2.6.Επίδραση του ποσοστού ελαστικού στις ιδιότητες των μιγμάτων τύπου RPCC

## 2.2. Βασικές μηχανικές ιδιότητες

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από σχετικές μελέτες για τις βασικές μηχανικές ιδιότητες (θλιπτική και καμπτική αντοχή, κλπ) του rubber concrete. Αρχικά οι Ali (1993), Rostami (1993), Eldin και Senouci (1993), Topcu (1995) παρουσίασαν τα αποτελέσματα της θλιπτικής αντοχής του ενισχυμένου με ελαστικό σκυροδέματος. Τα αποτελέσματα των διάφορων μελετών δείχνουν ότι το μέγεθος, τα ποσοστά και η σύσταση επιφάνειας των ελαστικών μορίων έχουν αισθητές επιπτώσεις στη θλιπτική αντοχή των μιγμάτων rubber concrete. Οι Eldin και Senouci (1993) ανέφεραν ότι τα μίγματα με κομμάτια από ελαστικά εμφάνισαν σημαντικά χαμηλότερες θλιπτικές και καμπτικές αντοχές από το κανονικό σκυρόδεμα. Υπήρξε περίπου 85% μείωση της θλιπτικής αντοχής και 50% μείωση της καμπτικής αντοχής όταν αντικαταστάθηκαν πλήρως τα χονδρόκοκκα αδρανή από τα ελαστικά τεμαχίδια. Εντούτοις, μια μείωση περίπου 65% της θλιπτικής αντοχής και μέχρι 50% της καμπτικής αντοχής παρατηρήθηκε όταν αντικαταστάθηκε πλήρως τα λεπτόκοκκα αδρανή από λεπτότερα μόρια τύπου crumb.

Οι Khatib και Bayomy (1999) καθώς και ο Topcu (1995) έδειξαν επίσης ότι η προσθήκη των χονδρόκοκκων κομματιών ελαστικού στο σκυρόδεμα μείωσε τη θλιπτική αντοχή περισσότερο συγκριτικά με την προσθήκη των λεπτών κομματιών ελαστικού. Επίσης, οι μελέτες αυτές έχουν δείξει ότι εάν τα ελαστικά μόρια έχουν τραχύτερη επιφάνεια ή μέσω κάποιας προεργασίας, μπορεί να οδηγηθούμε σε υψηλότερη θλιπτική αντοχή.

Οι Naik και Singh, 1991 μελέτησαν την επίδραση της όξινης προεργασίας στα ελαστικά μόρια, τα οποία ενυδατώθηκαν με NaOH για 5 λεπτά και έπειτα ξεπλύθηκαν με νερό. Αυτή η επεξεργασία ενίσχυσε την αντοχή του σκυροδέματος μέσω μιας μικροσκοπικής αύξησης στη σύσταση της επιφάνειας των ελαστικών μορίων. Οι Eldin και Senouci (1993) επίσης ενυδάτωσαν και έπλυναν τα ελαστικά μέρη με νερό για να αφαιρέσουν τους μολυσματικούς παράγοντες, ενώ ο Rostami (1993) χρησιμοποίησε νερό και διαλυτικό τετραχλωριδίο άνθρακα, και νερό σε συνδυασμό με ένα καθαριστή μίξεων λάτεξ. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το σκυρόδεμα rubber concrete που περιέχει ελαστικά μόρια που ξεπλύθηκαν με νερό εμφάνισε υψηλότερη θλιπτική αντοχή περίπου 16% από το αντίστοιχο σκυρόδεμα που περιέχει τα μη επεξεργασμένα ελαστικά μέρη, ενώ αυτή η βελτίωση στη θλιπτική αντοχή ήταν 57% όταν χρησιμοποιήθηκαν ελαστικά σύνολα που είχαν υποστεί επεξεργασία με τετραχλωρίδιο άνθρακα.

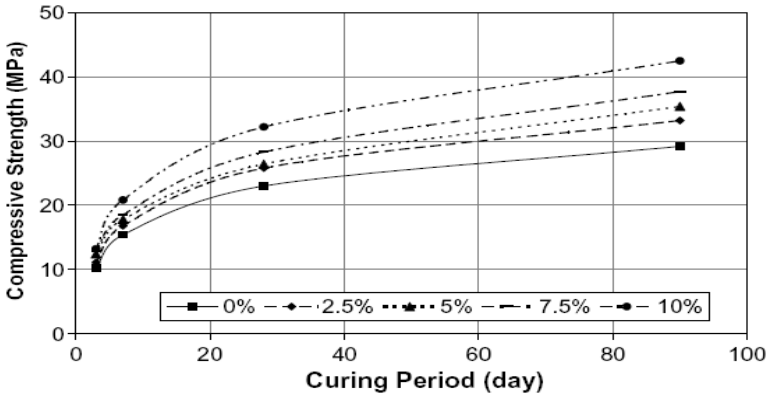
Οι Biel και Lee (1996) ανέφεραν ότι ο τύπος τσιμέντου έχει σημαντικές επιπτώσεις στη θλιπτική αντοχή του rubber concrete. Χρησιμοποίησαν δύο τύπους τσιμέντου, τσιμέντο οξυχλωριδίων μαγνησίου και τσιμέντο του Πόρτλαντ, στην παραγωγή rubber concrete. Το ποσοστό της αντικατάστασης του μέρους λεπτών αδρανών με ελαστικό ποικίλει από 0% έως 90% σε βάρος. Παρατηρήθηκε απώλεια 90% σε θλιπτική αντοχή τόσο για το σύνθετο σκυρόδεμα με τσιμέντο τύπου Πόρτλαντ (PCRC) όσο και για το σύνθετο σκυρόδεμα με τσιμέντο οξυχλωριδίων μαγνησίου (MOCRC). Το σκυρόδεμα τσιμέντου οξυχλωριδίων μαγνησίου παρουσίασε περίπου 2.5 φορές μεγαλύτερη θλιπτική αντοχή έναντι του σκυροδέματος με τσιμέντο τύπου Πόρτλαντ τόσο με όσο και χωρίς την προσθήκη του ελαστικού. Όσον αφορά στην καμπτική αντοχή, τα δείγματα με τσιμέντο τύπου Πόρτλαντ, που δημιουργήθηκαν με 25% ποσοστό ελαστικού ως προς το συνολικό όγκο, διατήρησαν 20% της καμπτικής αντοχής τους, ενώ τα δείγματα τσιμέντου οξυχλωριδίων μαγνησίου με το ίδιο περιεχόμενο ελαστικού διατήρησαν 34% της καμπτικής αντοχής τους.

### 2.2.1 Θλιπτική αντοχή

Ο Al-Akhras παρουσίασε (βλ. διάγραμμα 2.7) την ανάπτυξη της θλιπτικής αντοχής για το χρονικό διάστημα 3,7, 28, και 90 ημερών για το μίγμα που περιέχει ποσοστό 0%, 2,5%, 5%, 7,5%, και 10% TRA. Το ποσοστό ανάπτυξης της θλιπτικής αντοχής είναι σχετικά υψηλό μεταξύ των 3 και 7 ημερών. Μεταξύ 28 και 90 ημερών, το ποσοστό ανάπτυξης της θλιπτικής αντοχής είναι σχετικά μικρό. Η γρήγορη ανάπτυξη της θλιπτικής αντοχής του κονιάματος που περιέχει

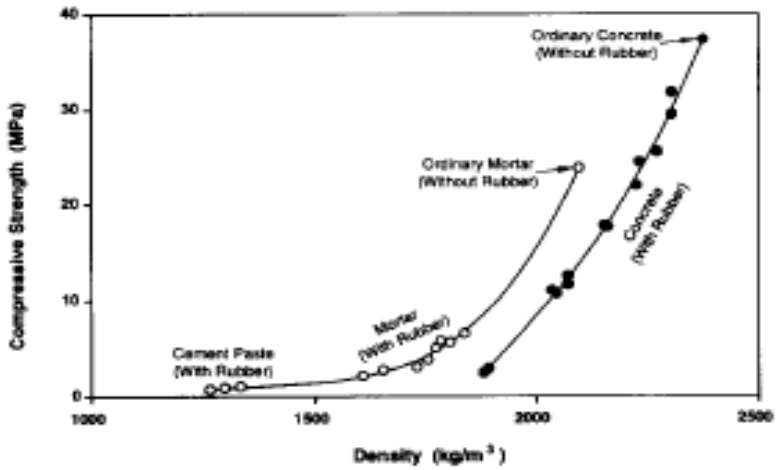
τα διαφορετικά επίπεδα TRA (Tire rubber ash) κατά τη διάρκεια των 3 και 7 ημερών δείχνει τη γρήγορη ενυδάτωση. Η ποσοστιαία αύξηση σε θλιπτική αντοχή για κάθε επίπεδο TRA ήταν υψηλότερη αρχικά. Η θλιπτική αντοχή των δειγμάτων κονιάματος αυξήθηκε με την αύξηση του TRA για όλα τα χρονικά διαστήματα (3,7,28 και 90 ημέρες).

Η αύξηση στη θλιπτική αντοχή των δειγμάτων κονιάματος σε 7 ημέρες ήταν 9%, 16%, 20%, και 35% σε περιεχόμενο TRA 2,5%, 5%, 7,5%, και 10%, αντίστοιχα. Η ποσοστιαία αύξηση στη θλιπτική αντοχή των δειγμάτων σε 28 ημέρες ήταν 12%, 14%, 23%, και 40% σε περιεχόμενο TRA 2,5%, 5%, 7,5%, και 10%, αντίστοιχα. Η ποσοστιαία αύξηση της θλιπτικής αντοχής των δειγμάτων κονιάματος των 90 ημερών ήταν 14%, 21%, 29%, και 45% σε περιεχόμενο TRA 2,5%, 5%, 7,5%, και 10%, αντίστοιχα. Η αύξηση στην αντοχή του μίγματος (θλιπτική και καμπτική) με την περιεκτικότητα TRA μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι το TRA συμπεριφέρεται ως υλικό πληρώσεως στα μίγματα rubber concrete.



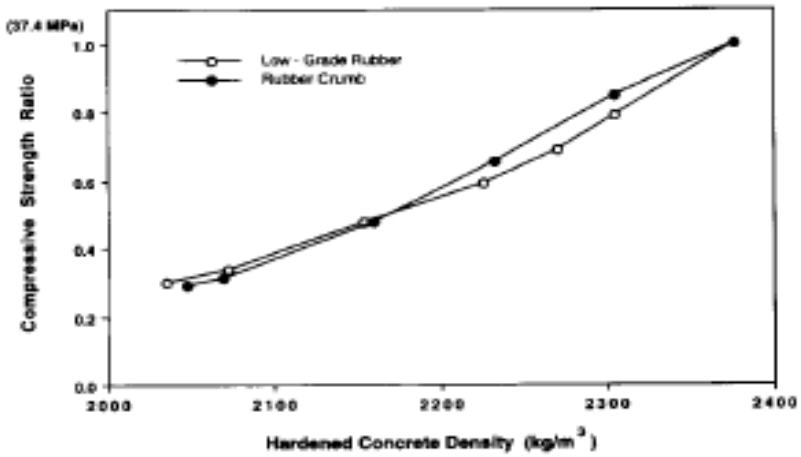

Διάγραμμα 2.7. Επίδραση της TRA στη χρονική εξέλιξη της θλιπτικής αντοχής

Το διάγραμμα 2.8. παρουσιάζει τη μεταβολή της θλιπτικής αντοχής σύνθετου σκυροδέματος για διάφορα ποσοστά ελαστικού. Επίσης δείχνει ότι, για παρόμοια πυκνότητα, οι μειώσεις της θλιπτικής αντοχής των μιγμάτων σκυροδέματος ήταν πολύ μεγαλύτερες από εκείνες των άλλων μιγμάτων. Πολλές μεταβλητές (αναλογία Ν/Τ, συνολικό περιεχόμενο ελαστικού, κ.λπ.) περιλήφθηκαν στις δοκιμές αυτές, και επομένως δεν θα ήταν δυνατό να εξηγηθούν πλήρως οι λόγοι για τη συμπεριφορά που παρουσιάζεται στο διάγραμμα 2.8 (π.χ. σχηματισμός μικρορωγμών, κλπ).




Διάγραμμα 2.8.Μεταβολή της θλιπτικής αντοχής συναρτήσει της πυκνότητας για διάφορα μίγματα

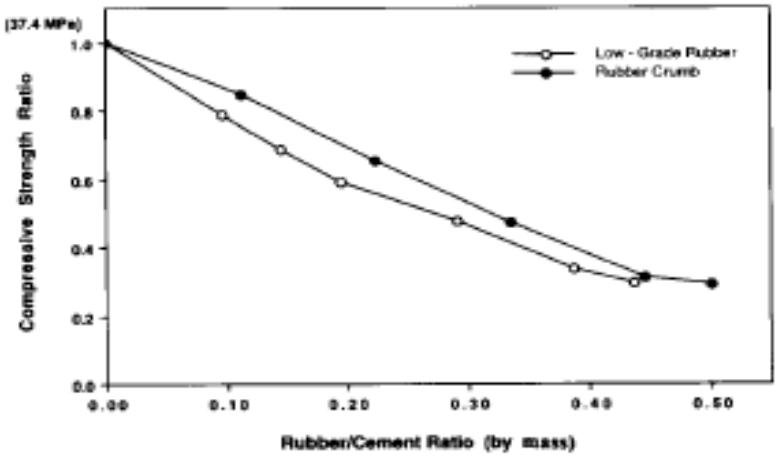
Δοκίμια σκυροδέματος που έγιναν με την προσθήκη ελαστικών τεμαχιδίων και έχοντας παρόμοια πυκνότητα, εμφανίστηκαν να παρουσιάζουν παρόμοιες θλιπτικές αντοχές. Το διάγραμμα 2.9 παρουσιάζει τη μεταβολή στη θλιπτική αντοχή (η αντοχή του σκυροδέματος με το ελαστικό σε σχέση με αυτό χωρίς το ελαστικό) σε σχέση με την πυκνότητα του σκυροδέματος. Το σχήμα δείχνει ότι τα σκυροδέματα που περιέχουν οποιοδήποτε τύπο ελαστικού είχαν παρόμοια θλιπτική αντοχή όταν η πυκνότητα του σκυροδέματος ήταν κάτω από 2150kg/m$^3$. Για μεγαλύτερη πυκνότητα, οι θλιπτικές αντοχές των σκυροδεμάτων που περιέχουν κομμάτια ελαστικού ήταν ελαφρώς υψηλότερες, με μια μέγιστη αύξηση περίπου 10%.




Διάγραμμα 2.9.Μεταβολή της θλιπτικής αντοχής ανάλογα με την πυκνότητα του σύνθετου σκυροδέματος.

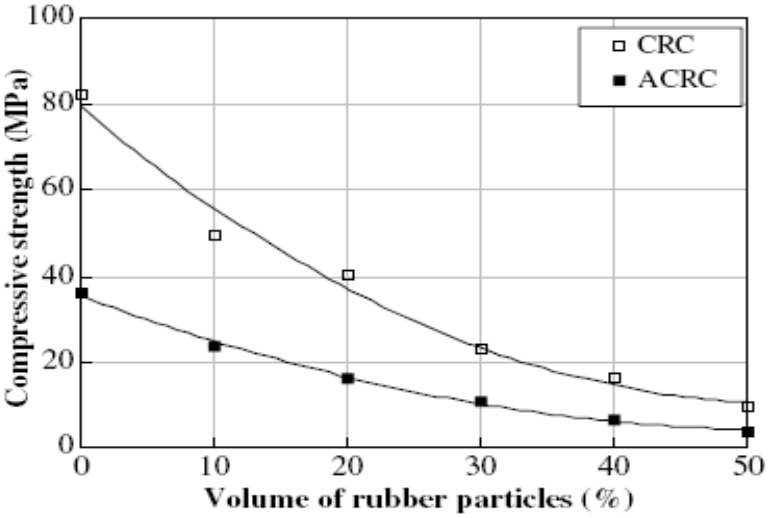
Η επίδραση του ποσοστού και του τύπου ελαστικού στη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος φαίνεται στο διάγραμμα 2.10. Γενικά το σκυρόδεμα που περιέχει ελαστικό είχε μια υψηλότερη θλιπτική αντοχή από το σκυρόδεμα που περιέχει

πιο λεπτόκοκκα ελαστικά, για παρόμοια αναλογία τσιμέντου/ελαστικού με μέγιστη διαφορά στην αντοχή περίπου 15%. Εντούτοις, η διαφορά στη θλιπτική αντοχή εμφανίστηκε να είναι αμελητέα για τα σκυροδέματα με αναλογίες ελαστικού/τσιμέντου 0,45 και άνω.



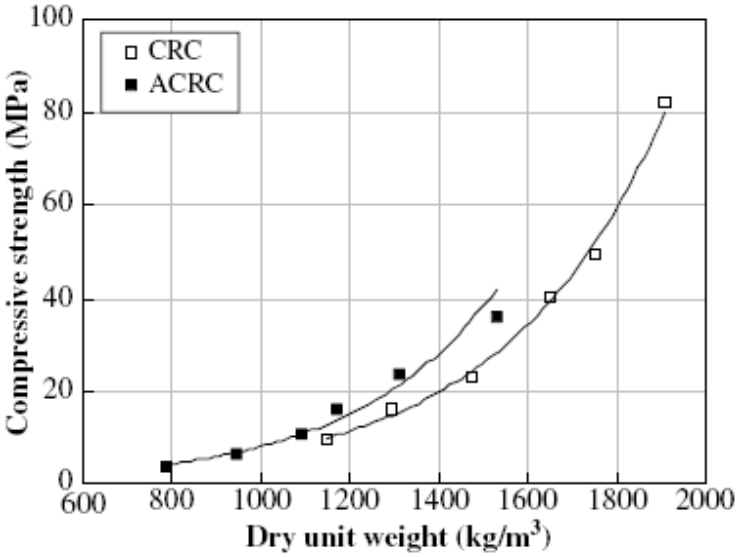

Διάγραμμα 2.10. Επιρροή του είδους του ελαστικού και του ποσοστού του στη θλιπτική αντοχή του σύνθετου σκυροδέματος

Οι Bennazouk et al. (2006) παρουσίασαν τα παρακάτω διαγράμματα που έδειξαν ότι όσο αυξάνεται το ποσοστό του ελαστικού μειώνεται η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος. Στη μελέτη τους χρησιμοποίησαν τα υλικά τύπου ACRC (aerated cement rubber composite) και CRC (cement rubber composite). Οι τιμές αντόχης είναι περίπου 10,5 MPa για δείγματα CRC και 3,8 MPa για ACRC, όταν περιέχουν 50% ποσοστό ελαστικού.



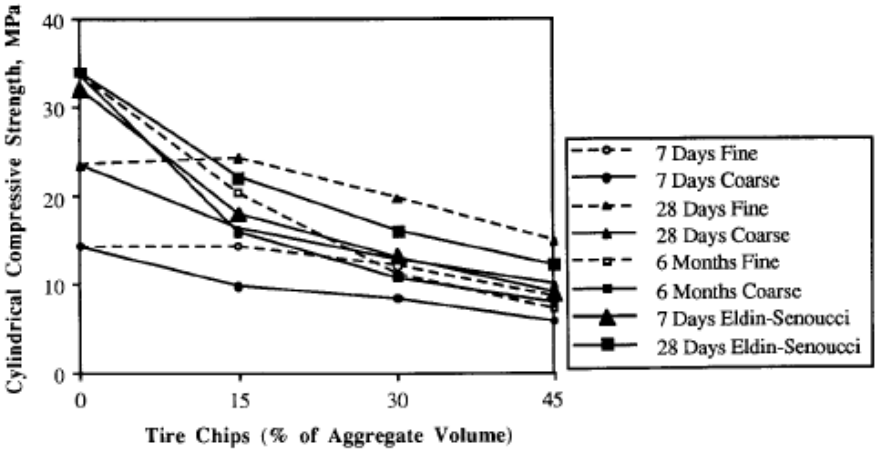

Διάγραμμα 2.11. Μεταβολή της θλιπτικής αντοχής συναρτήσει του ποσοστού ελαστικού

Το διάγραμμα 2.12. παρουσιάζει μια σχέση μεταξύ της θλιπτικής αντοχής και της πυκνότητας του μίγματος. Είναι εμφανές ότι μείωση της πυκνότητας (ρ) προκαλεί μείωση της θλιπτικής αντοχής Rc (Mpa). Οι ακόλουθες εμπειρικές σχέσεις: Rc=0.0423*exp(0.0027ρ) και Rc=0.0365*exp(0.0031ρ) (με συντελεστές συσχέτισης $R^2$=0,99 και $R^2$=0.98, αντίστοιχα), προτάθηκαν για τα δείγματα ACRC και CRC. Επιπλέον, το διάγραμμα 2.12 δείχνει ότι για το ίδιο ξηρό ειδικό βάρος, το δείγμα ACRC έχει υψηλότερη θλιπτική αντοχή από το δείγμα CRC. Για το ίδιο ξηρό ειδικό βάρος, το δείγμα ACRC έχει επίσης χαμηλότερες αναλογίες N/T.



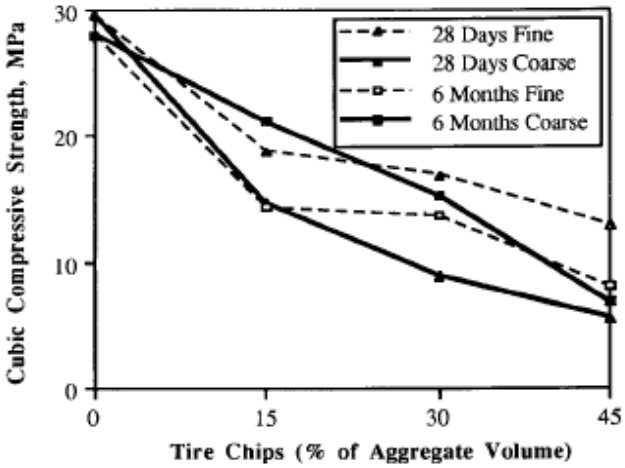

Διάγραμμα 2.12.Μεταβολή της θλιπτικής αντοχής συναρτήσει της πυκνότητας.

Ο Topcu στα διαγράμματα 2.13 και 2.14 αναφέρει τις τιμές της θλιπτικής αντοχής για το σύνθετο σκυρόδεμα. Όπως φαίνεται σε αυτά τα σχήματα, οι τιμές αντοχής του σκυροδέματος μειώνονται αρκετά με αυξανόμενο το ποσοστό των μικρο-τεμαχίων ελαστικών στο τέλος των 7, 28 ημερών και 6 μηνών. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα 2.13, η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος σε 7 ημέρες είναι 14,27 Mpa. Εντούτοις, μειώνεται σε 14.16, 12.00, και 8.54 Mpa με την προσθήκη 15, 30, και 45% των λεπτών chip ελαστικών, αντίστοιχα. Επιπλέον, μειώνεται σε 9.68, 8.38 και 5.80 Mpa με την προσθήκη των ανωτέρω ποσοστών των χοντροειδών ελαστικών κομματιών. Ενώ η θλιπτική αντοχή του κανονικού σκυροδέματος των 28 ημερών ήταν 23.48 Mpa, με την προσθήκη των λεπτόκκοκων ελαστικών μειώθηκε ως 24.22, 19.70 και 14.77 Mpa. Επιπλέον, μειώθηκε σε 16.18, 12.62, και 9.90 Mpa με την προσθήκη των χονδρόκοκκων chip ελαστικών. Για τα δείγματα των έξι μηνών η τιμή της αντοχής του κανονικού σκυροδέματος ήταν 33.67 Mpa. Εντούτοις, βρέθηκε ως 20.23, 11.06, και 7.16 Mpa με το μίγμα λεπτών λωρίδων ελαστικών, και 15.75, 10.82, και 7.72 Mpa με το μίγμα παχύτερων λωρίδων ελαστικών.




Διάγραμμα 2.13. Χρονική μεταβολή στη θλιπτική αντοχή κυλινδρικού δοκιμίου ανάλογα με το ποσοστό ελαστικού

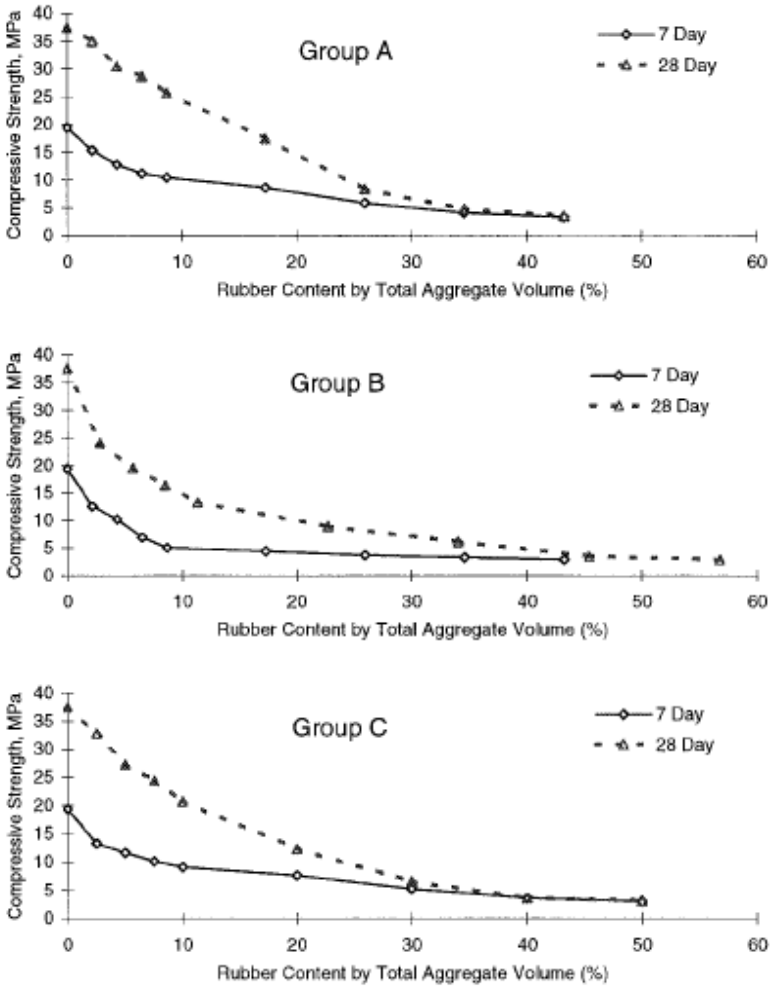
Το διάγραμμα 2.14 παρουσιάζει τη θλιπτική αντοχή όσον αφορά στα ποσοστά των κομματιών ελαστικών που προστίθενται. Όπως φαίνεται στο σχήμα, η θλιπτική αντοχή του C20 κανονικού σκυροδέματος των 28 ημερών ήταν 29.50 Mpa. Στη συνέχεια υπολογίσθηκε 18.80, 16.90, και 12.90 Mpa για την προσθήκη 15, 30 και 45% των λεπτών ελαστικών chip, και 14.60, 8.91, και 5.51 Mpa για την προσθήκη του ίδιου ποσού χονδροειδών ελαστικών chip, αντίστοιχα. Για τους 6 μήνες, η θλιπτική αντοχή ήταν 28.00 Mpa για το κανονικό σκυρόδεμα ενώ μειώθηκε σε 14.40, 13.60 και 8.00 Mpa, και 21.00, 15.27, και 6.87 Mpaα γι την προσθήκη των λεπτών και χονδροειδών ελαστικών κομματιών, αντίστοιχα. Αυτό υποδηλώνει ότι τα χονδροειδή κομμάτια ελαστικού μειώνουν τις θλιπτικές αντοχές περισσότερο από ότι τα λεπτά chip ελαστικού.




Διάγραμμα 2.14. Χρονική μεταβολή στη θλιπτική αντοχή κυβικού δοκιμίου ανάλογα με το ποσοστό ελαστικού

Οι Eldin και Senoucci ανέφεραν απώλειες μέχρι 85% στη θλιπτική αντοχή και μέχρι 50% στην εφελκυστική αντοχή. Όπως αναφέρεται όμως στην ίδια εργασία,

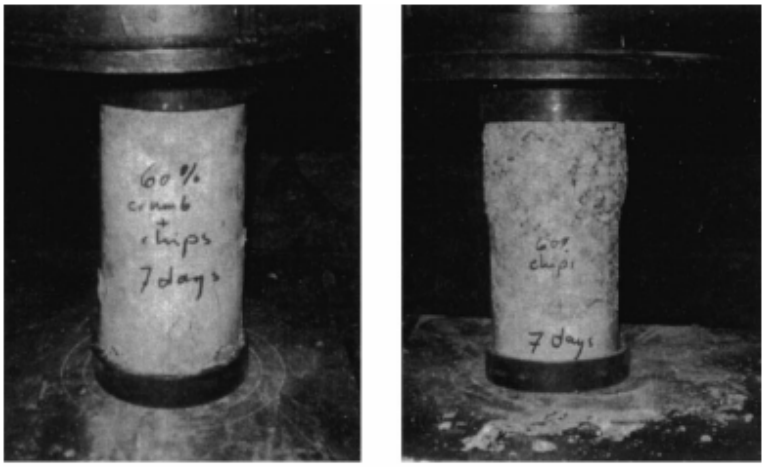
το rubber concrete έχει τη δυνατότητα να υποβληθεί σε μεγαλύτερη ελαστική παραμόρφωση πριν από την αστοχία. Τα δείγματα που περιέχουν το ελαστικό δεν επέδειξαν τόσο ψαθυρή αστοχία υπό θλίψη λόγω της πλαστιμής συμπεριφοράς του ελαστικού. Ο διαχωρισμός ήταν βαθμιαίος ανάλογα με τον τύπο και το ποσοστό ελαστικού. Οι Khatib- Bayomy παρουσίασαν επίσης την επίδραση του ποσοστού του ελαστικού στη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος. Στο διάγραμμα 2.15 παρατηρούμε μια συστηματική μείωση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος με την αύξηση της περιεκτικότητας σε ελαστικό.




Διάγραμμα 2.15. Επίδραση του ποσοστού του ελαστικού στη θλιπτικη αντοχή

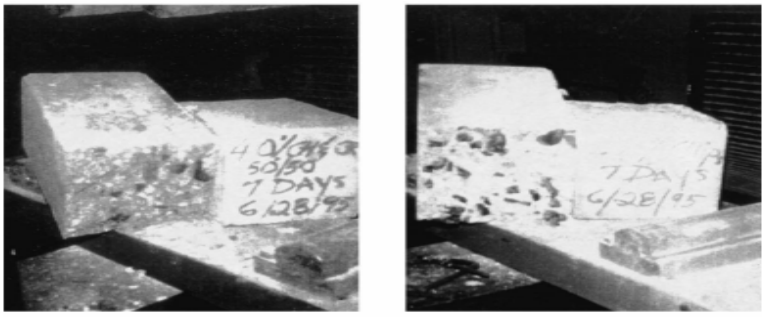
Η αρχική θλιπτική αντοχή των 28 ημέρων ήταν περίπου 38 MPa για το κανονικό σκυρόδεμα και μειώθηκε σε σχεδόν 3 MPa όταν έγινε πλήρης αντικατάσταση των χονδροειδών αδρανών από τα κομμάτια ελαστικών. Για το μίγμα με την αντικατάσταση κομματιών με ελαστικό, η αντοχή μειώθηκε περίπου σε 3,6 και 3,2 Mpa για τα μίγματα με αντικατάσταση ελαστικών κομματιών (crumb) και τσιπ (chip), αντίστοιχα. Αυτό αντιπροσωπεύει περίπου ένα 90% στη μείωση της αντοχής των 28 ημερών όταν αντικαθίσταται το 100% του συνολικού όγκου από το ελαστικό. Εντούτοις, για την αντοχή των 7 ημερών, το ποσοστό της μείωσης

αντοχής ήταν πολύ λιγότερο από αυτή των 28 ημερών. Αν και η μείωση της αντοχής είναι βεβαίως μια αρνητική ιδιότητα που μπορεί να εμποδίσει τη χρήση του ελαστικού, κάποιος μπορεί να δει και τη θετική επίδραση που έχει στη μορφή αστοχίας. Παρατηρήθηκε σε όλες τις δοκιμές ότι για αύξηση του περιεχόμενου ελαστικού τα δείγματα τείνουν να αστοχήσουν βαθμιαία με κωνική μορφή αστοχίας (βλ. φωτογραφίες 2.2 και 2.3). Τα δείγματα άντεξαν μια πολύ υψηλότερη παραμόρφωση από το μίγμα ελέγχου κανονικού σκυροδέματος. Με το περιεχόμενο ελαστικού κοντά σε 60%, τα δείγματα είχαν μια σημαντική πλαστική παραμόρφωση. Κατά συνέπεια, η δυνατότητα να παραμορφωθούν πλαστικά αυξάνεται σημαντικά.




(a) Typical Mode of Failure in Compression for Rubberized PCC Mixtures

Φωτογραφία 2.2. Φάσεις αστοχίας κυλινδρικών δοκιμίων



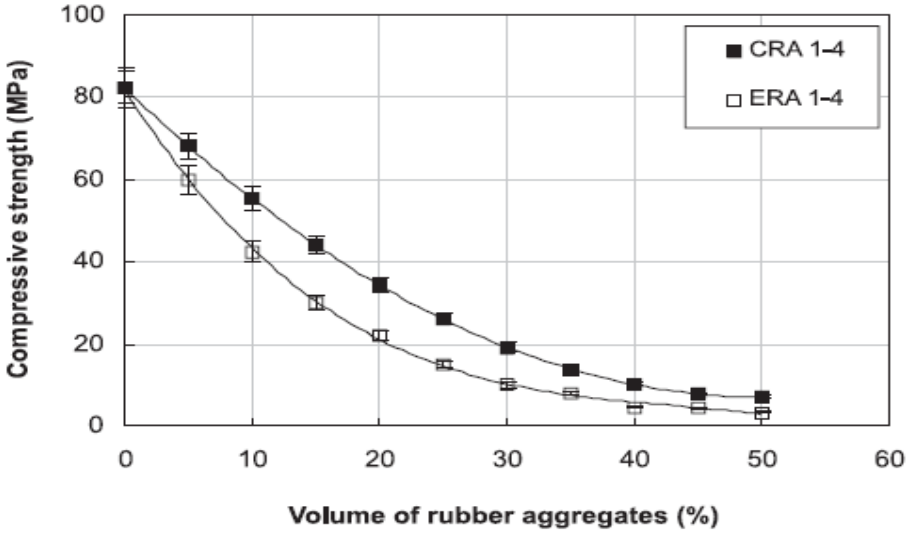

(b) Distribution of Crumb and Chip Particles in the Rubberized PCC Mixtures

Φωτογραφία 2.3. Εικόνες κυβικών δοκιμίων

| Volume of rubber (%) | Sieve size (mm) | $\rho$ (kg/m$^3$) | | $E_d^*$ (MPa) | | $R_C$ (MPa) | | $R_F$ (MPa) | | $E$ (MPa) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | CRAC | ERAC | CRAC | ERAC | CRAC | ERAC | CRAC | ERAC | CRAC | ERAC |
| 0 | | 1832.5 | 1832.5 | 25,397 | 25,397 | 82.5 | 82.5 | 3.38 | 3.38 | 20,000 | 20,000 |
| 5 | 1–4 | 1785.8 | 1724.0 | 23,000 | 18,400 | 68.0 | 59.0 | 3.4 | 3.6 | – | – |
| | 4–8 | 1793.6 | 1735.5 | 23,800 | 19,400 | 63.0 | 54.0 | 3.2 | 3.3 | – | – |
| | 8–12 | 1800.0 | 1748.0 | 24,600 | 19,700 | 60.5 | 51.0 | 3.00 | 3.0 | – | – |
| 10 | 1–4 | 1740.5 | 1630.0 | 20,015 | 17,409 | 55.0 | 42.0 | 3.52 | 3.6 | 15,000 | 12.5 |
| | 4–8 | 1757.0 | 1655.0 | 21,850 | 18,455 | 48.0 | 36.0 | 3.35 | 3.5 | 14,000 | 12,000 |
| | 8–12 | 1773.5 | 1683.0 | 23,809 | 18,952 | 43.0 | 32.0 | 3.23 | 3.2 | 12,000 | 12,000 |
| 15 | 1–4 | 1698.0 | 1548.0 | 20,337 | 14,222 | 44.0 | 30.0 | 3.56 | 3.8 | – | |
| | 4–8 | 1723.0 | 1587.0 | 21,040 | 15,238 | 36.0 | 27.0 | 3.37 | 3.5 | – | |
| | 8–12 | 1747.5 | 1627.0 | 21,424 | 16,031 | 31.0 | 24.0 | 3.25 | 3.0 | – | |
| 20 | 1–4 | 1672.0 | 1477.0 | 18,053 | 11,174 | 34.0 | 22.0 | 3.67 | 3.9 | 12,000 | 9000 |
| | 4–8 | 1690.0 | 1528.0 | 19,079 | 12,169 | 27.0 | 16.0 | 3.56 | 3.7 | 10,000 | 8000 |
| | 8–12 | 1722.0 | 1578.0 | 19,963 | 13,170 | 21.0 | 14.0 | 3.42 | 3.5 | 9000 | 7000 |
| 25 | 1–4 | 1606.0 | 1415.0 | 16,145 | 9159 | 26.0 | 15.0 | 3.57 | 3.8 | – | – |
| | 4–8 | 1661.0 | 1477.0 | 16,961 | 10,428 | 20.0 | 13.0 | 3.24 | 3.4 | – | – |
| | 8–12 | 1700.0 | 1537.0 | 18,183 | 11,682 | 15.0 | 11.0 | 3.00 | 3.2 | – | – |
| 30 | 1–4 | 1578.0 | 1362.0 | 13,699 | 7285 | 19.0 | 10.0 | 3.42 | 3.6 | 10,000 | 8000 |
| | 4–8 | 1626.0 | 1433.0 | 15,313 | 8444 | 15.0 | 7.0 | 3.00 | 3.3 | 9000 | 7500 |
| | 8–12 | 1677.0 | 1502.0 | 16,565 | 10,603 | 10.0 | 6.0 | 2.68 | 2.8 | 8000 | 6000 |
| 35 | 1–4 | 1553.0 | 1314.0 | 12,303 | 6206 | 14.0 | 8.0 | 3.25 | 3.6 | – | – |
| | 4–8 | 1608.0 | 1395.0 | 13,187 | 7460 | 11.0 | 6.5 | 3.00 | 3.0 | – | – |
| | 8–12 | 1668.0 | 1470.0 | 14,780 | 8984 | 7.0 | 5.0 | 2.35 | 2.5 | – | – |
| 40 | 1–4 | 1522.0 | 1274.0 | 10,621 | 5079 | 10.0 | 6.0 | 2.85 | 3.3 | 7000 | 6500 |
| | 4–8 | 1562.0 | 1362.0 | 12,081 | 6507 | 8.0 | 5.0 | 2.30 | 2.7 | 6000 | 5000 |
| | 8–12 | 1636.0 | 1443.0 | 13,542 | 8412 | 5.0 | 3.5 | 2.00 | 2.0 | 5000 | 3500 |
| 45 | 1–4 | 1494.0 | 1238.0 | 10,029 | 4445 | 8.0 | 4.0 | 2.40 | 3.5 | | – |
| | 4–8 | 1563.0 | 1334.0 | 11,105 | 6031 | 6.0 | 3.5 | 1.80 | 3.0 | – | – |
| | 8–12 | 1607.0 | 1420.0 | 12,930 | 7785 | 4.0 | 2.5 | 1.50 | 2.5 | – | – |
| 50 | 1–4 | 1438.0 | 1195.0 | 9730 | 4126 | 6.5 | 3.4 | 2.40 | 2.8 | – | – |
| | 4–8 | 1526.0 | 1288.0 | 10,566 | 5558 | 5.0 | 2.6 | 1.80 | 2.4 | – | – |
| | 8–12 | 1599.5 | 1373.0 | 12,120 | 6667 | 3.5 | 2.0 | 1.50 | 2.0 | – | – |

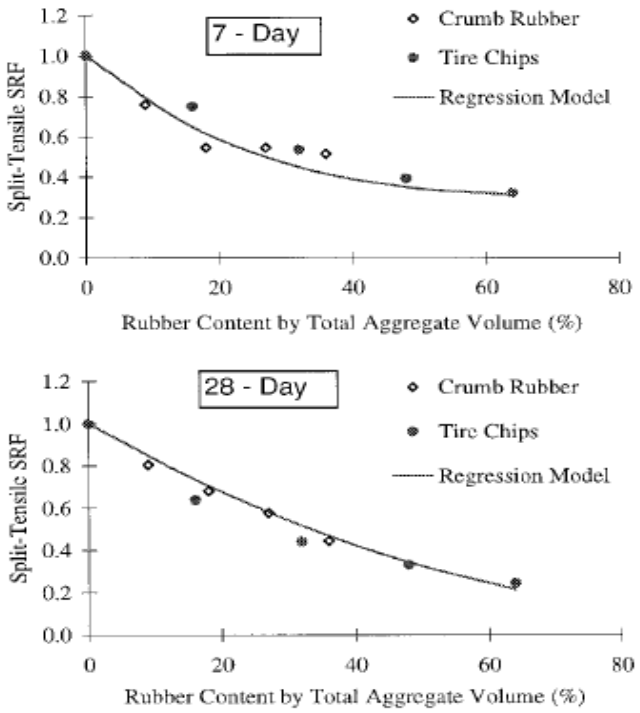
Πίνακας 2.3: Πειραματικά αποτελέσματα των φυσικών – μηχανικών ιδιοτήτων της σύνθεσης τσιμέντου – ελαστικού.

Ο Bennazouk (2002) χρησιμοποίησε CRA και ERA μίγματα προκειμένου να εξάγει συμπεράσματα όσον αφορά στη θλιπτική αντοχή σε σχέση με την περιεκτικότητα του ελαστικού. Η θλιπτική αντοχή της 28 ημέρας, για μέγεθος τεμαχιδίων του ελαστικού 1-4 mm, παρουσιάζεται στο διάγραμμα 2.16 και όλα τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 2.3. Οι τιμές της αντοχής ήταν υψηλότερες με CRA. Η θλιπτική αντοχή μειώνεται αρκετά όταν αυξάνεται το ποσοστό των ελαστικών. Αυτή η τάση επηρεάζεται ελαφρώς από το μέγεθος του ελαστικού, εντούτοις, για ένα δεδομένο ποσοστό ελαστικών λεπτότερα μεγέθη οδήγησαν σε χαμηλότερες απώλειες σε θλιπτική αντοχή από ότι τα χονδρόκοκκα τεμαχίδια.



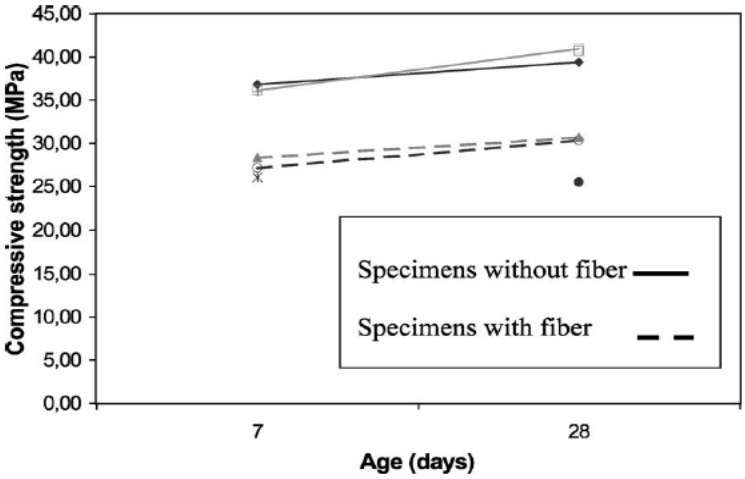

Διάγραμμα 2.16. Μεταβολή θλιπτικής αντοχής σε σχέση με το ποσοστό ελαστικού.

Το διάγραμμα 2.17 δείχνει ότι για το ίδιο ειδικό βάρος, η θλιπτική αντοχή είναι υψηλότερη με την ERA απ' ότι με CRA. Αυτή η διαφορά μειώνεται καθώς το μέγεθος των ελαστικών μορίων αυξάνεται. Με μια πρώτη ματιά, αυτό το φαινόμενο είναι σε αντίφαση με τα παρατηρηθέντα αποτελέσματα, με τα οποία το ειδικό βάρος αυξάνεται καθώς τα μεγέθη των τεμαχιδίων ελαστικού αυξάνονται.



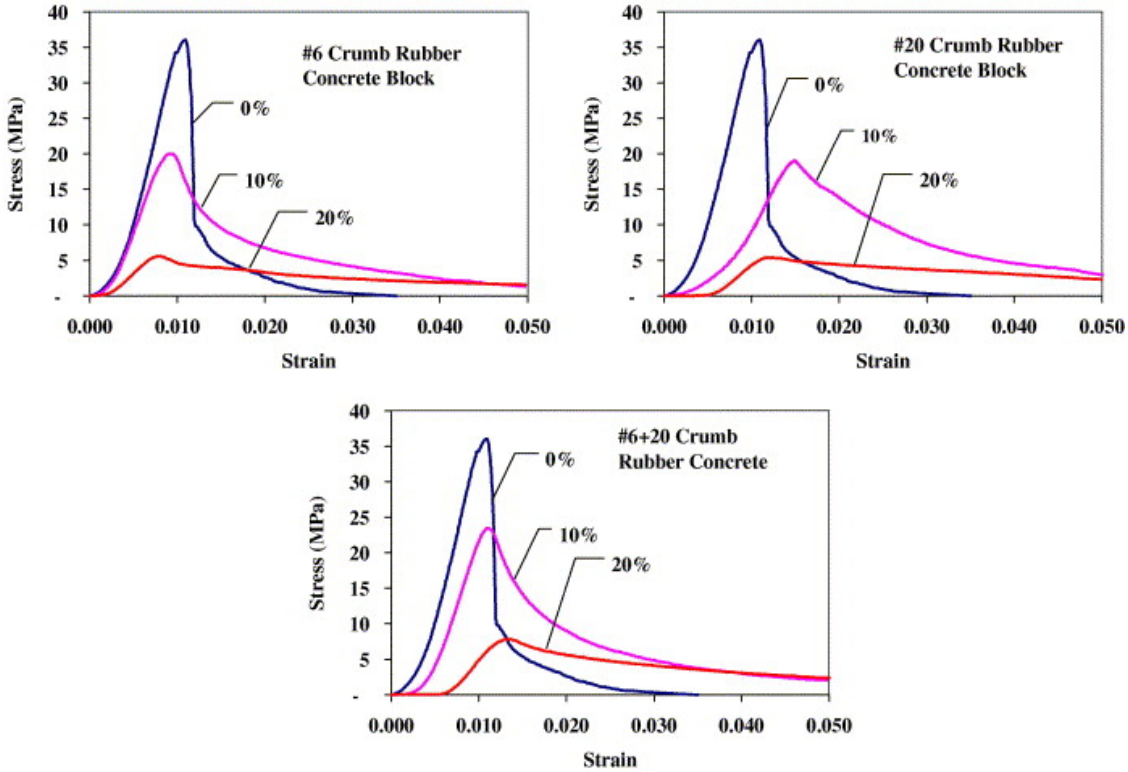

Διάγραμμα 2.17. Γραφική παράσταση της θλιπτικής αντοχής σε σχέση με το ξηρό ειδικό βάρος των μιγμάτων.

Τα αποτελέσματα των Hernandez και Olivares (2002) (βλ. διάγραμμα 2.18) έδειξαν ότι η θλιπτική αντοχή των δειγμάτων που εξετάζονται δείχνουν ότι το σκυρόδεμα από ελαστικό είχε μια χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή 23 Mpa, ενώ για το απλό σκυρόδεμα ήταν 36 Mpa. Οι μέσες τιμές αντοχών ήταν 29 και 40 Mpa, αντίστοιχα.




Διάγραμμα 2.18. Θλιπτική αντοχή για 7 και 28 ημέρες.

Οι Sukontasukkul και Chaikaew έδειξαν επίσης ότι οι θλιπτικές αντοχές του σκυροδέματος επηρεάστηκαν όχι μόνο από τη περιεκτικότητα του ελαστικού αλλά και από το μέγεθος των ελαστικών (crumb). Όσον αφορά στη μη-γραμμικότητα του σύνθετου υλικού, αυτή μεγαλώνει με την αύξηση της περιεκτικότητας ελαστικού (πίνακας 2.4 και διάγραμμα 2.19). Εντούτοις, από την άποψη της ανθεκτικότητας, το μίγμα σκυρόδεμα-ελαστικό βρέθηκε να είναι καλύτερο από το κανονικό σκυρόδεμα όπως φαίνεται από τη μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα (πίνακας 2.4).




Διάγραμμα 2.19. Θλιπτική αντοχή - παραμόρφωση μιγμάτων με ελαστικά crumb

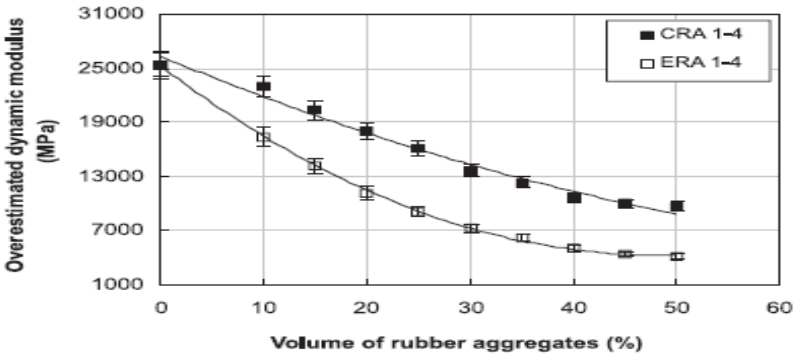
| Μίγμα | Αντοχή (Mpa) | Ενεργειακή πυκνότητα (Mpa) |
|---|---|---|
| Ελέγχου | 36.00 | 0,25 |
| | | |
| 610 | 19.96 | 0,32 |
| 620 | 5.58 | 0,19 |
| | | |
| 2010 | 19.08 | 0,35 |
| 2020 | 5.40 | 0,21 |
| | | |
| 62010 | 23.44 | 0,39 |
| 62020 | 7.85 | 0,24 |

Πίνακας 2.4. Θλιπτική αντοχή και ενεργειακή πυκνότητα

Παρατηρήθηκε ότι με την αλλαγή των αδρανών υλικών του κανονικού σκυροδέματος με ελαστικά, η αντοχή του σκυροδέματος μειώθηκε σημαντικά, ενώ η ανθεκτικότητα αυξήθηκε. Συγκρίνοντας τα μίγματα τριών ελαστικών crumb, το μίγμα που γίνεται από το ελαστικό του μικτού μεγέθους crumb (No. 6 + 20) φάνηκε να συμπεριφέρεται καλύτερα από εκείνα που έγιναν από έναν ενιαίο τύπο crumb. Αυτό οφειλόταν ίσως στην καλύτερη συμπίεση και την υψηλότερη πυκνότητα που πρόσφερε ο συνδυασμός των ελαστικών crumb.

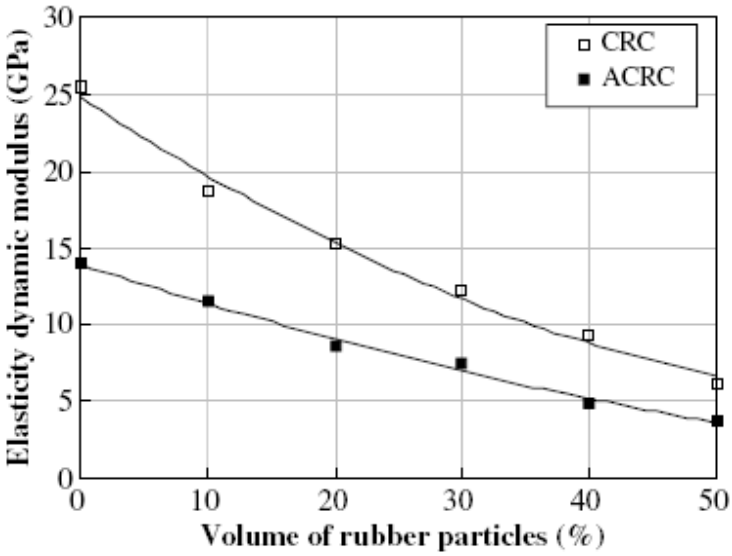
## 2.2.2 Μέτρο ελαστικότητας

Οι αλλαγές στο μέτρο ελαστικότητας για τα διαφορετικά μεγέθη των κόκκων ελαστικού ελαστικών παρουσιάζονται στο διάγραμμα 2.20. Οι τιμές μειώνονται από περίπου 20.000 έως 10.000 MPa και σε 4000 MPa για τον τύπο CRA και ERA, αντίστοιχα, για δείγμα που περιέχει ελαστικό 50% έναντι του κανονικού. Πρέπει να σημειωθεί ότι ο συντελεστής ελαστικότητας του CRA είναι πέντε φορές μεγαλύτερος από αυτός του ERA.




Διάγραμμα 2.20. Μεταβολή στο μέτρο ελαστικότητας για τα διαφορετικά ποσοστά ελαστικού

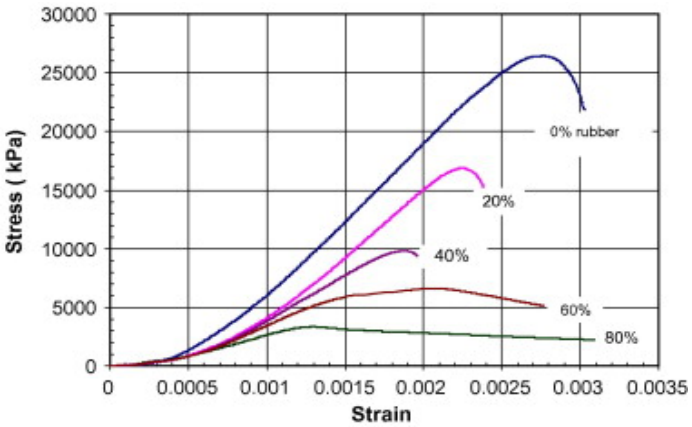
Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη μελέτη των Bennazouk et al. (2006) του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας των δειγμάτων ACRC και CRC συναρτήσει της περιεκτικότητας σε ελαστικά μόρια δίνονται στο διάγραμμα 2.21. Οι καμπύλες δείχνουν ότι για ένα ποσοστό 50% ελαστικού το μέτρο ελαστικότητας μειώνεται περίπου 6,2 και 3,7 Gpa. Οι τιμές αυτές αντιστοιχούν σε μείωση περίπου 40%.




Διάγραμμα 2.21. Μεταβολή του δυναμικού συντελεστή ελαστικότητας με το ποσοστό του ελαστικού.

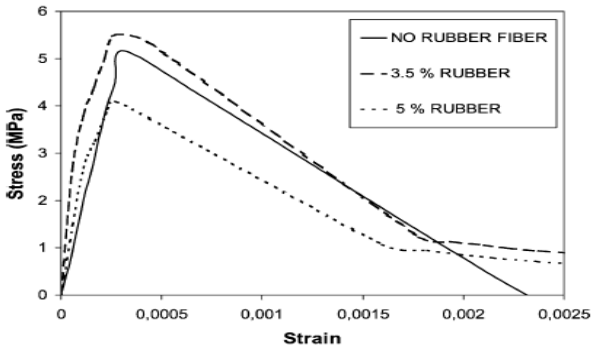
## 2.2.3 Διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων

Στην έρευνα των Batayneh et al. παρουσιάζεται η σχέση μεταξύ τάσης και παραμόρφωσης (stress-strain) για διαφορετικό ποσοστό ελαστικού. Οι καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης (σ-ε) των δειγμάτων που περιέχουν ελαστικό μέχρι 40% συμπεριφέρονται με παρόμοια τάση στο αρχικό δείγμα, αλλά έχοντας μια μικρότερη κορύφωση. Από τα αποτελέσματα, μπορεί να παρατηρηθεί ότι υπάρχει γραμμική αύξηση των πιέσεων έως ότου φθάσει στην αιχμή προτού απελευθερωθεί η ενέργεια από το σπάσιμο του μίγματος. Για αυτήν την περίπτωση, τα δείγματα συμπεριφέρθηκαν όπως ένα ψαθυρό υλικό του οποίου η συνολική ενέργεια που παράγεται κατά την αστοχία είναι ελαστική ενέργεια. Εντούτοις, η μη-γραμμική συμπεριφορά φαίνεται για τα άλλα δύο δείγματα που περιέχουν ελαστικό 60% και 80%. Εδώ, μόλις επιτευχθεί η μέγιστη τάση, το δείγμα συνεχίζει να παράγει. Αυτή η συμπεριφορά είναι παρόμοια με τη συμπεριφορά των σκληρών υλικών που έχουν την μεγαλύτερη μέρος της ενέργειάς της να παράγεται κατά την αστοχία ως πλαστική ενέργεια. Η πλαστική ενέργεια ορίζεται ως το ποσό ενέργειας που απαιτείται για να παραγάγει μια συγκεκριμένη παραμόρφωση μετά από το ελαστικό, η οποία αύξησε τη δυνατότητα του υλικού ακόμα και μετά από το σχηματισμό των ρωγμών. Επομένως, μπορεί να δηλωθεί ότι το σκυρόδεμα με ένα υψηλότερο ποσοστό του κομματιών ελαστικού κατέχει υψηλή ανθεκτικότητα, δεδομένου ότι η ενέργεια είναι κυρίως πλαστική.



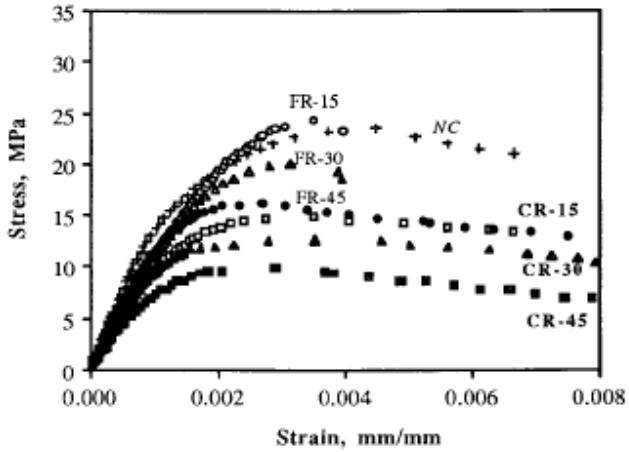

Διάγραμμα 2.22. Σχέση μεταξύ stress και strain για διαφορετικές περιεκτικότητες ελαστικού.

Οι Hernandez και Olivares (2002) παρουσίασαν μια γραφική παράσταση stress-strain με διαφορετική περιεκτικότητα ελαστικού στα μίγματα, (χωρίς ελαστικό, και με 3% ή 5% ελαστικό).




Διάγραμμα 2.23. Μεταβολή τάσης-παραμόρφωσης με διαφορετικό ποσοστό ελαστικού

Ο Topcu (1995) πραγματοποίησε διαγράμματα τάσης–παραμόρφωσης (σ-ε) των επενδυμένων σκυροδεμάτων με ελαστικό. Αν και τα διαγράμματα σ–ε των 7, η 28 ημερών και τα έξι μηνών κανονικών και επενδυμένων με καουτσούκ σκυροδεμάτων εξετάστηκαν σε αυτήν την μελέτη, λόγω της ομοιότητάς τους μόνο εκείνα των σκυροδεμάτων 28 ημερών δίνονται στο διάγραμμα 2.34 για παράδειγμα. Όταν τα διαγράμματα σ–ε αυτών των σκυροδεμάτων αναλύονται, μπορεί να φανεί ότι το σκυρόδεμα ελέγχου φθάνει στην τελευταία πίεση περίπου 0.002. Το σκυρόδεμα που έχει το ελαστικό χονδροειδές μίγμα 15% παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά ως κανονικό σκυρόδεμα. Με το μίγμα ελαστικών χονδροειδών μορίων τα μέγιστα σημεία πίεσης πέφτουν ενώ η πίεση αυξάνεται στο σημείο αποτυχίας στην επενδυμένη με καουτσούκ τιμών σκυροδέματος ε-πίεσης αλλάζουν μεταξύ 0.003 και 0.005 ενάντια στις μέγιστες πιέσεις.




Διάγραμμα 2.24. Καμπύλες σ-ε μιγμάτων κατά την 28η ημέρα

## 2.2.4 Καμπτική αντοχή

Τα αποτελέσματα της έρευνας των Khatib και Bayomy για την καμπτική αντοχή των μιγμάτων σκυροδέματος παρουσιάζονται στο διάγραμμα 2.25, το οποίο μας δείχνει ότι η καμπτική αντοχή μειώθηκε με την αύξηση του περιεχομένου σε

ελαστικό με έναν τρόπο παρόμοιο με αυτόν που παρατηρήθηκε στη θλιπτική αντοχή. Παρατηρήθηκε ότι το αρχικό ποσοστό μείωσης της αντοχής ήταν πιο μεγάλο από αυτό της θλιπτικής αντοχής.

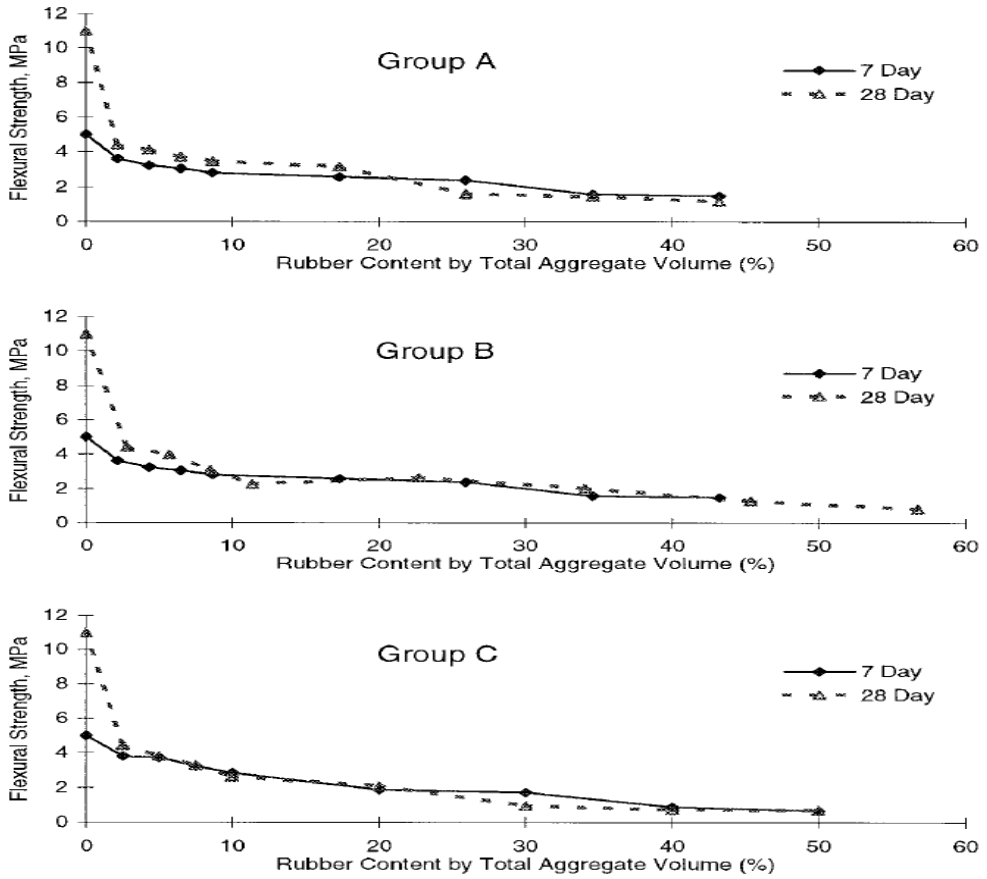
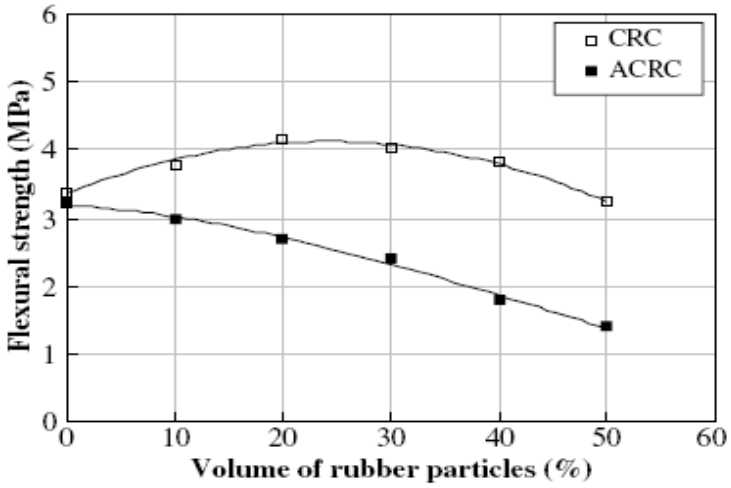



**FIG. 5. Effect of Rubber Content on Flexural Strength of PCC Mixtures**

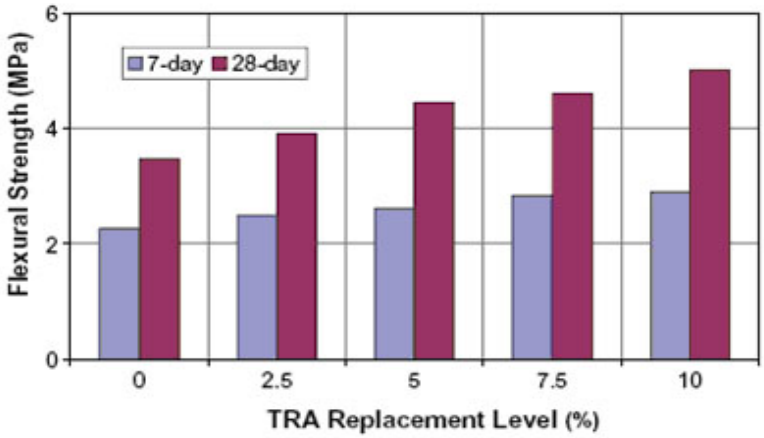
Διάγραμμα 2.25. Μεταβολή της καμπτικής αντοχής σε σχέση με την περιεκτικότητα ελαστικού

Η έρευνα του Bennazouk (2006) για την καμπτική αντοχή σε σχέση με την περιεκτικότητα του ελαστικού παρουσιάζεται στο διάγραμμα 2.26. Παρατηρείται μια μείωση της καμπτικής αντοχής του δείγματος ACRC. Η τιμή μειώνεται από 3,3 έως 1,4 Mpa. Αυτό μας δείχνει ότι η πορώδης δομή του δείγματος υπερισχύει της επίδρασης του μέτρου ελαστικότητας, λόγω της επίδρασης του αέρα. Τα αποτελέσματα επίσης έδειξαν ότι για μια δεδομένη αναλογία όγκου ελαστικού, η μείωση στην καμπτική αντοχή του δείγματος ACRC είναι χαμηλότερη από αυτή στη θλιπτική αντοχή, πιθανώς εξαιτίας των ινών πολυπροπυλενίου. Για το δείγμα CRC, οι καμπύλες αποκαλύπτουν μέγιστα σε μια αναλογία όγκου μεταξύ 20% και 30% του ελαστικού περιεχομένου, ως αποτέλεσμα τόσο του μέτρο ελαστικότητας όσο και του μη-εύθραυστου χαρακτηριστικού κάτω από τη φόρτωση του ελαστικού.




Διάγραμμα 2.26. Μεταβολή της καμπτικής αντοχής με την περιεκτικότητα του όγκου ελαστικού.

Ο Al-akhras με TRA (Tire rubber ash) παρουσίασε το διάγραμμα 2.27 που δείχνει την επίδραση της αντικατάστασης του TRA στην καμπτική αντοχή των μίγματων σε 7 και 28 ημέρες. Για το μίγμα που περιέχει 10% TRA η καμπτική αντοχή αυξήθηκε από 3,48 Mpa(7 ημέρες) σε 5 Mpa για το κονίαμα που περιέχει 10% TRA σε 28 ημέρες. Η ποσοστιαία αύξηση στην καμπτική αντοχή σε 7 ημέρες ήταν 10%, 15%, 25%, και 28% σε περιεχόμενο TRA 2,5%, 5%, 7,5%, και 10%, αντίστοιχα, συγκρινόμενο με το κονίαμα ελέγχου. Οι αντίστοιχες αυξήσεις σε 28 ημέρες ήταν 12%, 27%, 32%, και 43% σε περιεχόμενο TRA 2,5%, 5%, 7,5%, και 10%, αντίστοιχα, έναντι του μίγματος ελέγχου. Η αύξηση σε αντοχή κονιάματος (θλιπτική και καμπτική) με το περιεχόμενο TRA μπορεί να αποδοθεί στη φυσική επίδραση όπου το TRA συμπεριφέρεται ως υλικό πληρώσεως στα μίγματα κονιάματος.



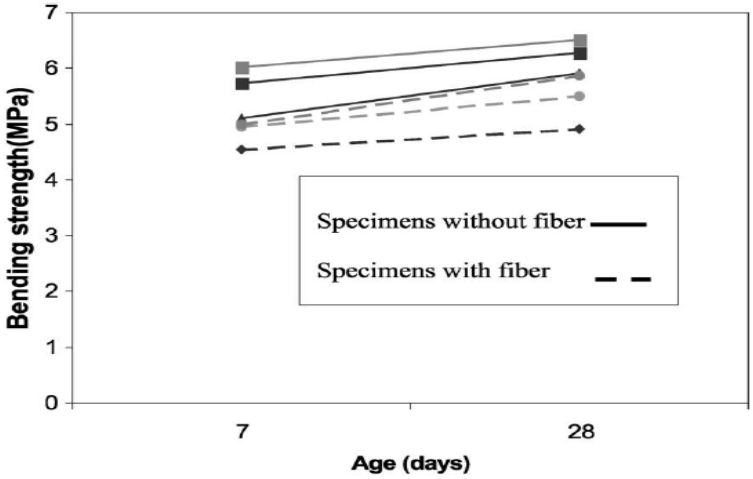

Διάγραμμα 2.27. Επίδραση του επιπέδου αντικατάστασης TRA στην αντοχή κάμψης του κονιάματος σε 7 και 28 ημέρες

Ο Bennazouk (2002) παρουσίασε τις τιμές της καμπτικής αντοχής που αναφέρονται παραπάνω στον πίνακα 2.5. Για CRAC και ERAC με διαφορετικά ποσοστά ελαστικού, τα αποτελέσματα δείχνουν μέγιστες τιμές στις αναλογίες όγκου για 20%. Από τη περιεκτικότητα ελαστικού σε 35% και πάνω, η αντοχή κάμψης μειώνεται σημαντικά εξαιτίας της ρήξης της σύνδεσης μητρών ελαστικού–τσιμέντου. Αυτή η μείωση είναι μεγαλύτερη καθώς το μέγεθος των ελαστικών αυξάνεται.

| Size of rubber aggregates (mm) | Losses of the flexural strength (%) | |
|---|---|---|
| | CRAC[a] | ERAC[b] |
| 1–4 | 8.5 | 15.4 |
| 4–8 | 5.3 | 9.5 |
| 8–12 | 1.2 | 3.4 |

Πίνακας 2.5: Μείωση της σύνθετης δυναμικής κάμψης σε σχέση με το ποσοστό ελαστικού.

Τα αποτελέσματα των Hernandez και Olivares (2002) έδειξαν ότι το σκυρόδεμα γεμισμένο με ίνα ελαστικού είχε μια χαρακτηριστική αντοχή 4 Mpa σε 28 ημέρες, ενώ στο απλό σκυρόδεμα ήταν 5,4 Mpa. Οι μέσες τιμές ήταν 5,2 και 6,1 Mpa, αντίστοιχα, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 2.28



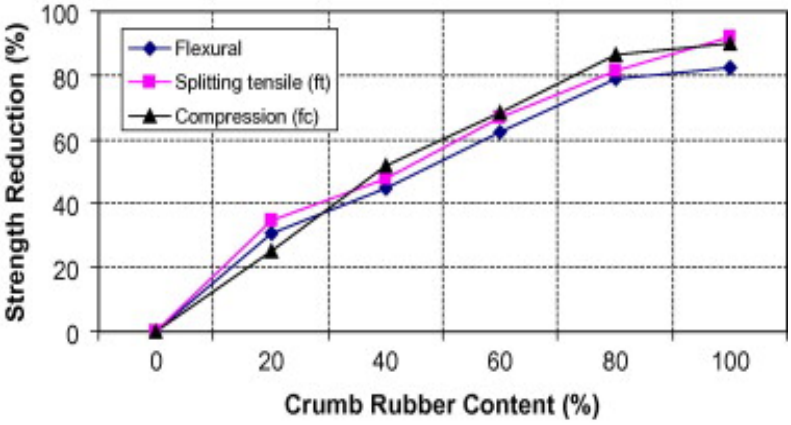

Διάγραμμα 2.28 Αντοχή κάμψης σε 7 και 28 ημέρες.

Στη μελέτη των Batayneh et al. γίνεται μία συνδυαστική αναφορά της επίδρασης του ελαστικού στην αντοχή. Η επίδραση του ελαστικού κομματιού στη αντοχή του σκυροδέματος δίνεται στον πίνακα 2.6, και καταδεικνύεται στο διάγραμμα 2.29 και το διάγραμμα 2.30. Οι σχέσεις μεταξύ της περιεκτικότητας του ελαστικού και της μείωσης των θλιπτικών, και καμπτικών δυνάμεων παρουσιάζονται στο διάγραμμα 2.29. Μπορεί να φανεί ότι η χρήση του ελαστικού μείωσε όλες τις μηχανικές δυνάμεις. Όπως αναμένεται, όσο υψηλότερο το περιεχόμενο ελαστικού στο μίγμα, τόσο υψηλότερη η μείωση θλιπτικής και εφελκυστικής αντοχής ($f_c$) και ($f_t$). Η κλίση είναι μικρότερη όταν το ελαστικό περιεχόμενο είναι επάνω από 40%.Οταν το ποσοστό κυμαίνεται μεταξύ 40% και 100% συνεχίζει να

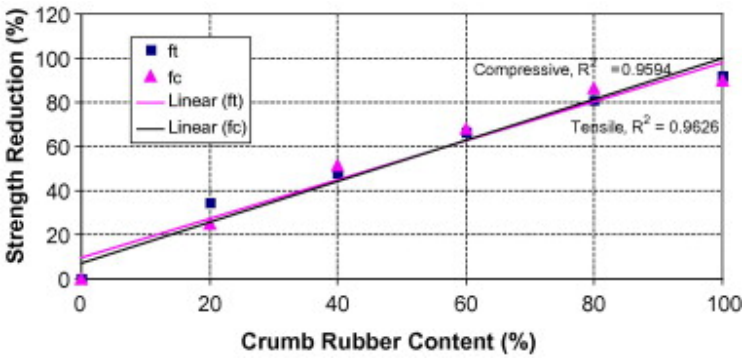
μειώνει την αντοχή σε μια μέγιστη απώλεια αντοχής μέχρι 90%, Επομένως, αυτό το αποτέλεσμα περιορίζει τη χρήση του τροποποιημένου σκυροδέματος όταν η αντοχή είναι η πρωταρχική απαίτηση. Η σχέση μεταξύ των θλιπτικών και των ελαστικών δυνάμεων φαίνονται στο διάγραμμα 2.30 και τα πειραματικά και θεωρητικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 2.6. Μπορεί να φανεί από τον αριθμό ότι υπάρχει ένας γραμμικός συσχετισμός των δύο δυνάμεων και με τις δύο αντοχές να παρουσιάζουν το ίδιο γραμμικό ποσοστό απώλειας αντοχής με αύξηση της περιεκτικότητας του ελαστικού.

| Περιεκτικότητα ελαστικού (%) | Καμπτική αντοχή (MPa) | Εφελκυστική αντοχή, $f_t$ (MPa) | Θλιπτική αντοχή, $f_c$ (MPa) | Λόγος $f_t/f_c$ (exper.) | $f_t = 0.3(f_c)^{2/3}$ (MPa) | $f_t/f_c$ (theor.) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 3.68 | 2.820 | 25.330 | 0.111 | 2.587 | 0.102 |
| 20 | 2.550 | 1.840 | 18.960 | 0.097 | 2.133 | 0.113 |
| 40 | 2.040 | 1.470 | 12.270 | 0.120 | 1.596 | 0.130 |
| 60 | 1.380 | 0.940 | 8.070 | 0.116 | 1.207 | 0.150 |
| 80 | 0.770 | 0.533 | 4.470 | 0.119 | 0.814 | 0.182 |
| 100 | 0.640 | 0.220 | 2.500 | 0.088 | 0.553 | 0.221 |

Πίνακας 2.6 Επίδραση της περιεκτικότητας ελαστικού στις διάφορες αντοχές.




Διάγραμμα 2.29. Σύγκριση μεταξύ της μείωσης της αντοχής και της περιεκτικότητας του ελαστικού.




Διάγραμμα 2.30. Επίδραση του περιεχομένου ελαστικού στις θλιπτικές αντοχές.

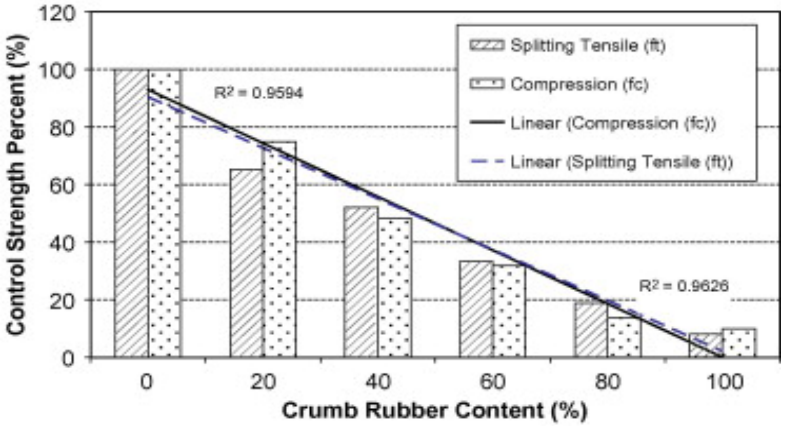
Ο πίνακας 2.7 δείχνει την απαραίτητη θλιπτική αντοχή για τις διαφορετικές κατηγορίες εφαρμογής του ελαφριού δομικού σκυροδέματος (LWC) όπως διευκρινίζεται από τον Neville (1995), το οποίο έχει υιοθετηθεί στους κώδικες κτισίματος στην Ιορδανία. Λόγω της χαμηλής πυκνότητας του ελαστικού, το σκυρόδεμα με κομμάτια από ελαστικό μπορεί να ταξινομηθεί ως ελαφρύ σκυρόδεμα. Αυτό μπορεί επίσης να υποστηριχθεί από τα συμπεράσματα που αναφέρονται από τον Pierce και Blackwell (2003). Η ελάχιστη αντοχή που απαιτείται για το δομικό ελαφροσκυρόδεμα είναι 17 Mpa, όπως φαίνεται στον πίνακα 2.7. Όταν το ποσοστό ελαστικού που χρησιμοποιείται στο μίγμα είναι 20%, επιτυγχάνεται μια μέση αντοχή 18,97 Mpa. Επομένως, το τροποποιημένο σκυρόδεμα που περιέχει κομμάτι ελαστικού μέχρι 20% μπορεί να χρησιμοποιηθεί στα ελαφριά δομικά στοιχεία. Η δεύτερη κατηγορία που δίνεται στον πίνακα 2.8, που απαιτεί Θλιπτική αντοχή 7-17 Mpa για το μέτριο σκυρόδεμα, μπορεί να επιτευχθεί επίσης με μια αντικατάσταση 40-60% των λεπτών ελαστικών αδρανών του μίγματος.

| Κατηγορίες | πυκνότητα ($kg/m^3$) | θλιπτική αντοχή (Mpa) |
|---|---|---|
| Δομικό ελαφρόσκυρόδεμα | 1350-1900 | 17 |
| Μέτριο σκυρόδεμα δύναμης | 1900-800 | 7-17 |
| Σκυρόδεμα χαμηλής πυκνότητας | 300-800 | χρησιμοποιείται για μη-δομικούς λόγους (επιτροπή μόνωσης, πεζοδρόμια, φραγμοί, κ.λπ.) |

Πίνακας 2.7. Κατηγορίες ελαφροσκυροδέματος (Neville, 1995)

Το διάγραμμα 2.31 παρουσιάζει την επίδραση των διαφορετικών ποσοστών της περιεκτικότητας του ελαστικού στις θλιπτικές και στις ελαστικές αντοχές όταν συγκρίνονται με το αρχικό. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η θλιπτική αντοχή για τη διαφορετική περιεκτικότητα ελαστικού ποικίλει από 10% μέχρι 75% του δείγματος ελέγχου, ενώ η ελαστική αντοχή ποικίλει από 65% μέχρι 8% του δείγματος ελέγχου, όπως φαίνεται στον πίνακα 2.8. Είναι αξιοσημείωτο ότι το ποσοστό μείωσης της αντοχής με το αυξανόμενο ποσοστό ελαστικού ήταν

σχεδόν το ίδιο στη θλιπτική αντοχή όπως είναι στην ελαστική αντοχή. Αυτό είναι εμφανές στο ιστόγραμμα του διαγράμματος 2.31 (Papakonstantinou και Tobolski, 2006).

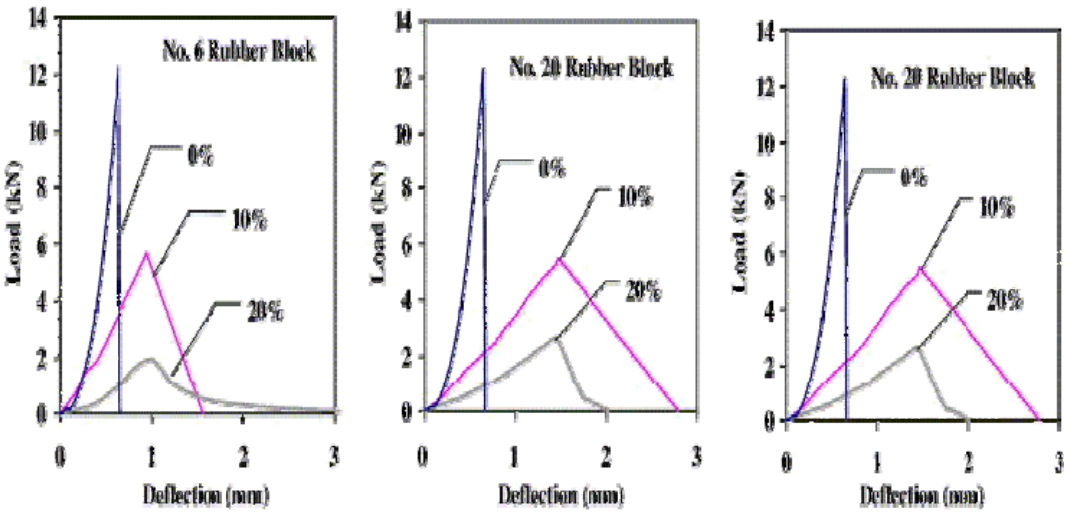



Διάγραμμα 2.31. Μεταβολή των αντοχών σε σχέση με την αντοχή ελέγχου.

| Περιεκτικότητα ελαστικού (%) | Ελαστική αντοχή διαχωρισμού (FT) (Mpa) | $f_t$ διατηρημένης αντοχής σχετικά με τον έλεγχο (%) | Θλιπτική αντοχή ($f_c$) (Mpa) | $f_c$ (%) διατηρημένη αντοχή σχετικά με τον έλεγχο |
|---|---|---|---|---|
| 0 | 2.820 | 100 | 25.330 | 100 |
| 20 | 1.840 | 65.25 | 18.960 | 74.89 |
| 40 | 1.470 | 52.13 | 12.270 | 48.44 |
| 60 | 0,940 | 33.33 | 8.070 | 31.86 |
| 80 | 0,533 | 18.79 | 4.470 | 13.70 |
| 100 | 0,220 | 8.16 | 2.500 | 9.99 |

Πίνακας 2.8. Ποσοστό διακυμάνσεως των δυνάμεων σχετικά με το δείγμα ελέγχου.

Οι Sukontasukkul and Chaikaew παρουσιάζουν στο διάγραμμα 2.32 τη μεταβολή της καμπτικής αντοχής με το ποσοστό του ελαστικού στο σκυρόδεμα. Όπως και στην περίπτωση της θλιπτικής αντοχής η καμπτική αντοχή μικραίνει όσο το ποσοστό των ελαστικών crumb αυξάνεται. Εντούτοις, τα αποτελέσματα δείχνουν μεγαλύτερη ευελιξία και ανθεκτικότητα με τις μεγαλύτερες εκτροπές στο μέγιστο φορτίο, τις πιο μακροχρόνιες μετα-μέγιστες απαντήσεις και την υψηλότερη ενέργεια σπασίματος.



Διάγραμμα 2.32. Καμπύλες φορτίου-μετατοπίσεων για μίγματα rubber concrete

## 2.3. Άλλες ιδιότητες

### 2.3.1. Τήξη και πήξη

Ο Savas (1996) διεξήγαγε έρευνες για να μελετήσει την αντοχή στη γρήγορη πήξη και τήξη (ASTM C 666, διαδικασία A) του ελαστικού σκυροδέματος. Τα διάφορα μίγματα έγιναν με την ενσωμάτωση 10%, 15%, 20% και 30% ελαστικού από το βάρος του τσιμέντου που χρησιμοποιήθηκε για το μίγμα ελέγχου. Με βάση τις μελέτες τους, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι: (ι)τα rubcrete μίγματα με 10% και 15% ελαστικού (μεγέθους 2-6mm.) παρουσίασαν αντοχή υψηλότερή από 60% μετά από 300 κύκλους πήξης και τήξης, αλλά τα μίγματα με περιεκτικότητα 20% και 30% ελαστικό δεν θα μπορούσαν να ανταποκριθούν στα πρότυπα ASTM (ii) η εισαγωγή αέρα δεν παρείχε τις βελτιώσεις στη διάρκεια πήξης και τήξης για τα συγκεκριμένα μίγματα με 10%, 20% και 30% ελαστικό.

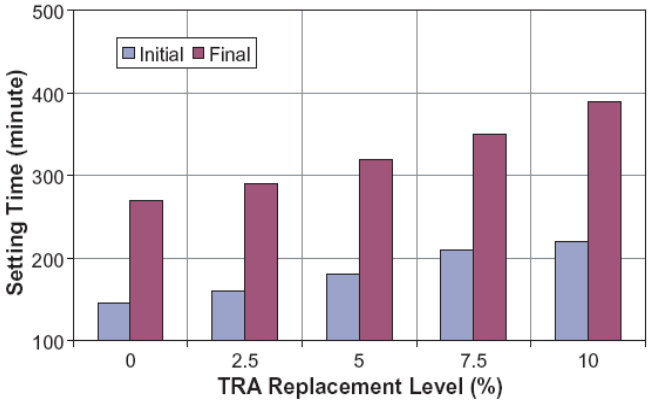
Οι Benazzouk και Queneudec (2002) μελέτησαν τη πήξη-τήξη (freeze-thaw) των μιγμάτων τσιμέντο-ελαστικό μέσω της χρήσης δύο τύπων ελαστικών αδρανών. Οι τύποι των αδρανών ήταν: (CRA) και (ERA). Τα αποτελέσματα παρουσίασαν βελτιώσεις στο μίγμα που περιέχει ελαστικό με περιεκτικότητα 30% και 40%. Η βελτίωση στην αντοχή του μίγματος που περιέχει αδρανή τύπου ERA είναι καλύτερη από το σύνθετο που γίνεται με αδρανή CRA. Ο Paine (2002) ερεύνησε τη χρήση του ελαστικού crumb για την πήξη και τήξη (freeze-thaw) του σκυροδέματος. Χρησιμοποιήθηκαν τρία μεγέθη ελαστικού crumb, 0.5-1.5, 2-8 και 5-25mm. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι υπάρχει δυνατότητα χρησιμοποίησης του ελαστικού crumb ως freeze-thaw παράγοντας αντίστασης στο σκυρόδεμα. Το ελαστικό σκυρόδεμα crumb λειτούργησε σημαντικά καλύτερα υπό τους freeze-thaw όρους του κανονικού σκυροδέματος.
Ο Al-akhras με μίγματα με TRA (Tire rubber ash) παρουσίασε το διάγραμμα 2.35 το οποίο μας δείχνει την επίδραση της προσθήκης TRA στον αρχικό και τελικό

χρόνο πήξης περιεκτικότητας 0%, 2,5%, 5%, 7,5%, και 10% TRA. Τόσο ο αρχικός και όσο και ο τελικός χρόνος αυξήθηκε με την αύξηση του περιεχομένου TRA. Για το αρχικό μίγμα, ο αρχικός χρόνος αυξήθηκε από 145 min σε 220 min,για περιεχόμενο 10% TRA. Ο τελικό χρόνος πήξης αυξήθηκε από 270 min σε 390 min,για το μίγμα που περιέχει 10% TRA. Το ποσοστό αύξησης στον αρχικό χρόνο πήξης του μίγματος ήταν 10%, 24%, 45%, και 51% σε περιεκτικότητα 2,5%, 5%, 7,5%, και 10% TRA, αντίστοιχα. Το ποσοστό στον τελικό χρόνο πήξης ήταν 7%, 19%, 30%, και 44% σε περιεκτικότητα 2,5%, 5%, 7,5%, και 10% TRA, αντίστοιχα. Η αύξηση στον αρχικό και τελικό χρόνο πήξης με την αυξανόμενη προσθήκη TRA μπορεί να αποδοθεί στην παρουσία ψευδάργυρου (20,2%) στη χημική σύνθεση του TRA (Πίνακας 2.9). Ο ψευδάργυρος έχει μια επιβραδυντική επίδραση στον χρόνο πήξης του μίγματος (Nivelle, 1995). Η παρουσία ψευδάργυρου αναμένεται να αυξήσει το πλαστικό ράγισμα συρρίκνωσης του κονιάματος και του σκυροδέματος επειδή η διάρκεια του πλαστικού σταδίου παρατείνεται.

Chemical analysis of TRA and Type I cement used in the study

| Component (%) | TRA | Type I cement |
|---|---|---|
| $SiO_2$ | 26.5 | 21.2 |
| $Al_2O_3$ | 8.7 | 5.5 |
| $Fe_2O_3$ | 9.3 | 3.1 |
| CaO | 12.9 | 63.7 |
| MgO | 6.4 | 1.5 |
| $SO_3$ | 1.6 | 2.63 |
| $Na_2O$ | 1.4 | 0.18 |
| $K_2O$ | 1.1 | 0.71 |
| $TiO_2$ | 1.0 | – |
| $Cl^-$ | 0.1 | – |
| Zn | 20.2 | – |
| Loss on ignition | 10.6 | 0.96 |

Πίνακας 2.9 Χημική Ανάλυση TRA




Διάγραμμα 2.33. Επίδραση αντικατάστασης TRA αρχικό και τελικό χρόνο πήξης του μίγματος

Οι αντοχές του κονιάματος στους επιταχυνόμενους κύκλους της ζημίας πήξης και τήξης μελετήθηκαν χρησιμοποιώντας κονίαμα που περιέχει ποσοστό 5% και 10% του TRA. Για να επιταχύνουν τη ζημία πήξης και τήξης, τα δείγματα κονιάματος υποβλήθηκαν στη πήξη και την τήξη κυκλικά μετά από 7 ημέρες.

## 2.3.3 Αντοχή πρόσκρουσης

Ο Fattuhi (1996) μελέτησε την αντοχή πρόσκρουσης σε συγκεκριμένα μίγματα πραγματοποιώντας την παρακάτω διαδικασία: Δυο πλάκες δημιουργήθηκαν και εξετάστηκαν ταυτόχρονα. Μια πλάκα έγινε με το κανονικό σκυρόδεμα (χωρίς ελαστικό), ενώ η άλλη περιείχε περίπου περιεκτικότητα 11% ελαστικού (με αναλογία ελαστικού - τσιμέντου περίπου 0.44). Το αρχικό ύψος της πτώσης για το σφυρί τέθηκε σε 1,0m. Εντούτοις, μετά από μια πτώση, οι πλάκες υπέστησαν πολύ λεπτές ρωγμές μόνο. Το ύψος αυξήθηκε έπειτα σε 2,0m, και το σφυρί έπεσε δύο φορές. Η εξέταση των πλακών έδειξε ότι και οι δύο υπέστησαν ράγισμα προς όλες τις κατευθύνσεις. Εντούτοις, η πλάκα που περιέχει το ελαστικό είχε μια μεγαλύτερη διάδοση των ρωγμών στο σημείο πρόσκρουσης. Μετά από τη δεύτερη πτώση, το μέγιστο πλάτος της ρωγμής στη πλάκα με το κανονικό σκυρόδεμα (χωρίς λάστιχο) ήταν 0,16 mm, ενώ η ρωγμή στη πλάκα που περιέχει το ελαστικό ήταν 0,50 mm. Μετά από την τρίτη πτώση, τα μέγιστα πλάτη ρωγμών (στις ίδιες θέσεις) στις πλάκες αυξήθηκαν σε 0,3 και 2,0 mm για τα απλά σκυροδέματα και τα σκυροδέματα με ελαστικό, αντίστοιχα. Τα ανωτέρω αποτελέσματα έδειξαν ότι και οι δύο πλάκες άντεξαν την πτώση του σφυριού, παρά τη χαμηλότερη θλιπτική αντοχή της πλάκας με rubbercrete (περίπου 30% της αντοχής του κανονικού σκυροδέματος).

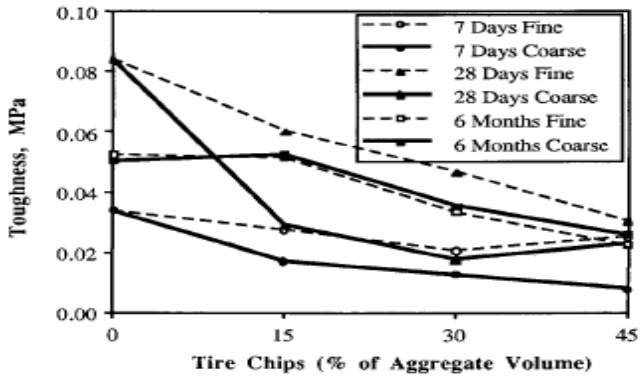
## 2.3.4. Ρηγμάτωση

Οι Siddique και Naik εξέτασαν τη ρηγμάτωση του σκυροδέματος rubber concrete. Τα αποτελέσματα που αναφέρονται από τον Raghvan (1998) προτείνουν την προσθήκη των ελαστικών κομματιών (δύο διαφορετικές μορφές των ελαστικών μορίων ως συστατικά του κονιάματος): (ι) κόκκοι σε διάμετρο περίπου 2 mm και (ΙΙ) κομμάτια που έχουν δύο μεγέθη, 5,5mm x 1,2mm και 10,8mm x 1,8mm (διάμετρος x μήκος) που βοηθούν το μίγμα στη μείωση της διακένωσης σε σύγκριση με το αρχικό κονίαμα. Περαιτέρω ανέφεραν ότι τα δείγματα ελέγχου ανέπτυξαν ρωγμές που έχουν ένα μέσο πλάτος περίπου 0,9 mm., ενώ το μέσο πλάτος ρωγμών για τα δείγματα με περιεκτικότητα ελαστικού 5% ήταν περίπου 0.4-0.6 mm. Επίσης, αναφέρθηκε ότι ο χρόνος του ραγίσματος καθυστέρησε με την προσθήκη ελαστικών περιεκτικότητας 5%. Το μίγμα χωρίς ελαστικά ράγισε μέσα σε 30 min, ενώ το μίγμα με περιεκτικότητα 15% ρηγματώθηκε μετά από 1 ώρα. Επιπροσθέτως, υποδείχθηκε ότι όσο μεγαλύτερο το περιεχόμενο των ελαστικών , τόσο μικρότερο το μήκος και το πλάτος ρωγμών, και ο χρόνος ρηγμάτωσης ήταν μεγαλύτερος.

## 2.3.5 Ανθεκτικότητα

Ο Topcu (1995) παρουσίασε τις αλλαγές στις τιμές ανθεκτικότητας με την προσθήκη του ελαστικού οι οποίες καθορίστηκαν με τη μέτρηση των περιοχών κάτω από τα διαγράμματα σ-ε (διάγραμμα 2.34). Εδώ, αν και παρατηρούνται μειώσεις στην ανθεκτικότητα με τις προσθήκες του ελαστικού, παρατηρούνται

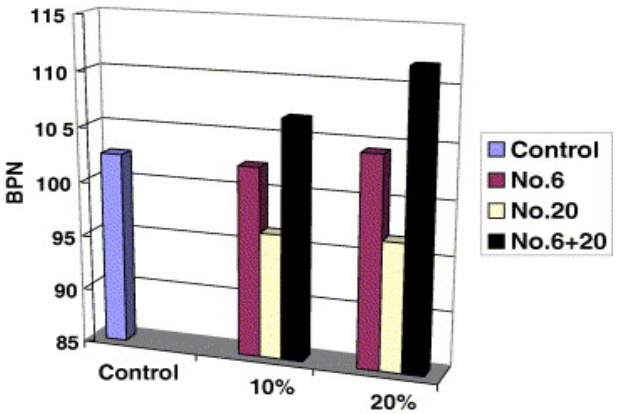
μερικές αλλαγές στις ενεργειακές ικανότητες κατά τη διάρκεια του σπασίματος. Δεδομένου ότι τα σκυροδέματα με τη προσθήκη ελαστικού απορροφούν περισσότερη ενέργεια, μπορούν να παρουσιάσουν περισσότερη πίεση κατά την διάρκεια του σπασίματος. Η εξέταση των τιμών $\varepsilon_{max}$ που λαμβάνονται από τα διαγράμματα σ-ε δείχνει ότι αυτές οι τιμές μπορούν να φθάσουν σε 0.007 και 0.008.




Διάγραμμα 2.34. Αλλαγές στις τιμές ανθεκτικότητας με την προσθήκη του ελαστικού

## 2.3.6. Αντίσταση ολισθήσεως

Η αντίσταση ολισθήσεως υπολογίζεται σύμφωνα με τις οδηγίες ASTM E303-93 χρησιμοποιώντας τις συσκευές τύπου εκκρεμούς. Τα αποτελέσματα (διάγραμμα 2.35) έδειξαν ότι τα κομμάτια τσιμέντου με ελαστικά crumb εξέθεσαν καλύτερη αντίσταση ολισθήσεως από αυτό του ελέγχου (εκτός από τα τεμάχια που γίνονται με το crumb ελαστικό για κόσκινο αριθ. 20). Οι ιδιαίτερα υψηλές ελαστικές ιδιότητες του ελαστικού επέτρεψαν σε επιφάνειακά τμηματα να παραμορφωθούν περισσότερο και να δημιουργήσουν περισσότερη τριβή καθώς το εκκρεμές πέρασε πέρα από αυτήν. Τα μίγματα με μεγάλο μέρος ελαστικού εκτέλεσαν καλύτερα από τα μίγματα που περιέχουν τα μικρά μέρη.



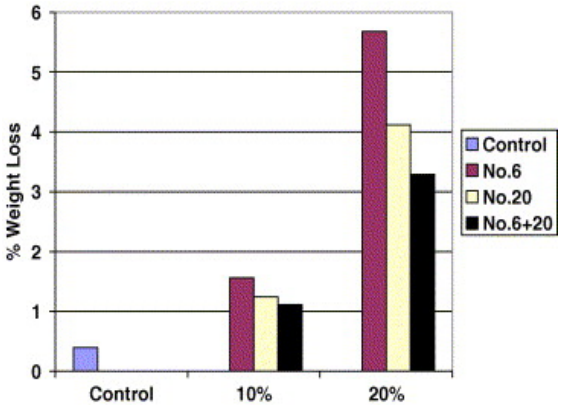

Διάγραμμα 2.35. Αντίσταση ολισθήσεων του τσιμέντου με λάστιχο crumb.

## 2.3.7. Αντίσταση τριβής

Η δοκιμή αντίστασης τριβής πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τη μέθοδο ASTM C944-95, με τη συγκέντρωση που παρουσιάστηκε στη φωτογραφία 2.5. Η δοκιμή άρχισε με τη σύσταση του δείγματος κάτω από τον τέμνοντα κύλινδρο, τον κύλινδρο χαμήλωσαν έπειτα κάτω στην επιφάνεια δειγμάτων και περιστρεμμένος στο ποσοστό των 200 περιστροφών/λεπτό για 2 λεπτά η αντίσταση τριβής μετρήθηκε σε επίπεδο ποσοστού της απώλειας βάρους στο προγενέστερο δείγμα και στο μεταγενέστερο της δοκιμής.

Φωτογραφία 2.5. Δοκιμή ελέγχου για την αντίσταση τριβής.

Τα αποτελέσματα από την άποψη του ποσοστού της απώλειας βάρους παρουσιάζονται στο διάγραμμα 2.46. Διαπιστώθηκε ότι το σκυρόδεμα με crumb ελαστικό εμφανίζει λιγότερη αντίσταση τριβής από το δοκίμιο αναφοράς αυτό του ελέγχου, όπως υποδεικνύεται με την αυξανόμενη απώλεια βάρους η αυξανόμενη περιεκτικότητα ελαστικού σε crumb.




Διάγραμμα 2.436. Επί τοις εκατό απώλεια βάρους του δείγματος που υποβάλλεται στη δοκιμή τριβής.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ

# ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

## 3.1 Εισαγωγή

Οι περισσότερες κατασκευές και τεχνικά έργα στη χώρα μας είναι σχεδιασμένες ώστε να αντέχουν τις σεισμικές καταπονήσεις, δεδομένου ότι ακολουθούν τον ισχύοντα Αντισεισμικό Κανονισμό (ΕΑΚ, 2000). Στο παρόν κεφάλαιο μελετάται η διάδοση των κυμάτων που προκύπτουν από χαρακτηριστικούς σεισμούς του ελλαδικού χώρου και η επίδραση που αυτά έχουν σε μια ανωδομή από rubber-concrete σε σύγκριση με μία κατασκευή από κανονικό σκυρόδεμα. Επίσης μελετήθηκε και η περίπτωση αντισεισμικού σχεδιασμού της θεμελίωσης, όταν δηλαδή η κατασκευή από σκυρόδεμα έχει θεμελιωθεί σε ένα στρώμα από μίγμα εδάφους και ελαστικών (rubber-sand).

Το παραπάνω πρόβλημα επιχειρείται να προσεγγιστεί μέσω ενός προσομοιώματος, στο οποίο η διάδοση των σεισμικών κυμάτων συμβαίνει σε συγκεκριμένο σημείο εντός ενός εδαφικού ημίχωρου ενώ στην επιφάνεια του εδάφους υπάρχει ένας μονοβάθμιος ταλαντωτής, ο οποίος προσομοιώνει ρεαλιστικά την απλή κατασκευή που εξετάστηκε. Για την αριθμητική προσέγγιση των προαναφερθέντων προσομοιωμάτων χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων PLAXIS (2002), το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως για την επίλυση διδιάστατων προβλημάτων της γεωτεχνικής σεισμικής μηχανικής. Επιδιώχθηκε η όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ορθότητα της προσομοίωσης του συστήματος του εδάφους και του κτιρίου, καθώς και της μεταξύ τους αλληλεπίδρασης σύμφωνα με πρακτικές που χρησιμοποιούνται σε τέτοιου είδους προβλήματα.

Στο πρώτο προσομοίωμα έχουμε μια κατασκευή από κανονικό σκυρόδεμα πάνω σε μια οριζόντια εδαφική στρώση η οποία διεγείρεται από τρεις διαφορετικές καταγραφές, ενώ στο δεύτερο προσομοίωμα οι ίδιες χρονοιστορίες επιβάλλονται στην ίδια εδαφική στρώση με την διαφορά ότι η κατασκευή στην επιφάνεια του

εδάφους δημιουργήθηκε από το νέο υλικό (rubber concrete). Τέλος, στο τρίτο προσομοίωμα έχουμε την κατασκευή από κανονικό σκυρόδεμα όπου στη βάση του κτιρίου έχουμε τοποθετήσει ένα μίγμα από άμμο-ελαστικό. Ενώ το σύστημα διεγείρεται με τις ίδιες ταλαντώσεις.

Υπενθυμίζεται ότι με τον όρο σεισμική απόκριση μιας κατασκευής, νοείται η ταλάντωση και κατ' επέκταση η παραμόρφωση και η ένταση που εμφανίζει μια κατασκευή για δεδομένη σεισμική διέγερση της βάσης της. Προκειμένου να γίνει ο ακριβής υπολογισμός της δυναμικής απόκρισης μιας κατασκευής απαιτείται κατ' αρχάς η μόρφωση ενός κατάλληλου προσομοιώματος που να αναπαριστά όσο το δυνατόν πιο πιστά τη γεωμετρία, τις μηχανικές ιδιότητες και τα αδρανειακά χαρακτηριστικά, δηλαδή τις μάζες της κατασκευής. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, το κτίριο εισήχθηκε στο πρόγραμμα PLAXIS ως ένα διδιάστατο μονόροφο πλαίσιο, το οποίο έχει τα χαρακτηριστικά ενός απλοποιητικού «μονοβάθμιου ταλαντωτή» (single–degree–of–freedom ή SDOF).

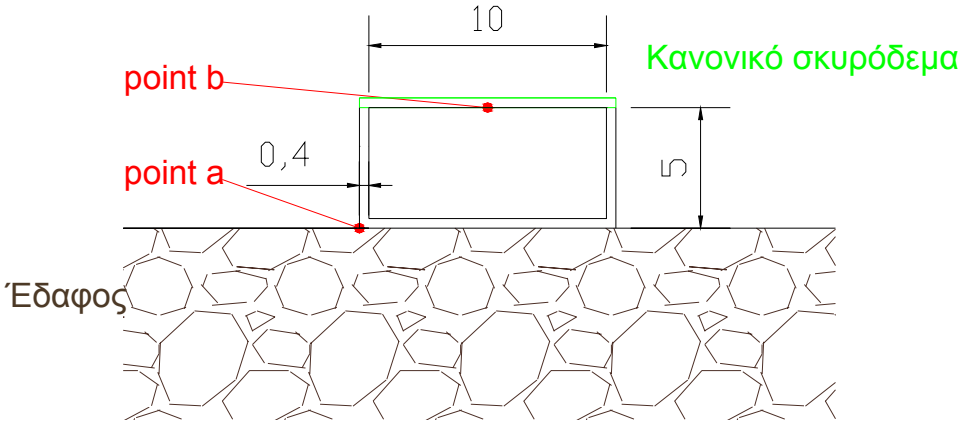
Ο απλός μονοβάθμιος ταλαντωτής είναι μια εξιδανικευμένη κατασκευή ενός ανάποδου εκκρεμούς, όπου τα υποστυλώματα έχουν μηδενική μάζα και παρέχουν την δυσκαμψία στην κατασκευή, ενώ παράλληλα όλη η μάζα είναι συγκεντρωμένη στην «κεφαλή» η οποία έχει άπειρη ακαμψία. Αυτή η απλή κατασκευή εξετάζεται ως ένα σύστημα που έχει έναν δυναμικό βαθμό ελευθερίας. Όπως είναι φανερό, στην πράξη σχεδόν όλες οι κατασκευές είναι πολύ πιο πολύπλοκες από έναν μονοβάθμιο ταλαντωτή. Ωστόσο αρκετές κατασκευές όπως υδατόπυργοι, βάθρα, κλπ μπορούν να εξιδανικευτούν ως μονοβάθμια συστήματα. Επίσης, απλοποιητικά συστήματα SDOF χρησιμοποιούνται ευρύτατα στη σεισμική μηχανική, επειδή μπορούν να μας διευκολύνουν να προσομοιώσουμε και να κατανοήσουμε τη δυναμική συμπεριφορά πολλών σύνθετων προβλημάτων.

Για τη μεγαλύτερη δυνατή ορθότητα της προσομοίωσης (και μετά από σχετική διερεύνηση) τα δύο υποστυλώματα του πλαισίου συνδέθηκαν με μια άκαμπτη βάση (οριζόντιο στοιχείο δοκού) με σκοπό να αποφευχθεί τυχόν ασύγχρονη διέγερση μεταξύ τους. Πρέπει να σημειωθεί, ότι όσον αφορά κατασκευές μεγάλου μήκους, δεν είναι δυνατή η απλουστευμένη προσομοίωσή τους με «μονοβάθμιο ταλαντωτή», καθώς λόγω της μεταξύ τους απόστασης συμβαίνει ασύγχρονη διέγερση τμημάτων της κατασκευής, δηλαδή ανομοιοειδής σεισμική καταπόνηση στα υποστυλώματα της κατασκευής, που προφανώς δεν μπορεί να προσομοιωθεί με απλά συστήματα SDOF.

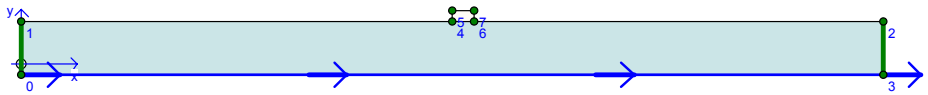
## 3.2 Περιγραφή προσομοιωμάτων

### 3.2.1 Προσομοίωμα Α1

Στο παρόν προσομοίωμα εξετάζεται η σεισμική απόκριση εδάφους με κτίριο από οπλισμένο σκυρόδεμα, όπως φαίνεται στις επόμενες εικόνες 3.1 και 3.2 .




Εικόνα 3.1 Περιγραφή προσομοιώματος Α1




Εικόνα 3.2 Γεωμετρία προσομοιώματος Α1

Για την προσομοίωσή του κτιρίου χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικές κατηγορίες ραβδωτών στοιχείων:

α) πλάκας οροφής και θεμελίου,
β) υποστυλωμάτων.

Επίσης, θεωρήθηκε ότι τα εύκαμπτα υποστυλώματα του πλαισίου είχαν μηδενική μάζα και παρείχαν την ακαμψία στο πλαίσιο. Παράλληλα θεωρήθηκε ότι όλη η μάζα του πλαισίου ήταν συγκεντρωμένη στην πλάκα του ορόφου, η οποία ήταν πλήρως άκαμπτη. Τέλος, τα δύο υποστυλώματα του πλαισίου συνδέθηκαν με μια άκαμπτη πλάκα θεμελίωσης. Εκατέρωθεν του προσομοιώματος χρησιμοποιούνται μακρινά πλευρικά όρια έτσι ώστε να προσομοιώνεται ικανοποιητικά η επέκτασης της στρώσης σε άπειρο μήκος.

Τα χαρακτηριστικά του κτιρίου (για όλα τα προσομοιώματα) είναι: ύψος h = 5m και πλάτος L=10m. Το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος ήταν 29 GPa. Ο συντελεστής ακαμψίας είναι $k=2*12EI/h^3=29696$ kN/m. Στη συνέχεια βρίσκουμε ότι η μάζα του ορόφου είναι w = 66.50 kN/m/m, άρα η ιδιοπερίοδος του κτιρίου είναι $T=2*\pi*(m/k)^{1/2}$ →T= 0,3 sec. Το ύψος της εδαφικής στρώσης είναι H=25 m.

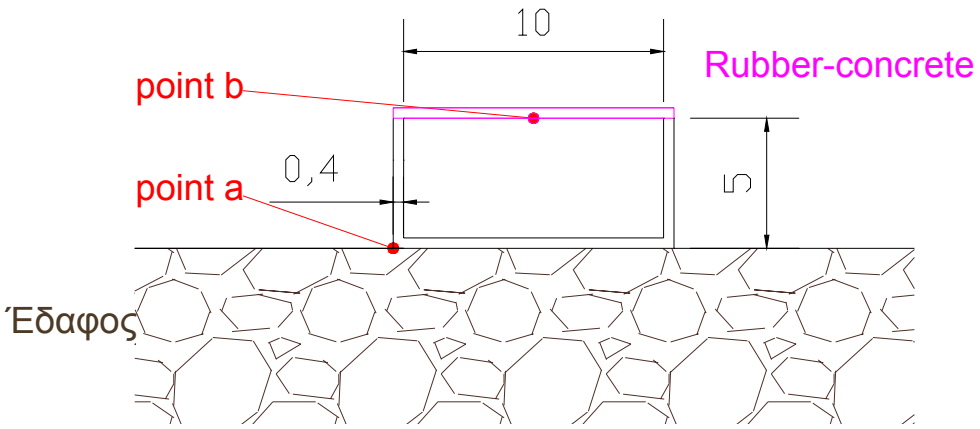
Η διακριτοποίηση της έγινε με πυκνό δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων για καλύτερη ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Η ταχύτητα διάδοσης διατμητικού κύματος στην εδαφική στρώση Vs = 200 m/s. Η απόσβεση της εδαφικής στρώσης και του ταλαντωτή είναι τύπου Railegh και το ποσοστό απόσβεσης για την περιοχή τιμών των συχνοτήτων του συστήματος και των διεγέρσεων είναι ξ = 5%.

Με σκοπό να εξεταστεί ο ρόλος και η επιρροή των χαρακτηριστικών (συχνοτικό περιεχόμενο) της σεισμικής διέγερσης στο σύστημα εδάφους-κτιρίου, η εδαφική στρώση υποβλήθηκε στην πακτωμένη βάση της σε ορισμένες (χαρακτηριστικές για την Ελλάδα) οριζόντιες διεγέρσεις. Πιο συγκεκριμένα, για να εξάγουμε πιο ασφαλή συμπεράσματα, χρησιμοποιήσαμε τρεις καταγεγραμμένες χρονοϊστορίες επιτάχυνσης:

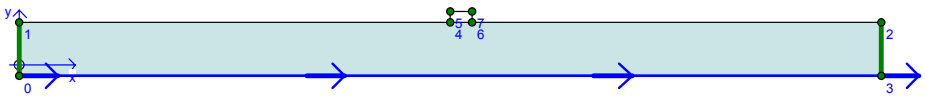
- Αιγίου (1995)
- Σεπολίων (Αθήνα,1999)
- ΚΕΔΕ (Αθήνα,1999)

### 3.2.2 Προσομοίωμα Α2

Σε αυτό το μοντέλο εξετάζεται η σεισμική απόκριση ομοίως όπως στο προσομοίωμα Α1 (βλ. εικόνες 3.3 και 3.4), με βασική διαφορά το υλικό (rubber-concrete) της ανωδομής.



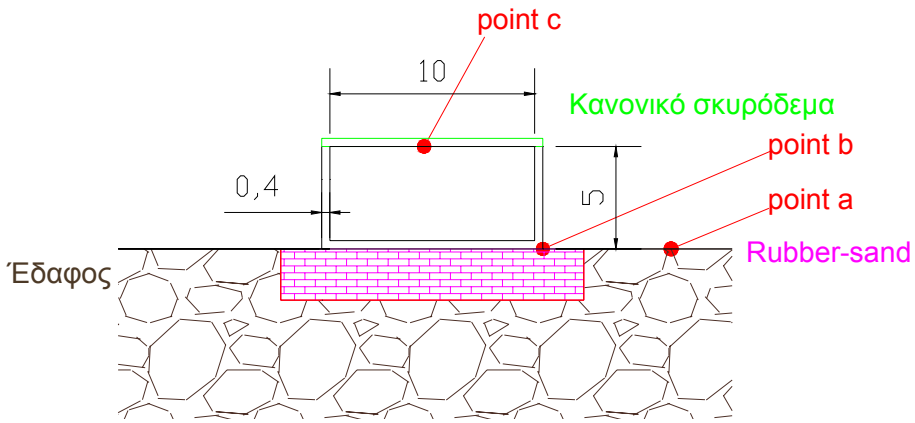

Εικόνα 3.3 Περιγραφή προσομοιώματος Α2



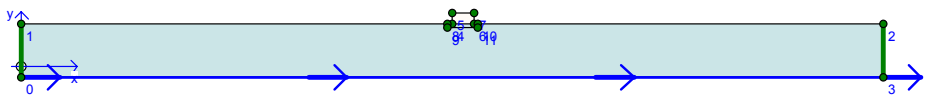

Εικόνα 3.4 Γεωμετρία προσομοιώματος Α2

Η διαφορά του προσομοιώματος Α2 από το Α1 είναι το μέτρο ελαστικότητας του κανονικού σκυροδέματος το οποίο αντικαταστάθηκε από το μέτρο ελαστικότητας του rubber-concrete το οποίο ισούται περίπου με 7.5 GPa για περιεκτικότητα σε ελαστικό 30%. Τα υπόλοιπα στοιχεία της προσομοίωσης του εδάφους και του κτιρίου είναι ακριβώς τα ίδια με το προσομοίωμα Α1. Επομένως, ο συντελεστής ακαμψίας είναι k = 7680 kN/m. Άρα, για να βρούμε την περίοδο ταλάντωσης της κατασκευής έχουμε: $T=2*\pi*(m/k)^{1/2} \rightarrow T=0.589$ sec. Όπως στο προηγούμενο προσομοίωμα, έτσι και σε αυτό χρησιμοποιήσαμε τις ίδιες χρονοϊστορίες σεισμών.

### 3.2.3 Προσομοίωμα Α3




Εικόνα 3.5. Περιγραφή προσομοιώματος Α3




Εικόνα 3.6 Γεωμετρία προσομοιώματος Α3

Όπως φαίνεται στις εικόνες 3.5 και 3.6 σε αυτό το προσομοίωμα έχουμε την ίδια κατασκευή από κανονικό σκυρόδεμα με το Α1, αλλά στη βάση του κτιρίου έχουμε τοποθετήσει ένα μίγμα από άμμο και ανακυκλωμένο ελαστικό, η οποία έχει ύψος 5m και πλάτος 15 m. Η ταχύτητα διάδοσης διατμητικού κύματος στη στρώση rubber-sand ισούται με Vs = 140 m/s για ποσοστό ελαστικού 15% (Senetakis et al., 2009). Ο λόγος του Poisson ισούται ν = 0.3, το ειδικό βάρος είναι γ=15 kN/m$^3$. Επομένως για να βρούμε το μέτρο ελαστικότητας Ε και το μέτρο διάτμησης G έφαρμόζουμε τις κλασικές σχέσεις της μηχανικής:

$$G = \rho \cdot V_s^2$$

$$E = 2 \cdot (1 + \nu) \cdot G$$

→G = (γ/g )* $V_s^2$ → G = 29969,42 kPa
→E = 2 (1 + v) * G → E = 77920,49 kPa

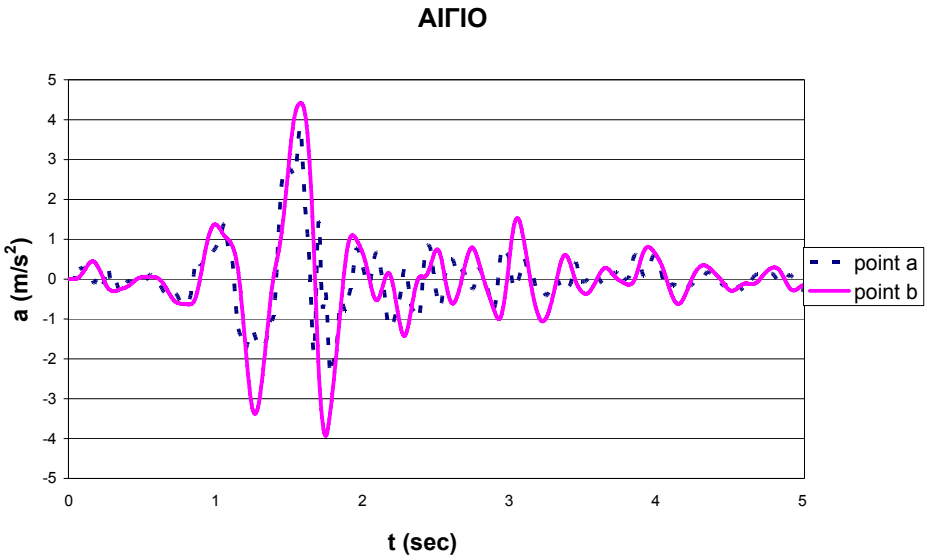
Όπως στα προηγούμενα προσομοιώματα, έτσι και σε αυτό χρησιμοποιήσαμε τις ίδιες χρονοϊστορίες.

## 3.3 Αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων

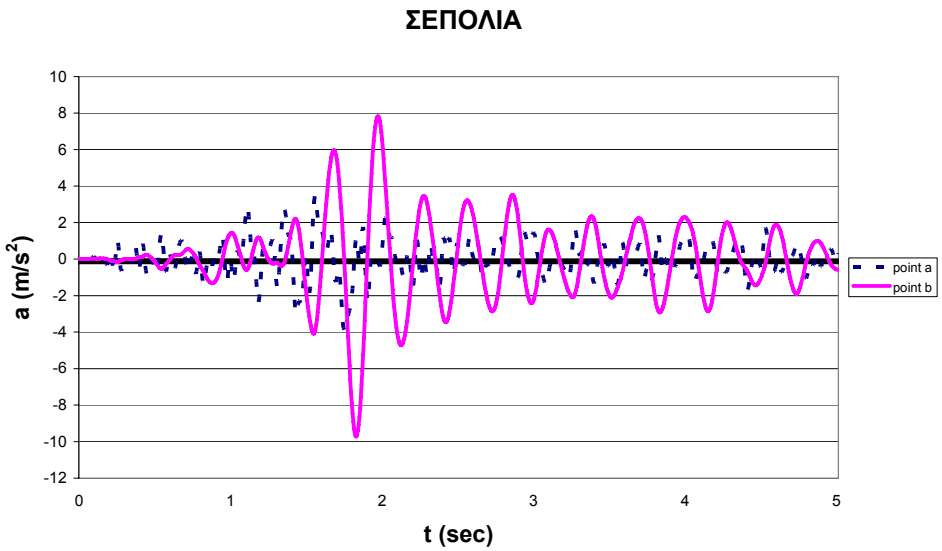
### 3.3.1 Προσομοίωμα Α1

Στα παρακάτω γραφήματα παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες της οριζόντιας επιτάχυνσης για το πρώτο προσομοίωμα για τις τρεις σεισμικές καταγραφές, του Αιγίου, των Σεπολίων και του Κέδε. Σε όλα τα προσομοιώματα εξετάζεται η ενίσχυση (ή και απομείωση ανάλογα με την περίπτωση) της απόκρισης της κατασκευής ως ο λόγος των μέγιστων επιταχύνσεων κορυφής/βάσης αυτής (βλ. Εικόνα 3.1). Αρχικά, στον σεισμό του Αιγίου μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η μέγιστη επιτάχυνση του σεισμού για το σημείο a που βρίσκεται στη βάση του ταλαντωτή (point a) είναι 3.8 $m/s^2$ και για το σημείο b στην κορυφή του ταλαντωτή (point b) είναι 4.4 $m/s^2$. Επομένως, η ενίσχυση της επιτάχυνσης (λόγος b/a) είναι 1.16 για αυτόν τον σεισμό. Επίσης, για τον σεισμό των Σεπολίων παρατηρήθηκε ότι η ενίσχυση της επιτάχυνσης αυξήθηκε από αυτόν του Αιγίου και είναι 2.49, ενώ για την σεισμική καταγραφή του ΚΕΔΕ η ένταση μειώθηκε σε 0.95.Τα ανωτέρω αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 3.1.

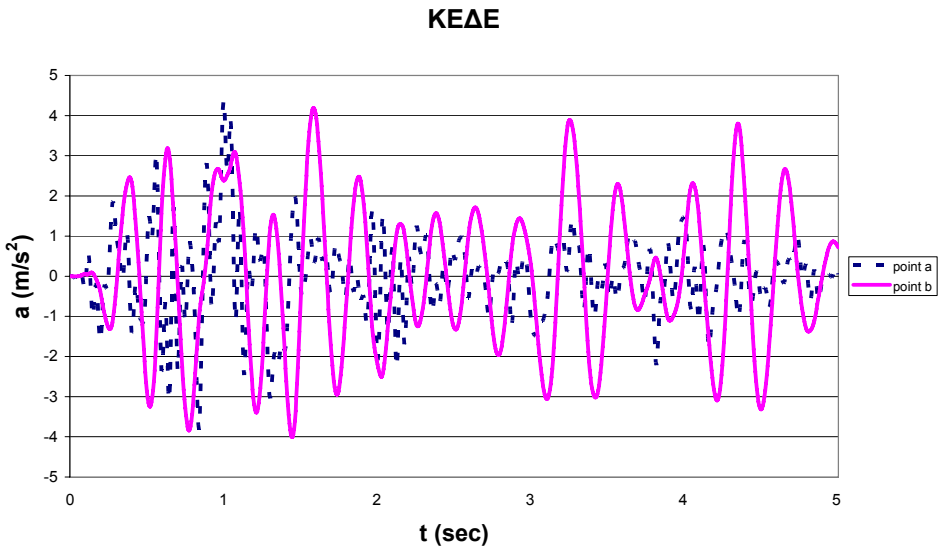
(α)



(β)




(γ)




Διάγραμμα 3.1 Χρονοϊστορίες της οριζόντιας επιτάχυνσης στη βάση και στην κορυφή του προσομοιώματος Α1 (point a και point b, αντίστοιχα) για τις τρείς σεισμικές καταγραφές (α) του Αιγίου, (β) των Σεπολίων και (γ) του Κέδε.

| Προσομοίωμα Α1 | | | |
|---|---|---|---|
| | point a | point b | b/a |
| ΑΙΓΙΟ | 3.8 | 4.4 | 1,16 |
| ΣΕΠΟΛΙΑ | 3.9 | 9.7 | 2.49 |
| ΚΕΔΕ | 4.4 | 4.2 | 0.95 |

Πίνακας 3.1 Μετρήσεις της ενίσχυσης της επιτάχυνσης στο προσομοίωμα Α1 για τις τρεις καταγραφές

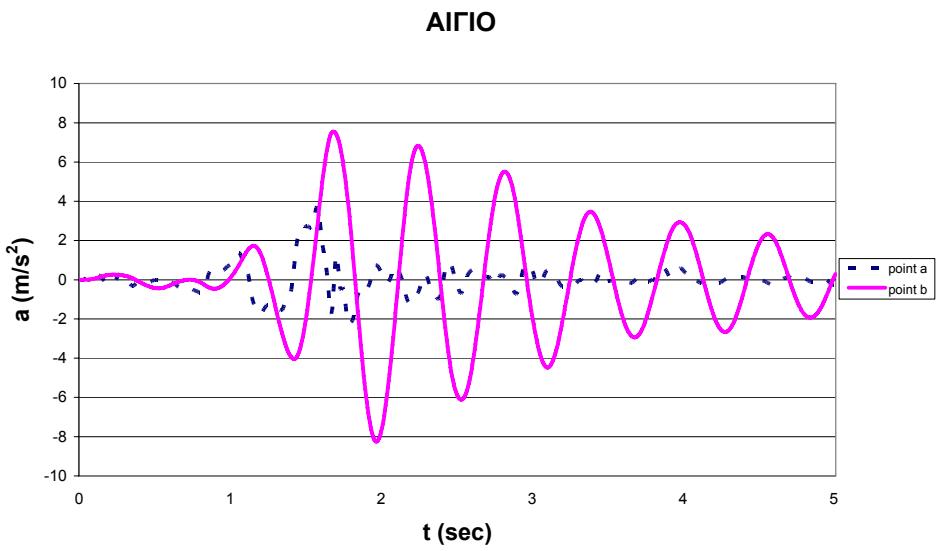
### 3.3.2 Προσομοίωμα Α2

Ομοίως με την προηγούμενη περίπτωση Για τον σεισμό του Αιγίου μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η μέγιστη επιτάχυνση του σεισμού για το σημείο a που βρίσκεται στη βάση του ταλαντωτή (point a) είναι 3.7 $m/s^2$ και για το σημείο b στην κορυφή του ταλαντωτή (point b) είναι 8.3 $m/s^2$. Επομένως, η ενίσχυση της επιτάχυνσης (λόγος b/a) είναι 2.24 για αυτόν τον σεισμό. Επίσης, και στην σεισμική καταγραφή του ΚΕΔΕ η ενίσχυση είναι 1.40. Αντιθέτως, για την καταγραφή των Σεπολίων παρατηρήθηκε σημαντική απομείωση της επιτάχυνσης μιας και ο λόγος b/a ισούται με 0.54. Το φαινόμενο αυτό (όπως εξηγείται και στο επόμενο κεφάλαιο) μπορεί να αποδοθεί στη μεγάλη αλλαγή της τιμής της ιδιοπεριόδου του κτιρίου λόγω της χρησιμοποίησης του rubber concrete. Τα παραπάνω αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 3.2.

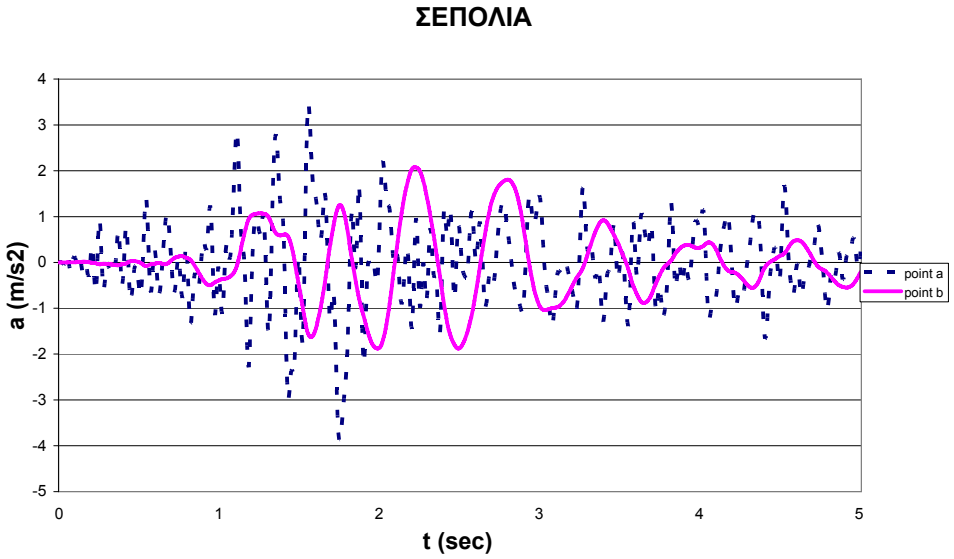
| Προσομοίωμα Α2 | | | |
|---|---|---|---|
| | point a | point b | b/a |
| ΑΙΓΙΟ | 3.7 | 8.3 | 2.24 |
| ΣΕΠΟΛΙΑ | 3.9 | 2.1 | 0.54 |
| ΚΕΔΕ | 4.3 | 6.0 | 1.40 |

Πίνακας 3.2 Μετρήσεις της ενίσχυσης της επιτάχυνσης στο προσομοίωμα Α2 για τις τρεις καταγραφές

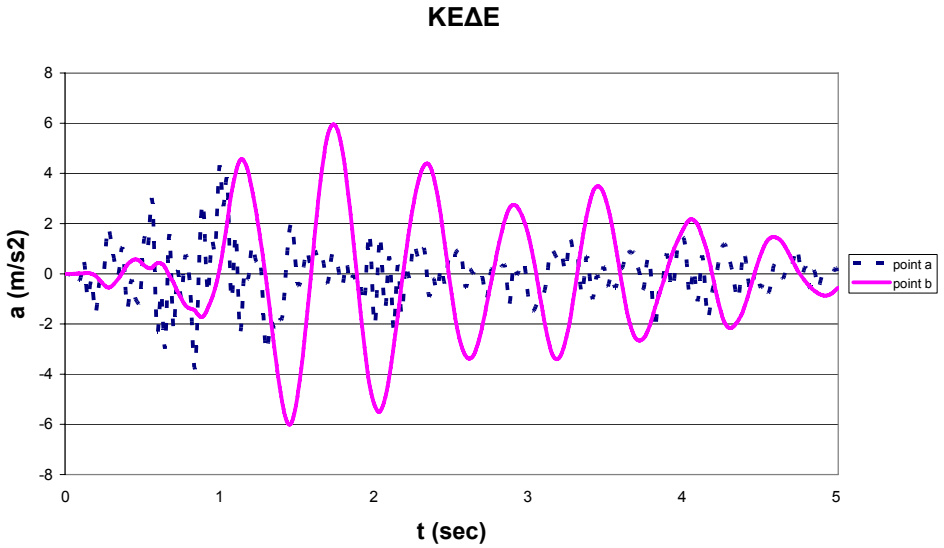
(α)



(β)




(γ)




Διάγραμμα 3.2 Χρονοϊστορίες της οριζόντιας επιτάχυνσης στη βάση και στην κορυφή του προσομοιώματος Α2 (point a και point b αντίστοιχα) για τις τρείς σεισμικές καταγραφές (α) του Αιγίου, (β) των Σεπολίων και (γ) του Κέδε.

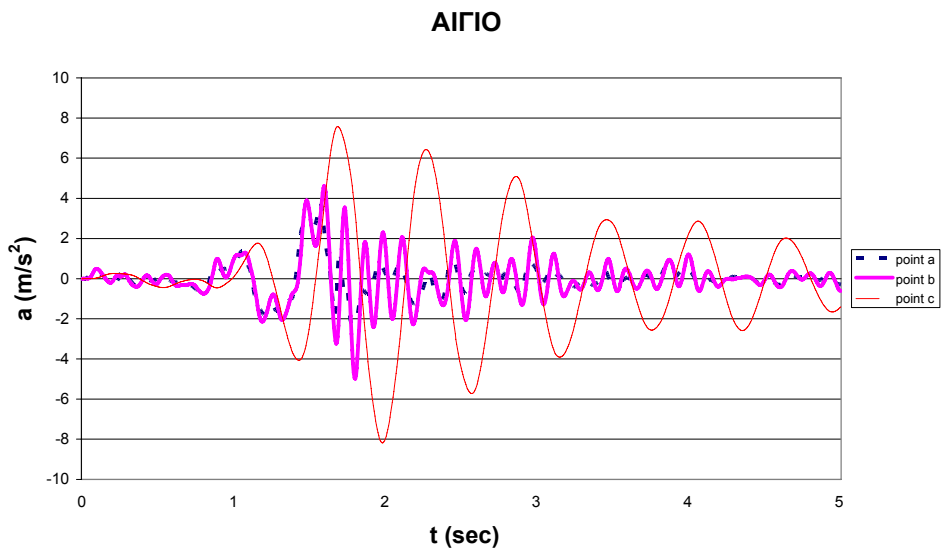
### 3.3.3 Προσομοίωμα Α3

Για τον σεισμό του Αιγίου μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η μέγιστη επιτάχυνση του σεισμού για το σημείο C που είναι στην κορυφή του ταλαντωτή (point c) είναι 8.2 $m/s^2$ και για το σημείο A (point a) που είναι στην επιφάνεια που βρίσκεται πολύ κοντά στη βάση του κτιρίου, ακριβώς δίπλα από τη θεμελίωση τύπου rubber sand (βλ. Εικόνα 3.5), είναι 3.5$m/s^2$. Επομένως, η ενίσχυση της επιτάχυνσης (λόγος c/a) είναι 3.24 για αυτόν τον σεισμό. Επίσης, για την καταγραφη του Κέδε παρατηρήθηκε ότι η ενίσχυση της επιτάχυνσης είναι 1.33. Τέλος,αντίστοιχα με το προσομοίωμα Α2, για την καταγραφή των Σεπολίων παρατηρήθηκε ότι υπάρχει πάλι απομείωση της επιτάχυνσης αφού ο σχετικός λόγος είναι 0.45. Τα παραπάνω αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 3.3.

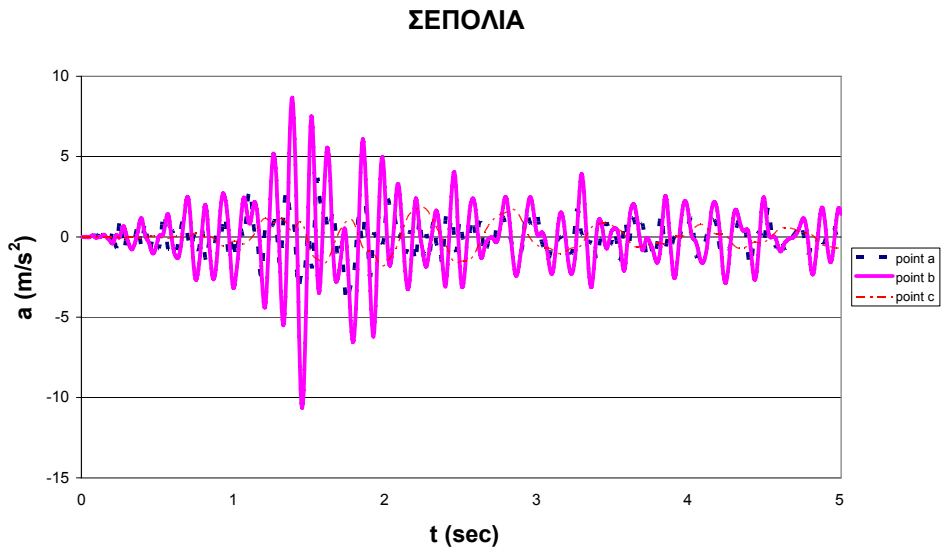
| Προσομοίωμα Α3 | | | |
|---|---|---|---|
| | point a | point c | c/a |
| ΑΙΓΙΟ | 3.8 | 8.2 | 2.15 |
| ΣΕΠΟΛΙΑ | 4.0 | 1.8 | 0.45 |
| ΚΕΔΕ | 4.6 | 6.1 | 1.33 |

Πίνακας 3.3 Μετρήσεις της ενίσχυσης της επιτάχυνσης στο προσομοίωμα Α1 για τις τρεις καταγραφές

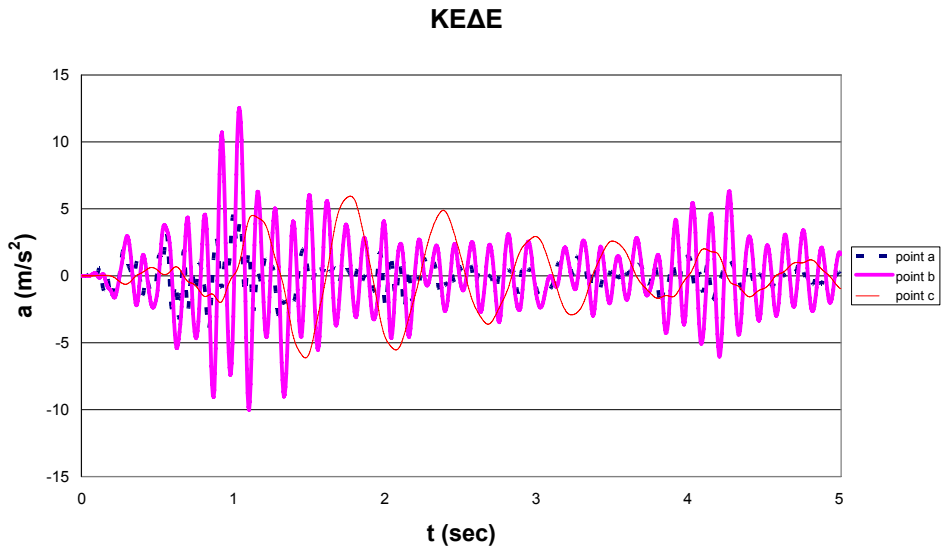
(α)



(β)




(γ)




Διάγραμμα 3.3 Χρονοϊστορίες της οριζόντιας επιτάχυνσης στην ελεύθερη επιφάνεια, στη βάση και στην κορυφή του κτιρίου του προσομοιώματος Α3 (point a, point b και point c αντίστοιχα) για τις τρείς σεισμικές καταγραφές (α) του Αιγίου, (β) των Σεπολίων και (γ) του Κέδε.

### 3.3.4 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

Στον πίνακα 3.4 μπορούμε να μελετήσουμε συνολικά την ενίσχυση (ή και την απομείωση) της επιτάχυνσης του εξεταζόμενου κτιρίου για κάθε σεισμό και για τα τρία προσομοιώματα Α1, Α2, Α3.

- Στον σεισμό του Αιγίου παρατηρήθηκε ότι ο λόγος της ενίσχυσης της εδαφικής επιτάχυνσης του ταλαντωτή στο προσομοίωμα Α1 ήταν η μικρότερη (1.16). Στη συνέχεια αυξήθηκε αρκετά (2.24) για το προσομοίωμα Α2 και λιγότερο (2.15) για το Α3.
- Στη σεισμική καταγραφή των Σεπολίων ο λόγος της ενίσχυσης της εδαφικής επιτάχυνσης του ταλαντωτή ήταν 2.49 στο προσομοίωμα Α1, ενώ στα προσομοιώματα Α2 και Α3 μειώθηκε σε 0.54 και 0.45, αντίστοιχα.
- Για τη χρονοϊστορία του Κέδε η μεγαλύτερη ενίσχυσης της εδαφικής επιτάχυνσης παρατηρήθηκε στο προσομοίωμα Α2 (1.40), ενώ στο Α3 ήταν λίγο μικρότερη (1.33). Μικρή απομείωση παρατηρήθηκε δε (0.95) για το σεισμό του Αιγίου.

| | Προσομοίωμα Α1 | Προσομοίωμα Α2 | Προσομοίωμα Α3 |
|---|---|---|---|
| ΑΙΓΙΟ | 1.16 | 2.24 | 2.15 |
| ΣΕΠΟΛΙΑ | 2.49 | 0.54 | 0.45 |
| ΚΕΔΕ | 0.95 | 1.40 | 1.33 |

Πίνακας 3.4 Ενισχύσεις της εδαφικής επιτάχυνσης των σεισμών για όλα τα προσομοιώματα και όλες τις καταγραφές.

Το προσομοίωμα Α3 είναι πιο σύνθετο, λόγω της πρόσθετης αλληλεπίδρασης της θεμελίωσης από rubber sand με το έδαφος και την ανωδομή. Πιθανώς συμβαίνει μια περαιτέρω αύξηση της ιδιοπεριόδου του συστήματος (σε σχέση με το Α2), οπότε η αλλαγή της απόκρισης σε σχέση με το προσομοίωμα Α2 είναι μικρή και εμφανίζεται ως μικρή μείωση των τιμών των ενισχύσεων σε όλες τις καταγραφές.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ

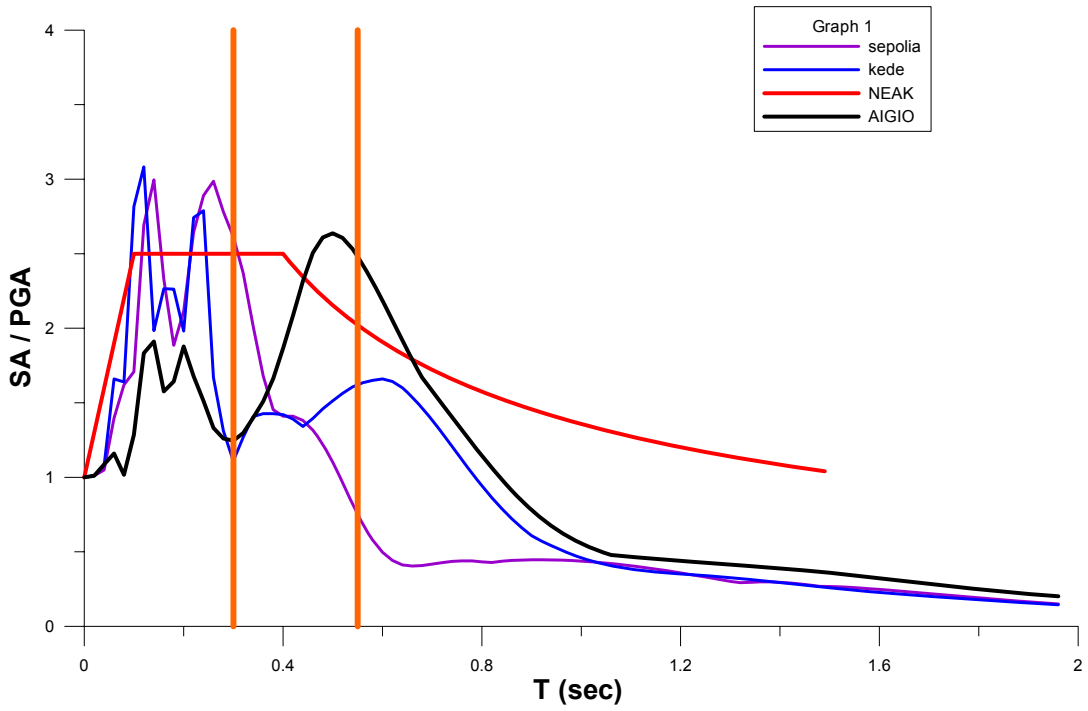
# ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Η εναλλακτική διαχείριση των μεταχειρισμένων ελαστικών παραμένει ένα ιδιαίτερα οξύ πρόβλημα στις μέρες μας, καθώς αποτελούν ένα από τα πιο δύσκολα στη διάθεσή τους προϊόντα, λόγω της μεγάλης αντοχής τους στο χρόνο. Η εναπόθεση τους, στους Χώρους Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (Χ.Υ.Τ.Α) έχει απαγορευτεί λόγω του ότι προκαλούν σοβαρά προβλήματα στην ανθρώπινη υγεία αφού ελευθερώνονται στο περιβάλλον βλαβερές ουσίες, όπως οι πολυαρωματικοί υδρογονάνθρακες, βενζόλιο και φαινόλες, ουσίες με καρκινογόνες ιδιότητες. Επομένως, με την αντικατάσταση των αδρανών υλικών του σκυροδέματος από ανακυκλωμένα ελαστικά υπάρχει η δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης σε άλλες εφαρμογές όπως κάλυψη αθλητικών επιφανειών, αντιολισθητικά, υλικά οδοποιίας, μονώσεις, κ.α. Η χρήση του rubber concrete σε δάπεδα αθλοπαιδιών όπως αυλές σχολείων λειτουργεί ικανοποιητικά λόγω των ελαστικών ιδιοτήτων του μίγματος. Για την καλύτερη αξιοποίηση του παραπάνω μίγματος είναι απαραίτητο η γνώση των ιδιοτήτων του υλικού rubber concrete. Επομένως, σύμφωνα με την βιβλιογραφική επισκόπηση της παρούσας εργασίας παρατηρήθηκε ότι όσο αυξάνεται το ποσοστό της περιεκτικότητας του ελαστικού στο μίγμα η κάθιση και το ειδικό βάρος μειώνεται. Επίσης, παρατηρείται μείωση των μηχανικών ιδιοτήτων (θλιπτική, καμπτική αντοχή).

Κύριο βάρος στην παρούσα εργασία δόθηκε στη διερεύνηση της δυναμικής συμπεριφοράς του σύνθετου υλικού δόμησης rubber concrete αλλά και του σύνθετου υλικού θεμελίωσης (rubber sand) όταν χρησιμοποιηθούν σε ένα απλό κτίριο το οποίο μπορεί να θεωρηθεί ως μονοβάθμιος ταλαντωτής (SDOF). Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν διεγέρσεις χαρακτηριστικών ελληνικών σεισμών. Στο διάγραμμα 4.1 φαίνονται τα φάσματα (για απόσβεση 5%) τριών καταγραφών του σεισμού του Αιγίου, την καταγραφή από τον σταθμό των Σεπολίων και ΚΕΔΕ του σεισμού της Αθήναςπου εφαρμόστηκαν για τη διέγερση των προσομοιωμάτων Α1, Α2, Α3, όπως αναπτύχθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Εξετάζοντας το διάγραμμα 4.1 παρατηρούμε ότι το φάσμα του ΝΕΑΚ

για τύπο εδάφους Α (βραχώδες υπόβαθρο) αποτελεί περίπου το άνω όριο των τριών σεισμικών διεγέρσεων.

Η ιδιοπερίοδος (Τ) για την εξεταζόμενη κατασκευή από σκυρόδεμα (προσομοιώματα Α1 και Α3) από την εξίσωση της ιδιοπεριόδου μονοβάθμιου ταλαντωτή υπολογίζεται εύκολα ότι ισούται με T=0.3 sec. Επομένως, για την τιμή ιδιοπεριόδου 0.3 sec μπορούμε να υπολογίσουμε που τέμνεται κάθε φάσμα. Για το προσομοίωμα Α1, παρατηρούμε ότι η ενίσχυση για την καταγραφή των Σεπολίων η τιμή της ιδιοπεριόδου είναι περίπου 2.5 ενώ για τις καταγραφές Αιγίου και Κέδε είναι 1.3 και 1.2, αντίστοιχα. Για το προσομοίωμα Α2, ομοίως υπολογίστηκε ότι το T=0.589 sec. Από το διάγραμμα παρατηρούμε ότι η κατάσταση διαφοροποιείται καθώς βρισκόμαστε στην περιοχή συντονισμού για τον σεισμό του Αιγίου (ο οποίος έχει μεγαλύτερη περίοδο από τις άλλες δό καταγραφές), ενώ η εικόνα είναι καλύτερη για τις άλλες δύο καταγραφές Σεπολίων (κυρίως) και ΚΕΔΕ, στις οποίες βρισκόμαστε πλέον στον τελικό φθίνοντα κλάδο των φασμάτων.




Διάγραμμα 4.1 Φάσματα καταγραφών και σύγκριση με το φάσμα ΝΕΑΚ (κατ. εδάφους Α)

Το προσομοίωμα Α3 είναι πιο σύνθετο, λόγω του ότι είναι θέμα αλληλεπίδρασης με το στρώμα rubber-sand της θεμελίωσης. Αυτό που πιθανώς συμβαίνει είναι μια περαιτέρω αύξηση της ιδιοπεριόδου του συστήματος οπότε η διαφοροποίηση σε σχέση με το προσομοίωμα Α2 δεν είναι σημαντική και εμφανίζεται ως μικρή περαιτέρω μείωση των τιμών των ενισχύσεων.

Η αριθμητική προσομοίωση των μοντέλων της παρούσας έρευνας έγινε με χρήση κατάλληλου, για την επίλυση διδιάστατων προβλημάτων της γεωτεχνικής σεισμικής μηχανικής, λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων (PLAXIS). Επιδιώχθηκε η όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ορθότητα της προσομοίωσης του συστήματος της θεμελίωσης και του μονοβάθμιου ταλαντωτή, καθώς και της μεταξύ τους αλληλεπίδρασης. Πρέπει όμως να σημειωθεί ότι το πρόγραμμα PLAXIS έχει τη δυνατότητα γραμμικών ελαστικών δυναμικών αναλύσεων, οπότε δεν μπορεί να ληφθεί υπόψη η επίδραση της μη-γραμμικότητας των υλικών για μεσαία και υψηλά επίπεδα σεισμικής έντασης. Μία άλλη επίσης αδυναμία του προγράμματος είναι ότι η παρούσα έκδοση δεν υποστηρίζει την επιλογή διαφορετικών ποσοστών απόσβεσης για κάθε υλικό, οπότε δεν μπορούν να ληφθούν με μεγαλύτερη ακρίβεια υπόψη η δυνατότητα μεγαλύτερης απόσβεσης των σύνθετων μιγμάτων rubber concrete και rubber-sand.

Σε κάθε περίπτωση και παρά τις προαναφερθείσες αδυναμίες της αριθμητικής προσωμοίωσης, τα αποτελέσματα της παρούσας διερεύνησης αναδεικνύουν τη δυνατότητα της χρήσης των ανακυκλωμένων ελαστικών οχημάτων στον αντισεισμικό σχεδιασμό κατασκευών. Πρόκειται ασφαλώς για μια προκαταρκτική έρευνα που χρειάζεται περαιτέρω διεύρυνση με ακριβέστερη προσομοίωση κανονικών κτιρίων έτσι ώστε να εξαχθούν ασφαλέστερα συμπεράσματα για τη βέλτιστη δυνατή τεχνο-οικονομικά χρήση των νέων σύνθετων υλικών σε διάφορα τεχνικά έργα πολιτικού μηχανικού.

# ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ


1. Khatib Z.K., Bayomy, F.M. 1999. Rubberized Portland cement concrete, ASCE Journal of Materials in Civil Engineering 11 (3), pp 206-213.
2. Eldin, N.N., Senouci, A.B. 1993. Rubber-tire particles as concrete aggregates, ASCE Journal of Materials in Civil Engineering 5 (4),pp 478-496.
3. Topçu, I.B. 1995. The properties of rubberized concrete, Cement and Concrete Research 25 (2),pp 304-310.
4. Oikonomou N., Mavridou S, **"**Improvement of chloride ion penetration resistance in cement mortars modified with rubber from worn automobile tires" (2007).
5. Sukontasukkul, Chalermphol "Properties of concrete pedestrian block mixed with crumb rubber", *Construction and Building Materials* 20, (2006) 450-457.
6. Biel TD, Lee H. Magnesium oxychloride cement concrete with recycled tire rubber. Transport Res Rec, TRB 1996;1561:6–12.
7. Fatuhi N, Clark N. Cement-based materials containing tire rubber. Constr Build Mater 1996;10(4):229–36.
8. Topcu IB. The properties of rubberized concretes. Cem Concr Res 1995;25(2):304–10.
9. Topcu IB, Avcular N. Analysis of rubberized concrete as a composite material. Cem Concr Res 1997;27(8):1135–9.
10. Benazzouk A, Mezreb K, Douzane O, Que´neudec M, Physicomechanical properties and water-absorption of cement–rubber composites formulated with shredding operation wastes. Cem Conc Comp, 2005.
11. Benazzouk, A., Queneudec, M., 2002. Durability of cement–rubber composites under freeze thaw cycles. In: Dhir, R.K. et al. (Ed.), Proceedings of the International Conference on Sustainable Concrete Construction, University of Dundee, Scotland, UK, pp. 356– 362.
12. Segre, N., Joekes, I., 2000. Use of tire rubber particles as addition to cement paste. Cement and Concrete Research 30 (9), 1421–1425.

13. Senetakis K., Anastasiadis A., Trevlopoulos K., and Pitilakis K., Dynamic response of SDOF systems on soil replaced with sand/rubber mixture, Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering Conference (COMPDYN2009), Rhodes, Greece, 22–24 June 2009.
14. Εγχειρίδιο χρήσης PLAXIS (Version 7.2), 2002.
15. ΕΑΚ (2000), Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός, Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας, Αθήνα.
16. Οικονόμου Ν., Στεφανίδου Μ., Μαυρίδου Σ., Εσκίογλου Π., (2005), 'Μελέτη μικροδομής τσιμεντοκονιαμάτων τροποποιημένων με φθαρμένα ελαστικά αυτοκινήτων', Πρακτικά 1ου Πανελλήνιου Συνεδρίου Για την Αξιοποίηση Βιομηχανικών Παραπροϊόντων στη δόμηση, (Ε.ΒΙ.ΠΑΡ.) σελ.129-140, Θεσσαλονίκη
17. Προεδρικό Διάταγμα Υπ. αριθμ.109 2004. Μέτρα και όροι για την εναλλακτική διαχείριση των μμεταχειρισμένων ελαστικών των οχημάτων. Πρόγραμμα για την εναλλακτική διαχείρισή τους, 5 Μαρτίου 2004, Εφημερίδα της Κυβερνήσεως της Ελληνικής Δημοκρατίας, Τεύχος Πρώτο.
18. Ecoelastika. http://www.ecoelastika.gr, Ιούνιος 2009.
19. ETRA, Εισαγωγή στην ανακύκλωση των ελαστικών, http://www.etra.eu.com, Ιούνιος 2009.
20. HELESI S.A, Ελληνική Βιομηχανία Περιβαλλοντικών Συστημάτων ΑΕΒΕ,http://www.helesi.com, Ιούνιος 2009.

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Η εφαρμογή της μεθόδου της αριθμητικής ανάλυσης των Πεπερασμένων Στοιχείων για τη μελέτη της σεισμικής απόκρισης των προσομοιωμάτων της παρούσας εργασίας, έγινε με τη χρήση του κώδικα PLAXIS (Version 7.2). Το λογισμικό PLAXIS έχει σχεδιαστεί και χρησιμοποιείται για την ανάλυση και τη μελέτη ενός ευρέος φάσματος θεμάτων της γεωτεχνικής μηχανικής. Παρακάτω παρουσιάζονται τα βασικά στοιχεία του προγράμματος PLAXIS σύμφωνα και με το εγχειρίδιο χρήσης των Brinkgreve et al. (2002).

## Α.1 Εισαγωγή στο PLAXIS

Το PLAXIS είναι ένα εμπορικά διαθέσιμο πακέτο πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιείται για ειδικές εφαρμογές, κατάλληλο για την επίλυση (στατικών και δυναμικών) προβλημάτων της γεωτεχνικής μηχανικής (Γλαμπεδάκης 2005). Ειδικότερα, το δυναμικό μέρος του παρέχει στο χρήστη τη δυνατότητα της ανάλυσης της συμπεριφοράς του εδάφους όταν αυτό υπόκειται σε σεισμικές φορτίσεις. Επιπλέον, με τη χρήση του PLAXIS είναι δυνατή η μελέτη της επίδρασης των εδαφικών πλευρικών ωθήσεων σε κατασκευές που βρίσκονται εντός του εδάφους, όταν το σύστημα τοίχου-εδάφους διεγείρεται από σεισμικές φορτίσεις.

Το πρόγραμμα δουλεύει σε γραφικό περιβάλλον Windows και έτσι το περιβάλλον εργασίας του PLAXIS είναι αρκετά φιλικό προς το χρήστη. Το πρόγραμμα αποτελείται από τα εξής τέσσερα υποπρογράμματα:

- το υποπρόγραμμα εισαγωγής των δεδομένων (input),
- το υποπρόγραμμα υπολογισμών (calculations),
- το υποπρόγραμμα των αποτελεσμάτων (output),
- το υποπρόγραμμα σχεδιασμού γραφημάτων (curves).

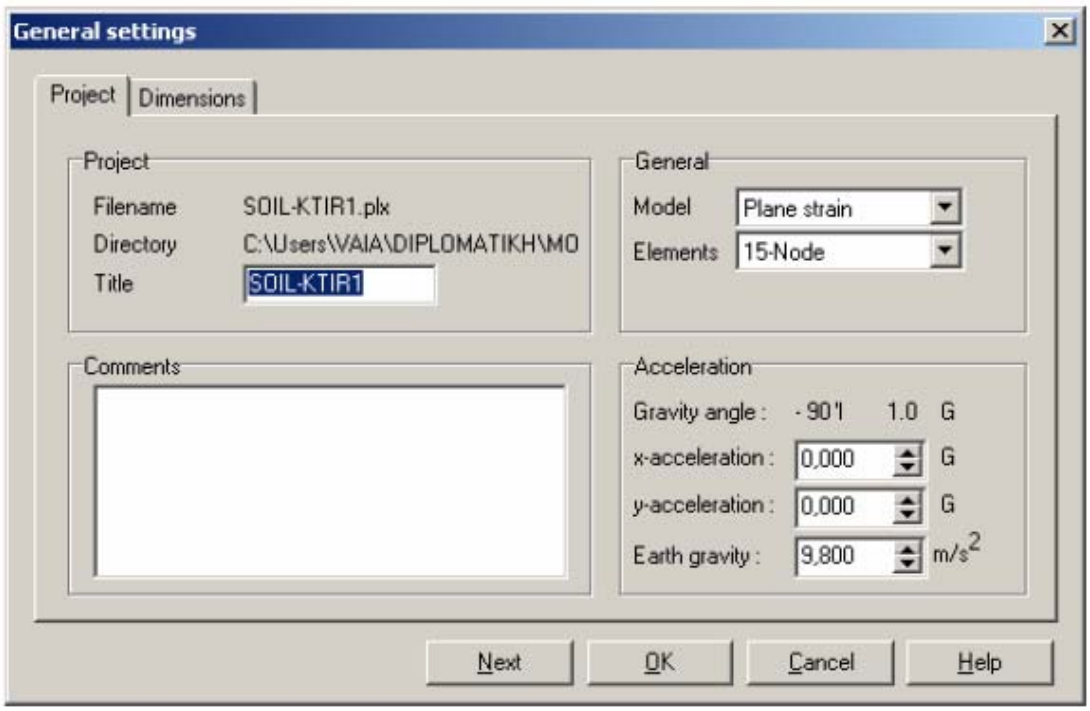
Στις ενότητες που ακολουθούν περιγράφεται καθένα από τα παραπάνω υποπρογράμματα σε συνδυασμό με το σχετικό θεωρητικό υπόβαθρο που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα.

## Α. 2 Υποπρόγραμμα εισαγωγής δεδομένων (input)

Αρχικά, για την επίλυση ενός οποιουδήποτε προβλήματος με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, είναι απαραίτητος ο σχεδιασμός ενός κάναβου πεπερασμένων στοιχείων, ο καθορισμός των ιδιοτήτων των υλικών καθώς και επίσης των συνοριακών συνθηκών και των φορτίων του προβλήματος. Στο λογισμικό PLAXIS οι παραπάνω εργασίες πραγματοποιούνται στο υποπρόγραμμα εισαγωγής των δεδομένων (input). Στο τμήμα αυτό του προγράμματος περιέχονται όλα εκείνα τα εργαλεία που χρειάζονται για τον σχεδιασμό ή την τροποποίηση του γεωμετρικού προσομοιώματος της εξεταζόμενης γεωκατασκευής, για τη δημιουργία του κατάλληλου δικτυώματος πεπερασμένων στοιχείων καθώς επίσης και για τη δημιουργία των αρχικών συνθηκών στήριξης και φόρτισης.

### Α.2.1 Γενικές ρυθμίσεις

Με την έναρξη του προγράμματος PLAXIS και στην αρχή της δημιουργίας του προσομοιώματος εμφανίζεται ένα παράθυρο διαλόγου, το οποίο περιέχει δύο φύλλα πληροφοριών, και στο οποίο ο χρήστης επιλέγει εάν θα γίνει η επεξεργασία ενός υπάρχοντος μοντέλου ή η δημιουργία ενός νέου μοντέλου (βλ. σχήμα Α.1). Σε περίπτωση που ο χρήστης θα δημιουργήσει ένα νέο μοντέλο, είναι απαραίτητο να γίνουν κάποιες γενικές ρυθμίσεις που αφορούν την ονομασία του, τον τύπο του μοντέλου καθώς και το είδος των πεπερασμένων στοιχείων που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν. Οι ρυθμίσεις αυτές γίνονται στο πρώτο φύλλο του παραθύρου (Project) ενώ στο δεύτερο φύλλο του παραθύρου (Dimensions) καθορίζονται οι μονάδες του μήκους, της αντοχής και του χρόνου, καθώς και οι διαστάσεις της περιοχής σχεδίασης.

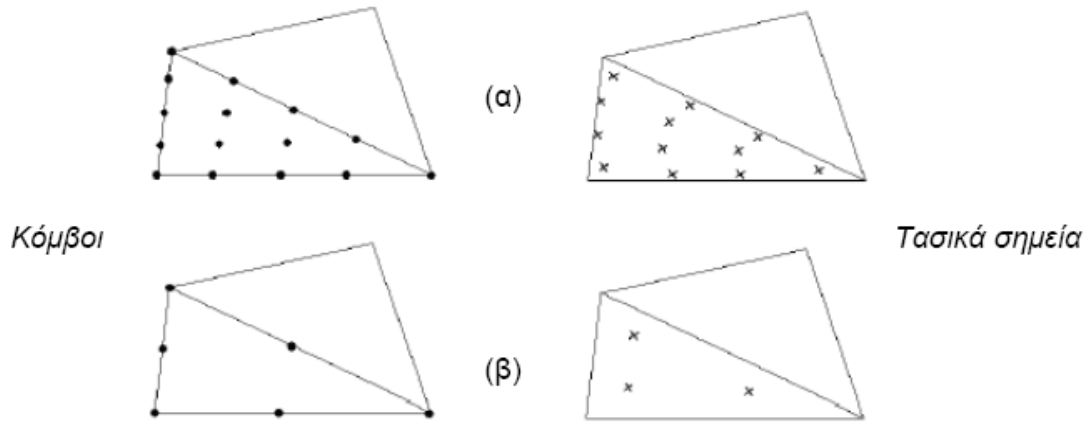



Σχήμα Α.1: Το φύλλο Project του παραθύρου διαλόγου General settings.

Όσον αφορά στον τύπο της ανάλυσης του μοντέλου, το λογισμικό PLAXIS παρέχει τη δυνατότητα της μόρφωσης είτε διδιάστατων αξονοσυμμετρικών προσομοιωμάτων (axisymmetric model) είτε διδιάστατων προσομοιωμάτων πεπερασμένων στοιχείων με επίπεδη παραμόρφωση (plane strain model). Τα διδιάστατα αξονοσυμμετρικά προσομοιώματα εφαρμόζονται για τη μελέτη κυκλικών κατασκευών με ομοιόμορφη ακτινική διατομή, οι οποίες φορτίζονται γύρω από ένα κεντρικό άξονα. Τα διδιάστατα προσομοιώματα επίπεδης παραμόρφωσης εφαρμόζονται για τη μελέτη κατασκευών με μια ομοιόμορφη διατομή (αυτή του επιπέδου σχεδίασης), όπου γίνεται η παραδοχή των μηδενικών παραμορφώσεων και μετακινήσεων στη διεύθυνση η οποία είναι κάθετη στο επίπεδο σχεδίασης, δηλαδή στη διεύθυνση z.

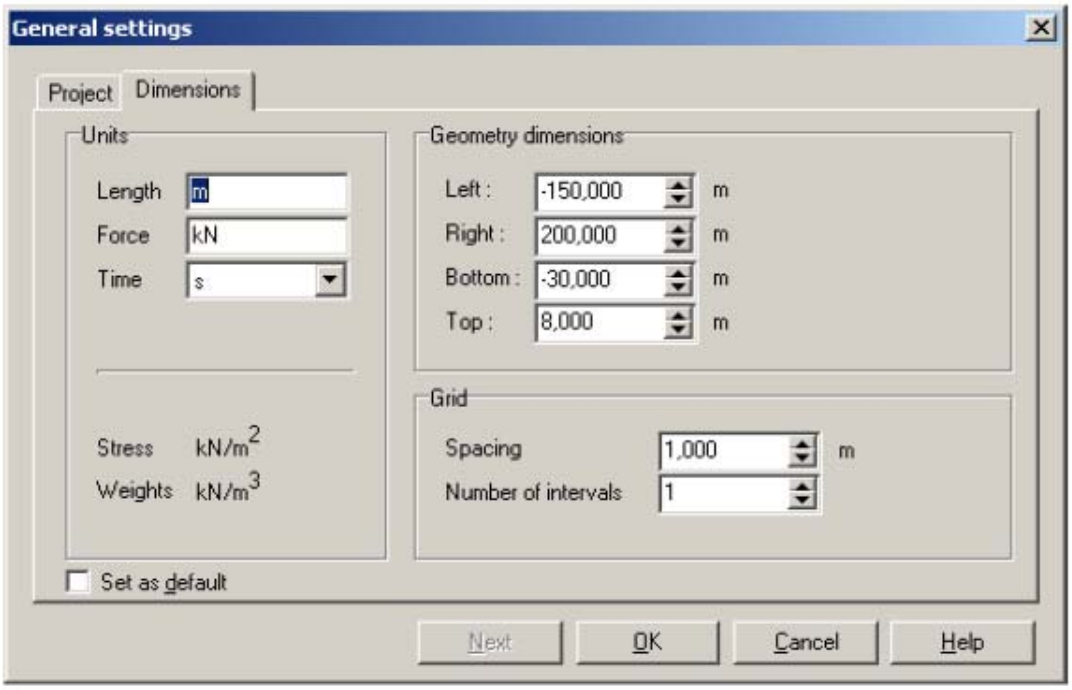
Όσον αφορά στο είδος των πεπερασμένων στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν, ο χρήστης έχει δύο επιλογές (βλ. Σχήμα Α.2): τα επίπεδα εξακομβικά τριγωνικά στοιχεία ή τα επίπεδα δεκαπεντακομβικά τριγωνικά στοιχεία. Η επιλογή του είδους των πεπερασμένων στοιχείων γίνεται με βάση τον τύπο της ανάλυσης του εξεταζόμενου μοντέλου. Το εξακομβικό τριγωνικό στοιχείο έχει έξι κόμβους στους οποίους υπολογίζονται οι μετατοπίσεις ενώ το δεκαπεντακομβικό έχει αντίστοιχα δεκαπέντε. Ωστόσο, οι κόμβοι αυτοί είναι διαφορετικοί από τα σημεία στα οποία υπολογίζονται οι τάσεις, τα οποία ονομάζονται ‘‘τασικά σημεία’’ (stress points). Το εξακομβικό τριγωνικό στοιχείο έχει τρία τασικά σημεία ενώ το δεκαπεντακομβικό έχει αντίστοιχα δώδεκα. Ο πίνακας δυσκαμψίας του

εξακομβικού στοιχείου εκτιμάται με αριθμητική ολοκλήρωση χρησιμοποιώντας τρία σημεία ολοκλήρωσης Gauss, τα οποία είναι και τα τρία τασικά σημεία του στοιχείου. Τα δεκαπεντακομβικά τριγωνικά στοιχεία παρέχουν μεγαλύτερη ακρίβεια και ποιότητα στα αποτελέσματα αφού πλέον γίνεται παρεμβολή τέταρτης τάξης για μετακινήσεις και η αριθμητική ολοκλήρωση αφορά δώδεκα τασικά σημεία. Αυτό έχει όμως σαν επακόλουθο την αύξηση του υπολογιστικού κόστους, την υψηλή κατανάλωση μνήμης και τη βραδεία υπολογιστική και λειτουργική απόδοση.




Σχήμα Α.2: Δεκαπεντακομβικό (α) και εξακομβικό (β) τριγωνικό στοιχείο (κόμβοι και τασικά σημεία).

Όσον αφορά στον καθορισμό των μονάδων του μήκους, της αντοχής και του χρόνου αυτός γίνεται κατά την εισαγωγή των δεδομένων του προβλήματος. Οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενες μονάδες είναι μέτρα (m), kiloNewton (kN) και δευτερόλεπτα (sec) (βλ. σχήμα Α.3). Όλες οι υπόλοιπες τιμές των διαφόρων παραμέτρων που εισάγονται στο πρόγραμμα από το χρήστη στα επόμενα στάδια πρέπει να δίνονται στο ίδιο σύστημα μονάδων.




Σχήμα Α.3: Το φύλλο Dimensions του παραθύρου διαλόγου General settings.

Κατόπιν, ο χρήστης ορίζει τις διαστάσεις της περιοχής σχεδίασης με βάση τις διαστάσεις του εξεταζόμενου μοντέλου, έχοντας πάντα τη δυνατότητα να τις αλλάξει κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας του προσομοιώματος. Η γεωμετρία του μοντέλου δεν επηρεάζεται από τις διαστάσεις της περιοχής σχεδίασης

## Α.2.2 Γεωμετρία προσομοιώματος

Η διαδικασία της διάρθρωσης ενός μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων περιλαμβάνει τη δημιουργία ενός διδιάστατου γεωμετρικού μοντέλου, το οποίο αποτελείται από σημεία, γραμμές και επιφάνειες. Ο χρήστης εισάγει τα σημεία και τις γραμμές ενώ οι επιφάνειες δημιουργούνται ως κλειστά σχήματα από το ίδιο το πρόγραμμα.

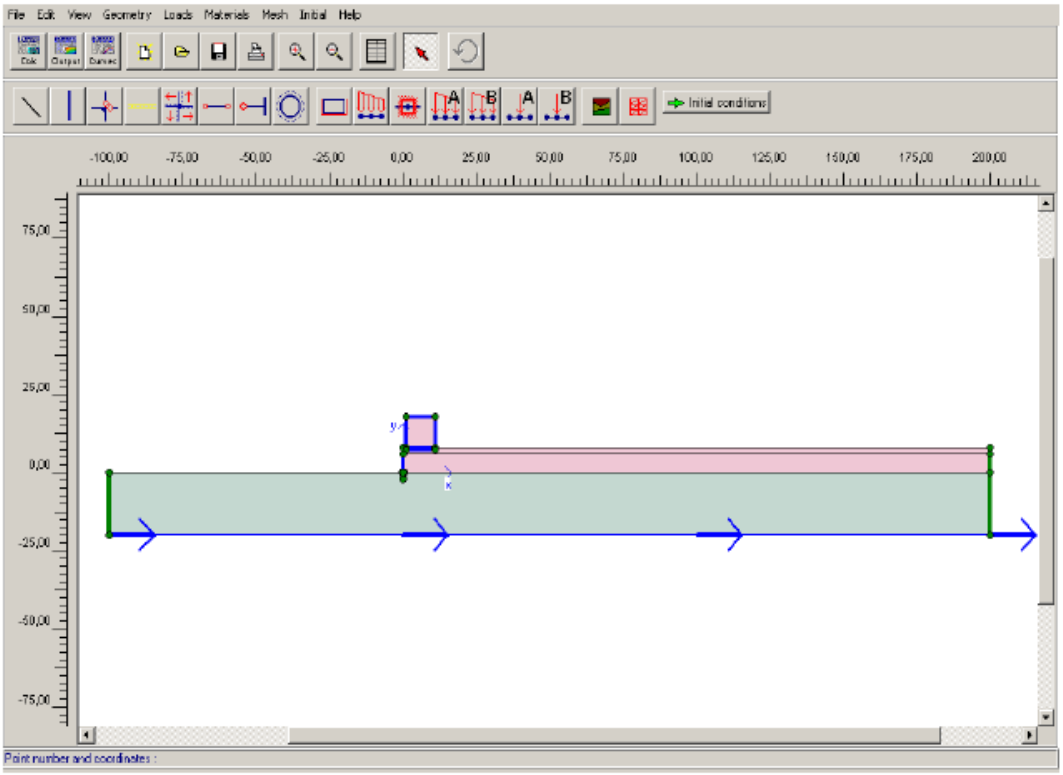
Γενικά, αρχικά σχεδιάζεται το γεωμετρικό περίγραμμα και έπειτα οι εδαφικές στρώσεις, τα δομικά στοιχεία, τα κατασκευαστικά στοιχεία, οι συνοριακές συνθήκες και τέλος οι φορτίσεις. Εκτός από την αρχική κατάσταση, το γεωμετρικό μοντέλο επιβάλλεται να περιλαμβάνει και τα ενδεχόμενα κατασκευαστικά στάδια, τα οποία λαμβάνονται υπόψη σε μετέπειτα φάση της επίλυσης. Μετά τον καθορισμό της γεωμετρίας, είναι δυνατόν να δημιουργηθούν ομάδες δεδομένων χαρακτηριστικών μεγεθών των υλικών και να τοποθετηθεί το κάθε υλικό στον αντίστοιχο γεωμετρικό χώρο. Εφόσον έχει ολοκληρωθεί ο σχεδιασμός της γεωμετρίας, είναι πλέον εφικτή η διακριτοποίηση του μοντέλου με το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων.

## Α.2.3 Φορτία και συνοριακές συνθήκες

Εφόσον ο χρήστης έχει ολοκληρώσει το σχεδιασμό του μοντέλου είναι απαραίτητο να καθορίσει τις συνοριακές συνθήκες. Το υπομενού των φορτίσεων που μπορούν να εφαρμοστούν στο γεωμετρικό πρότυπο, περιλαμβάνει εκτός από τις επιλογές που αφορούν στα φορτία και τις επιλογές που αφορούν στις προδιαγεγραμμένες μετατοπίσεις.

Όσο αφορά στις φορτίσεις του εξεταζόμενου μοντέλου, ο χρήστης έχει δύο επιλογές: την επιβολή επιφανειακής φόρτισης (κατανεμημένο φορτίο) ή την επιβολή σημειακής φόρτισης (σημειακή αντοχή). Στην πρώτη περίπτωση οι τιμές των τάσεων εισάγονται σε μονάδες τάσης (π.χ. $kN/m^2$) και η εφαρμογή τους γίνεται σε γεωμετρικά όρια του προτύπου (γραμμές). Στη δεύτερη περίπτωση οι τιμές των φορτίσεων εισάγονται σε μονάδες αντοχής/μήκος (π.χ. kN/m) και η εφαρμογή τους γίνεται σε σημεία της γεωμετρίας του προτύπου.

Όσο αφορά στις επιβαλλόμενες μετατοπίσεις στο εξεταζόμενο μοντέλο, αυτές αποτελούν ειδικές συνθήκες που μπορεί να επιβληθούν από το χρήστη σε τμήματα των συνόρων του γεωμετρικού προτύπου στα οποία αυτός επιθυμεί οι μετατοπίσεις να είναι ελεγχόμενες. Κατά τη διάρκεια των υπολογισμών που κάνει το λογισμικό PLAXIS προσδιορίζονται οι αντιδράσεις των στηρίξεων που αντιστοιχούν στις επιβαλλόμενες παραμορφώσεις κατά τις διευθύνσεις x και y και δίνονται στα αποτελέσματα της επίλυσης του προσομοιώματος. Στο Σχήμα Α.4 απεικονίζεται ένα από τα εξεταζόμενα προσομοιώματα της παρούσας εργασίας, εφόσον έχει ολοκληρωθεί η σχεδίασή του και έχουν καθοριστεί οι συνοριακές συνθήκες.




Σχήμα Α.4: Ορισμός γεωμετρίας και συνοριακών συνθηκών.

## Α.2.4 Ιδιότητες υλικών

Αφού ολοκληρωθεί το μοντέλο από πλευράς γεωμετρίας, η διαδικασία της επίλυσης συνεχίζεται με τον καθορισμό των ιδιοτήτων των υλικών. Αυτό επιτυγχάνεται με την επιλογή Material Sets από τη γραμμή εργαλείων με αποτέλεσμα την εμφάνιση ενός παράθυρου το οποίο περιέχει τη βάση δεδομένων των υλικών. Στο λογισμικό PLAXIS, οι ιδιότητες των εδαφών και των υλικών αποθηκεύονται σε μία υπάρχουσα βάση δεδομένων την οποία ο ίδιος ο χρήστης μπορεί να εμπλουτίσει με τη δημιουργία υλικών με νέα χαρακτηριστικά. Δηλαδή υπάρχει η δυνατότητα να δημιουργηθούν υλικά με νέα χαρακτηριστικά ή να χρησιμοποιηθούν τα ήδη υπάρχοντα υλικά, που έχουν εφαρμοστεί στα παραδείγματα του προγράμματος, από τον υποφάκελο 'Global' που τα περιέχει. Τα νέα δημιουργηθέντα υλικά μπορούν να αποθηκευτούν στον υποφάκελο 'Global' και να χρησιμοποιηθούν σε οποιαδήποτε μελλοντική επίλυση.

Όπως, φαίνεται στο Σχήμα Α.5 οι ιδιότητες των υλικών είναι αποθηκευμένες σε ομάδες δεδομένων υλικών. Υπάρχουν 4 ομάδες δεδομένων, οι οποίες εμφανίζονται επιλέγοντας τη παράμετρο Set type :

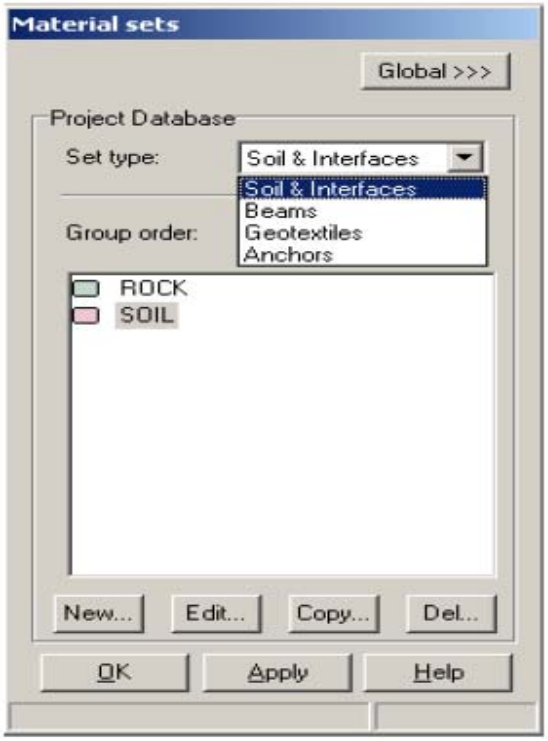
1) δεδομένα για εδάφη και διεπιφάνειες,

2) δεδομένα για δοκούς,

3) δεδομένα για γεωυφάσματα,

4) δεδομένα για αγκύρια.

Από τη βάση δεδομένων αυτή, οι ιδιότητες αντιστοιχίζονται στα εδαφικά στρώματα που ορίζονται σαν κλειστά γεωμετρικά σχήματα ή σε διάφορα άλλα στοιχεία (π.χ. τοίχοι) του γεωμετρικού προτύπου.

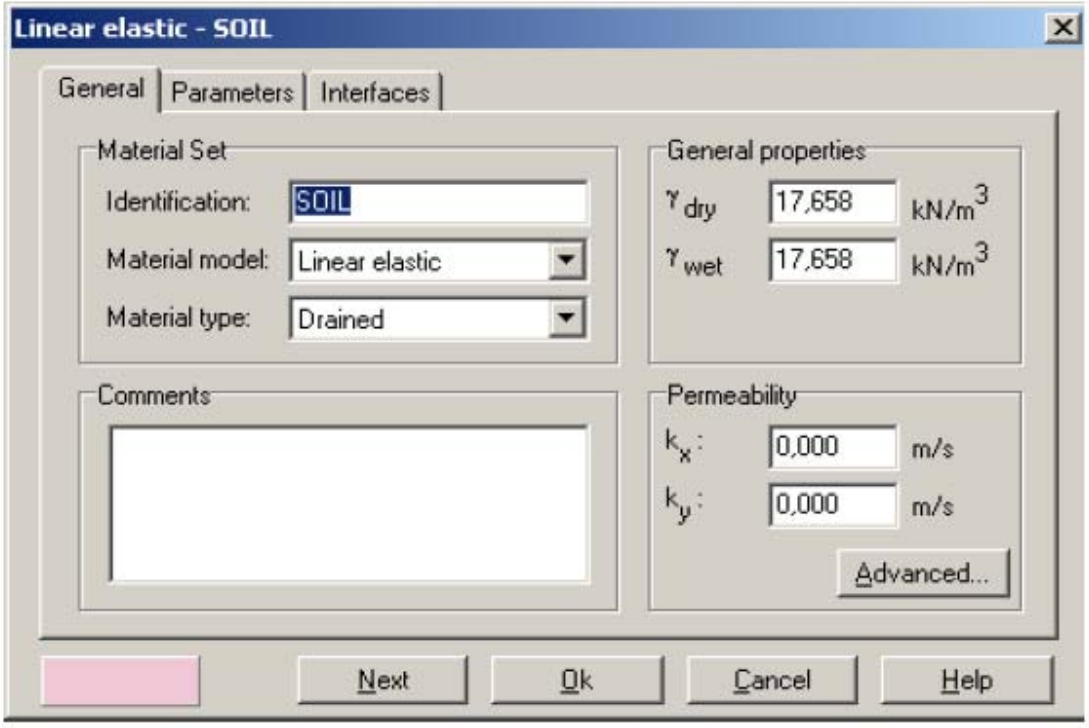



Σχήμα Α.5: Ομάδες δεδομένων υλικών.

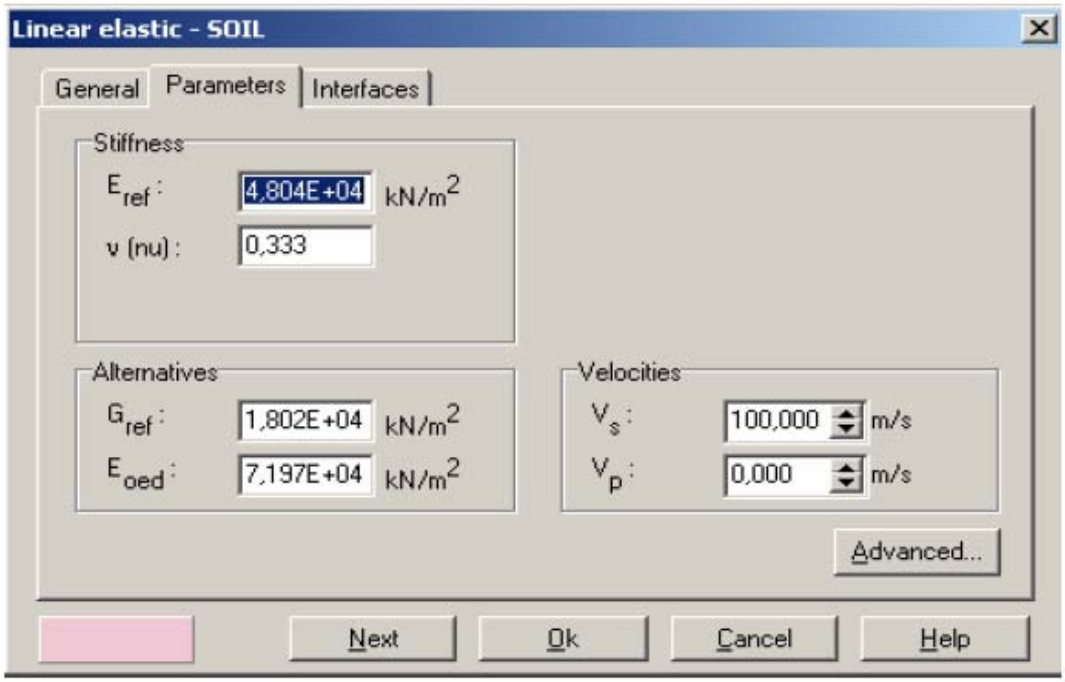
Η εισαγωγή των ιδιοτήτων και των παραμέτρων των υλικών που εισήχθησαν στο μοντέλο γίνεται σε ξεχωριστό παράθυρο διαλόγου. Για καθένα από τα χρησιμοποιηθέντα υλικά εισάγεται μία ομάδα ιδιοτήτων. Τα χαρακτηριστικά στη βάση δεδομένων για κάθε εδαφικό υλικό χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες: στα γενικά χαρακτηριστικά, στις παραμέτρους του υλικού και στις παραμέτρους των διεπιφανειών. Τα γενικά χαρακτηριστικά αφορούν τον τύπο του εδαφικού προτύπου, τον τύπο της εδαφικής συμπεριφοράς και τις γενικές εδαφικές ιδιότητες όπως είναι τα φαινόμενα βάρη και η διαπερατότητα. Όσον αφορά στο μοντέλο του εδαφικού υλικού, το PLAXIS υποστηρίζει διάφορα μοντέλα που προσομοιάζουν τη συμπεριφορά των εδαφών. Τα χαρακτηριστικά στη βάση δεδομένων για τα δομικά υλικά (πχ. τοίχοι) αφορούν τον τύπο του δομικού υλικού, τον τύπο της συμπεριφοράς του υλικού και τις γενικές ιδιότητες του υλικού όπως είναι η δυσκαμψία και η ελαστικότητα. Όσον αφορά στο μοντέλο

του δομικού υλικού, το PLAXIS –όπως και για τα εδαφικά υλικά– υποστηρίζει διάφορα μοντέλα που προσομοιάζουν τη συμπεριφορά των δομικών υλικών.

Στο Σχήμα Α.6 φαίνεται το παράθυρο διαλόγου όπου εισάγονται τα γενικά χαρακτηριστικά ενός εδαφικού υλικού ενώ στο Σχήμα Α.7 φαίνεται το παράθυρο διαλόγου όπου εισάγονται οι παράμετροι του ίδιου εδαφικού υλικού.




Σχήμα Α.6: Παράθυρο εισαγωγής γενικών χαρακτηριστικών υλικού.




Σχήμα Α.7: Παράθυρο εισαγωγής των παραμέτρων υλικού.

Στην παρούσα εργασία για τη δυναμική ανάλυση των προσομοιωμάτων χρησιμοποιήθηκε το γραμμικά ελαστικό μοντέλο. Το μοντέλο αυτό αντιπροσωπεύει το νόμο του Hooke για ισότροπη γραμμική ελαστικότητα. Περιλαμβάνει δύο ελαστικές παραμέτρους, όπως φαίνεται και από το Σχήμα Α.7, το μέτρο ελαστικότητας Young (E) και τον λόγο Poisson (ν). Το γραμμικά ελαστικό μοντέλο έχει πολύ περιορισμένη εφαρμογή σε εδάφη για ανάλυση υπό στατικές συνθήκες και χρησιμοποιείται κυρίως για άκαμπτες συμπαγείς κατασκευές στο έδαφος. Όμως, είναι το πλέον κατάλληλο από τα μοντέλα που διαθέτει το πρόγραμμα PLAXIS για τις αναλύσεις προσομοιωμάτων υπό δυναμικές συνθήκες φορτίσεις.

## Α.2.5 Δημιουργία πλέγματος στοιχείων

Εφόσον έχει ολοκληρωθεί ο καθορισμός της γεωμετρίας του μοντέλου και για να πραγματοποιηθούν οι απαραίτητοι υπολογισμοί με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, επιβάλλεται η διακριτοποίηση του γεωμετρικού προτύπου με τη δημιουργία κατάλληλου κάναβου (mesh), η αναπαραγωγή του οποίου πραγματοποιείται αυτόματα από το PLAXIS με βάση τα δεδομένα του γεωμετρικού μοντέλου. Η δημιουργία του κανάβου ξεκινά με την επιλογή του Generate Mesh από την γραμμή εργαλείων ή από το υπομενού Mesh επιλέγοντας την εντολή Generate. Η διαδικασία αυτή βασίζεται στην τριγωνοποίηση της επιφάνειας του προτύπου. Τέτοιου είδους δίκτυα στοιχείων πιθανόν να φαίνονται «ακατάστατα». Ωστόσο, είναι γεγονός ότι η αριθμητική τους

συμπεριφορά είναι γενικά καλύτερη από αυτή των δικτυωμάτων που κατασκευάζονται από το χρήστη.

Η δημιουργία του δικτυώματος των Πεπερασμένων Στοιχείων γίνεται με βάση έναν παράγοντα που αντιπροσωπεύει το μέσο πλάτος κάθε τριγωνικού στοιχείου $l_e$. Στο λογισμικό PLAXIS η παράμετρος αυτή υπολογίζεται με βάση τις εξωτερικές διαστάσεις του γεωμετρικού προτύπου ($x_{min}$, $x_{max}$, $y_{min}$, $y_{max}$) και δίνεται από την σχέση Α.1:

$$l_e = \sqrt{\frac{(x_{\max} - x_{\min})(y_{\max} - y_{\min})}{n_c}}$$

όπου:

$l_e$ , το μέσο πλάτος κάθε τριγωνικού στοιχείου,

$n_c$ αριθμός που αντιπροσωπεύει την πυκνότητα του δικτύου που χρησιμοποιείται για τη διακριτοποίηση του εξεταζόμενου μοντέλου,

xmax, xmin, ymax, ymin οι εξωτερικές διαστάσεις του γεωμετρικού προτύπου.

Υπάρχει δυνατότητα επιλογής στο input program ανάμεσα σε πέντε επίπεδα πύκνωσης του κανάβου πεπερασμένων στοιχείων. Τα επίπεδα αυτά είναι τα εξής: πολύ αραιό, αραιό, μέσης πυκνότητας, πυκνό και πολύ πυκνό. Το μέσο μέγεθος των στοιχείων και ο αριθμός των στοιχείων του δικτυώματος εξαρτάται από τη ρύθμιση της ολικής πυκνότητας του δικτυώματος που επιλέγει ο χρήστης.

Μια πρόχειρη εκτίμηση για τη διακριτοποίηση μιας περιοχής 20m x 20m με τη δημιουργία δικτύου πεπερασμένων στοιχείων χωρίς τοπική πύκνωση δίνεται στον Πίνακα Α.1.

| **Πυκνότητα πλέγματος στοιχείων** | **Αριθμός στοιχείων (κατά προσέγγιση)** | **$n_c$** |
|---|---|---|
| Πολύ αραιό | 50 | 25 |
| Αραιό | 100 | 50 |
| Μέσης Πυκνότητας | 250 | 100 |
| Πυκνό | 500 | 200 |
| Πολύ πυκνό | 1000 | 400 |

Πίνακας Α.1: Σχέση μεταξύ πυκνότητας πλέγματος στοιχείων και αριθμού στοιχείων.

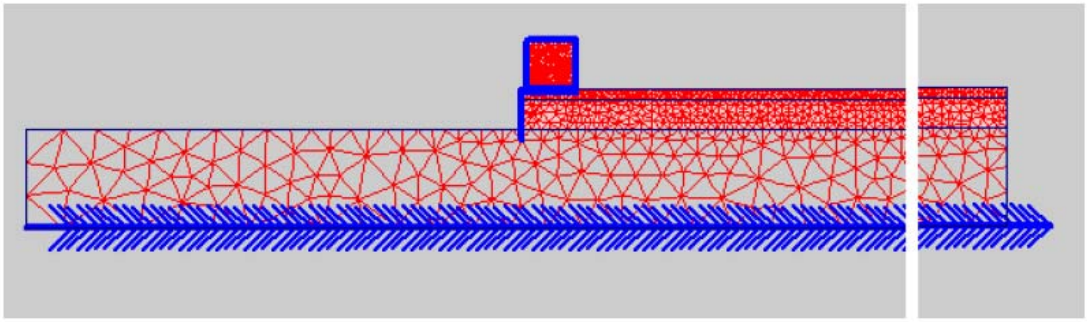
Ωστόσο, το λογισμικό PLAXIS παρέχει στο χρήστη τη δυνατότητα περαιτέρω πύκνωσης του δικτύου όπου αυτό κρίνεται σκόπιμο από αυτόν, πχ. σε περιοχές όπου υπάρχει μεγάλη συγκέντρωση τάσεων ή αναμένονται μεγάλες παραμορφώσεις. Για τις περιπτώσεις αυτές το PLAXIS χρησιμοποιεί, σε συνδυασμό με τις παραμέτρους ολικής πύκνωσης, παραμέτρους τοπικής

πύκνωσης. Ο παράγοντας τοπικής πύκνωσης δίνει μία ένδειξη του σχετικού μεγέθους των στοιχείων (τοπικά) σε σχέση με το μέσο μέγεθος των στοιχείων όπως αυτό έχει οριστεί από την παράμετρο ολικής πυκνότητας. Εξ' ορισμού, ο συντελεστής τοπικού μεγέθους των στοιχείων έχει την τιμή 1.0. Για τη μείωση του μεγέθους ενός στοιχείου στο μισό, η τιμή του τοπικού συντελεστή μεγέθους των στοιχείων ορίζεται στο 0.5. Το εύρος τιμών του συντελεστή αυτού είναι από 0.2 έως 5.0. Αντίστοιχα, εάν η τιμή του συντελεστή έχει τιμή μεγαλύτερη από 1.0 τότε προκαλείται τοπική αραίωση του δικτύου.

Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιήθηκαν γενικά πυκνά πλέγματα, κυρίως για την ανώτερη εδαφική στρώση που υπέρκειται του βραχώδους υπόβαθρου (βλέπε σχήμα Α.8), έτσι ώστε τα αποτελέσματα να έχουν τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια. Γενικά εφαρμόσθηκε ο ευρέως αποδεκτός εμπειρικός κανόνας των 3 έως 5 πεπερασμένων στοιχείων ανά μήκος κύματος. Ως γνωστόν το μήκος κύματος για μία εδαφική στρώση υπολογίζεται προσεγγιστικά από την ακόλουθη σχέση:

$$\lambda = \frac{4V_s}{H} \qquad \text{(A.2)}$$

όπου: *Vs* είναι η ταχύτητα διάδοσης των διατμητικών κυμάτων μέσα στην κάθε στρώση και είναι το μέσο ύψος της. Οπότε, επειδή η εδαφική στρώση που υπέρκειται του βραχώδους υπόβαθρου είχε πολύ μικρότερο *Vs* από το βραχώδες υπόβαθρο, θεωρήθηκε σωστό να γίνει αύξηση της πυκνότητας του δικτύου των πεπερασμένων στοιχείων στην ανώτερη εδαφική στρώση.



Σχήμα Α.8: Δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων του τελικού προσομοιώματος.

## Α.2.6 Αρχικές συνθήκες

Αφού ολοκληρωθεί η δημιουργία του γεωμετρικού μοντέλου και πραγματοποιηθεί η διακριτοποίηση των πεπερασμένων στοιχείων, πρέπει να καθοριστεί η αρχική κατάσταση και το αρχικό εντατικό καθεστώς (Initial Conditions). Αυτό γίνεται στο τμήμα ορισμού των αρχικών συνθηκών του προγράμματος εισαγωγής δεδομένων. Οι αρχικές συνθήκες εμπεριέχουν δύο εφαρμογές:

α) μια για τη δημιουργία των αρχικών πιέσεων του νερού των πόρων (water conditions mode),

β) μια για τον προσδιορισμό της διαμόρφωσης της αρχικής γεωμετρίας του προτύπου και της δημιουργίας του πεδίου των αρχικών ενεργών γεωστατικών τάσεων (geometry configuration mode).

Η μετάβαση από τη μία εφαρμογή στην άλλη λαμβάνει χώρα με τη βοήθεια της επιλογής Switch της γραμμής εργαλείων. Οι αρχικές συνθήκες επιτρέπουν και επιστροφή στα δεδομένα του γεωμετρικού μοντέλου, αλλά γενικά αυτό δεν προτιμάται διότι μπορεί να χαθούν κάποιες πληροφορίες που αφορούν στις αρχικές συνθήκες.
Η δημιουργία αρχικών τάσεων 'Initial stress generation' ($K_o$-procedure) περιλαμβάνει τον υπολογισμό των αρχικών τάσεων του εδαφικού προφίλ, οι οποίες επηρεάζονται από το βάρος του υλικού και το ιστορικό του σχηματισμού του. Αυτό το καθεστώς των τάσεων συνήθως χαρακτηρίζεται από τις αρχικές κατακόρυφες τάσεις $\sigma_{vo}$. Οι αρχικές οριζόντιες τάσεις σχετίζονται με τις κατακόρυφες μέσω του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων $K_o$ ως εξής:

$$\sigma_{ho} = K_o * \sigma_{vo} \qquad (A.3)$$

Στο πρόγραμμα PLAXIS οι αρχικές τάσεις δύναται να αναπαραχθούν καθορίζοντας το συντελεστή $K_o$ ή χρησιμοποιώντας την επιλογή 'Gravity loading'. Η αναπαραγωγή τους μέσω του συντελεστή $K_o$ πραγματοποιείται με την επιλογή Generate Initial stresses (κόκκινοι σταυροί) της γραμμής εργαλείων ή επιλέγοντας 'Initial stresses' από το υπομενού 'Generate' αφού πρώτα απενεργοποιηθούν όλα τα δομικά στοιχεία πχ. τοίχοι αντιστήριξης διότι αυτά τα στοιχεία δεν υπάρχουν στην αρχική κατάσταση.

## A.3 Υποπρόγραμμα υπολογισμών (calculations)

Μετά τη δημιουργία του μοντέλου των πεπερασμένων στοιχείων ακολουθεί η εκτέλεση της υπολογιστικής διαδικασίας δηλαδή της ανάλυσης του μοντέλου. Για αυτόν τον λόγο πρέπει να οριστεί ο τύπος της ανάλυσης καθώς επίσης και οι τύποι των φορτίσεων που θα ενεργοποιηθούν κατά τη διάρκειά της. Το πρόγραμμα 'Calculations' λαμβάνει υπόψη μόνο αναλύσεις παραμορφώσεων. Στο πρόγραμμα PLAXIS η υπολογιστική διαδικασία χωρίζεται σε διάφορες φάσεις υπολογισμού, όπως η ενεργοποίηση ενός συγκεκριμένου συστήματος φόρτισης, η προσομοίωση ενός κατασκευαστικού σταδίου, η εισαγωγή μιας περιόδου στερεοποίησης, ο υπολογισμός ενός συντελεστή ασφάλειας κτλ. Κάθε υπολογιστική φάση κατά κανόνα χωρίζεται σε ένα πλήθος βημάτων επίλυσης γεγονός που είναι απαραίτητο αφού η μη-γραμμική συμπεριφορά του εδάφους προϋποθέτει την εφαρμογή των φορτίσεων σε μικρές αναλογίες. Στις

περισσότερες περιπτώσεις παρόλα αυτά αρκεί ο καθορισμός της τελικής κατάστασης.

## Α.3.1 Ορισμός μια νέας φάσης υπολογισμών

Αρχικά πριν από τον καθορισμό των φάσεων υπολογισμού από το χρήστη, υφίσταται μόνο μια αρχική φάση (Initial Phase), η οποία αντιπροσωπεύει την αρχική κατάσταση του προβλήματος όπως αυτή έχει καθοριστεί κατά την αρχική φάση εισαγωγής δεδομένων στο πρόγραμμα 'Input'. Η αρχική φάση 'Initial Phase' αποτελεί το σημείο έναρξης των περαιτέρω υπολογισμών.

Η εισαγωγή μιας πρώτης υπολογιστικής φάσης πραγματοποιείται με την επιλογή του πλήκτρου 'Next' οπότε και εμφανίζεται μία νέα γραμμή πληροφοριών που αφορά τη νέα αυτή φάση, 'Phase 1'. Μετά την εισαγωγή της η φάση αυτή πρέπει να οριστεί. Τα χαρακτηριστικά της φάσεως καθορίζονται με την χρήση τριών διαφορετικών φύλλων που περιέχει το παράθυρο διαλόγου του υποπρογράμματος υπολογισμών και τα οποία αναφέρονται στα γενικά χαρακτηριστικά της φάσης (φύλλο General), τις παραμέτρους της (φύλλο Parameters) και τους ''πολλαπλασιαστές'' (φύλλο Multipliers).

## Α.3.2 Γενικές ρυθμίσεις

Το φύλλο 'General' (βλ. Σχήμα Α.9) χρησιμοποιείται για τον καθορισμό των γενικών ρυθμίσεων μίας δεδομένης φάσης υπολογισμού, οι οποίες διαχωρίζονται σε τρεις κατηγορίες:

α) Τύπος επίλυσης

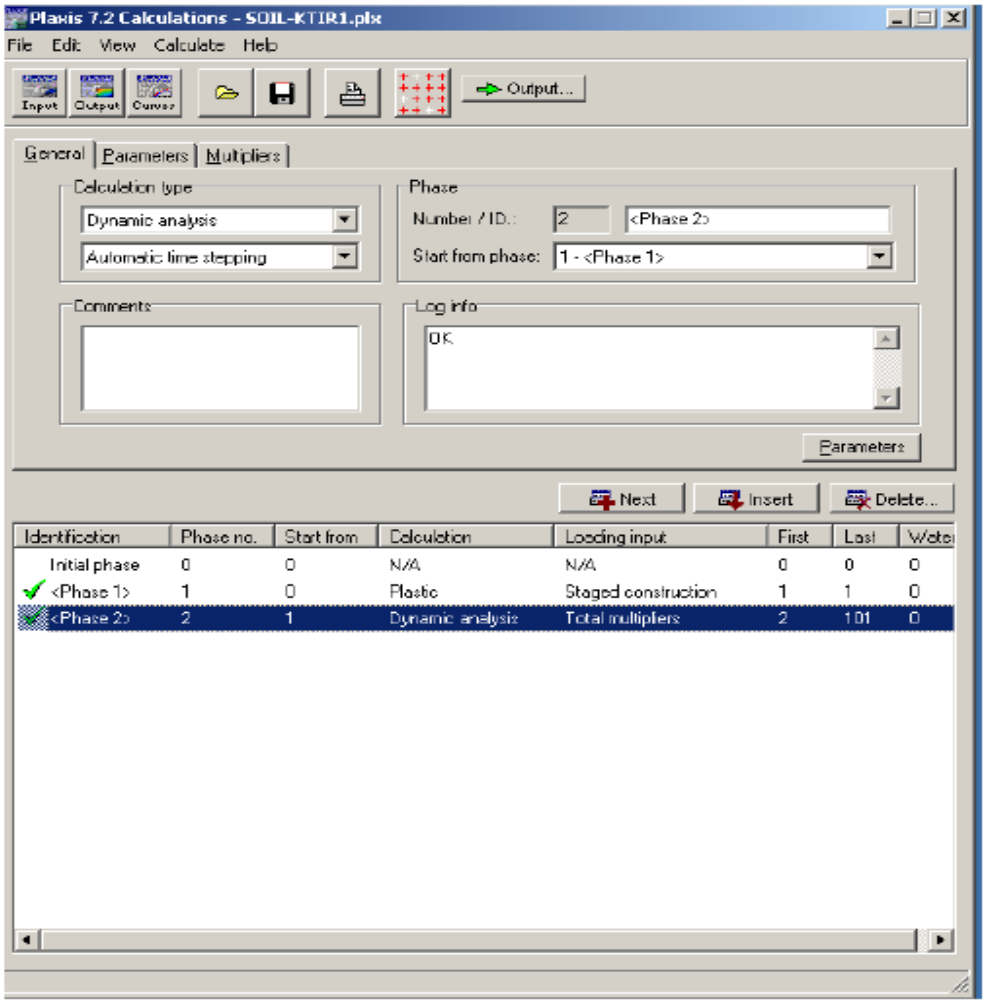
Στο σημείο αυτό επιλέγεται ο τύπος της επίλυσης με βάση τον οποίο θα γίνουν οι υπολογισμοί.

β) Φάση

Εδώ προσδιορίζεται η θέση της συγκεκριμένης υπολογιστικής φάσης στη διαδικασία της ανάλυσης του μοντέλου δηλαδή καθορίζεται η αλληλουχία σύμφωνα με την οποία οι φάσεις θα πραγματοποιηθούν. Αυτό γίνεται επιλέγοντας για κάθε φάση την προηγούμενή της, το τέλος της οποίας αποτελεί την έναρξη της ίδιας.

γ) Σχόλια και πληροφορίες

Υπάρχει ένα πλαίσιο κειμένου όπου μπορούν να αποθηκευτούν από το χρήστη, αν το επιθυμεί, διάφορες πληροφορίες σχετικές με οποιαδήποτε από τις υπολογιστικές φάσεις καθώς και ένα άλλο πλαίσιο όπου αναγράφονται από το λογισμικό PLAXIS οι πληροφορίες που προκύπτουν κατά τη διάρκεια της επίλυσης, όπως για παράδειγμα σφάλματα που εμφανίζονται κατά τη διάρκεια της επίλυσης της φάσης.




Σχήμα A.9: Το φύλλο General του παραθύρου διαλόγου των υπολογισμών.

## A.3.3 Τύποι επίλυσης

Η πρώτη παράμετρος που ορίζεται αμέσως μετά τη δημιουργία μίας νέας φάσης υπολογισμών είναι ο τύπος της επίλυσης. Το PLAXIS έχει τη δυνατότητα των εξής τύπων επιλύσεων:

α) στατικής ανάλυσης της πλαστικής συμπεριφοράς (plastic calculation),

β) ανάλυσης στερεοποίησης (consolidation analysis),

γ) ανάλυσης «διακριτοποιημένου κανάβου» (updated mesh analysis),

δ) δυναμικής ανάλυσης (dynamic analysis).

Πλαστική ανάλυση (Plastic calculation)

Η διαδικασία της πλαστικής ανάλυσης επιλέγεται σε περίπτωση ανάλυσης ελαστοπλαστικών παραμορφώσεων όπου δεν είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψη αποτελέσματα μεγάλων παραμορφώσεων. Το μητρώο δυσκαμψίας σε αυτή την περίπτωση βασίζεται στο αρχικό, μη παραμορφωμένο γεωμετρικό μοντέλο. Η ανάλυση αυτή δεν λαμβάνει υπόψη της την επίδραση του χρόνου (στατικές συνθήκες φόρτισης), εκτός από την περίπτωση που χρησιμοποιείται το μοντέλο ερπυσμού μαλακού εδάφους (soft soil creep model). Αυτός ο τύπος της ανάλυσης χρησιμοποιείται σε πολλές γεωμετρικές εφαρμογές.

Ανάλυση Στερεοποίησης (Consolidation analysis)

Η ανάλυση στερεοποίησης επιλέγεται στην περίπτωση που είναι απαραίτητη η ανάλυση της ανάπτυξης και της εκτόνωσης των πρόσθετων πιέσεων του νερού των πόρων σε κορεσμένα αργιλώδη εδάφη σε συνάρτηση με το χρόνο. Το πρόγραμμα PLAXIS επιτρέπει την εφαρμογή πραγματικής ανάλυσης ελαστοπλαστικής στερεοποίησης. Γενικά μία ανάλυση στερεοποίησης δίχως επιπρόσθετη φόρτιση εκτελείται μετά το πέρας των υπολογισμών μιας αστράγγιστης πλαστικής ανάλυσης. Είναι επίσης δυνατή η εφαρμογή φορτίων κατά τη διάρκεια μιας ανάλυσης στερεοποίησης αλλά υπάρχουν περιορισμοί σε ότι αφορά στους τύπους των φορτίσεων που μπορούν να εφαρμοστούν (περίπτωση σταδιακής κατασκευής ‘Staged Construction’).

Ανάλυση διακριτοποιημένου κανάβου (Updated mesh analysis)

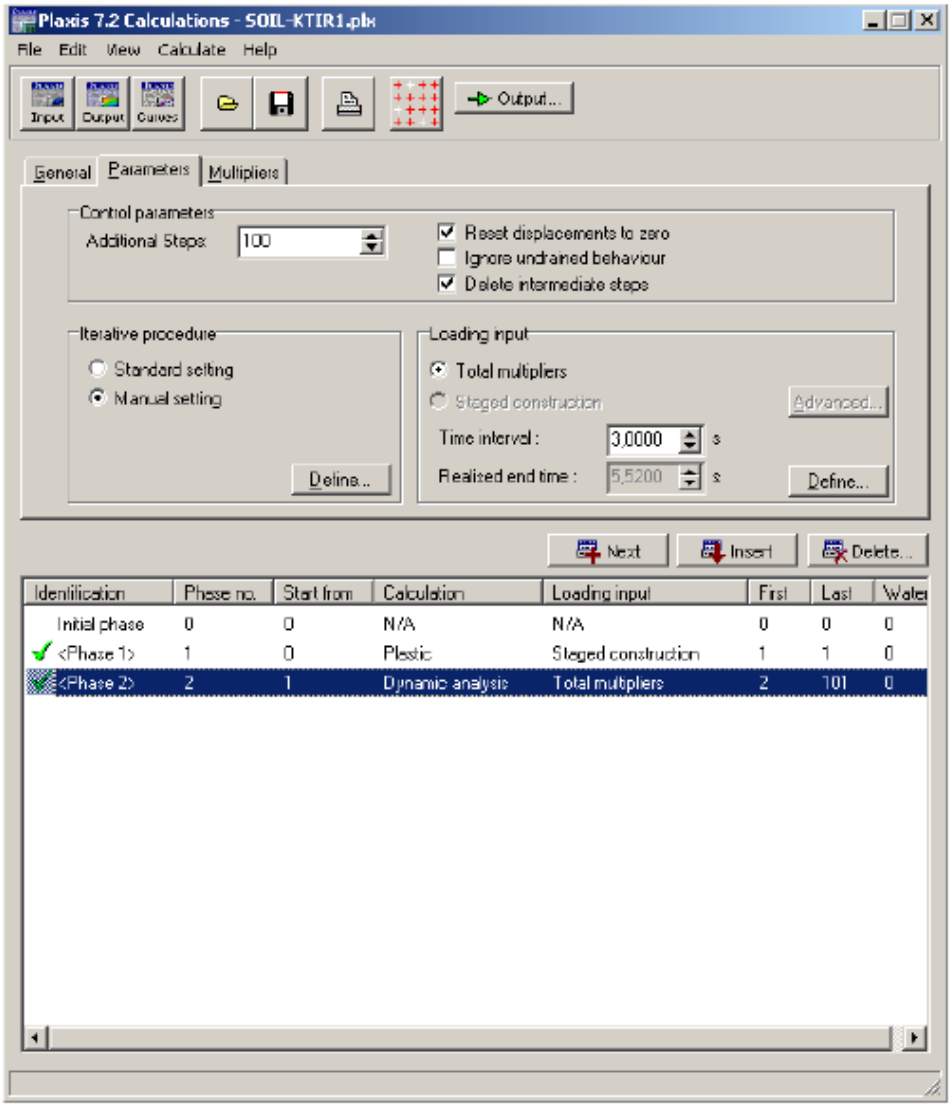
Η ανάλυση διακριτοποιημένου κανάβου αποτελεί μια πλαστική διαδικασία υπολογισμού η οποία λαμβάνει υπόψη τις συνέπειες μεγάλων παραμορφώσεων. Αυτός ο τύπος υπολογισμού θα πρέπει να μελετάται όταν οι παραμορφώσεις αναμένεται να επηρεάσουν σημαντικά τη μορφή του γεωμετρικού μοντέλου. Το μητρώο δυσκαμψίας σε αυτή την περίπτωση βασίζεται στο παραμορφωμένο γεωμετρικό μοντέλο. Στις περισσότερες εφαρμογές οι συνέπειες μεγάλων παραμορφώσεων είναι αμελητέες και μία κανονική πλαστική ανάλυση θεωρείται επαρκής. Παρόλα αυτά σε ορισμένες περιπτώσεις θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη. Τυπικές εφαρμογές αποτελούν η ανάλυση ενισχυμένων εδαφικών κατασκευών (tension stiffening effect), η ανάλυση φορτίου κατάρρευσης μεγάλων παραθαλάσσιων θεμελιοδομών και η μελέτη προβλημάτων που αφορούν μαλακά εδάφη στα οποία είναι πιθανή η εμφάνιση μεγάλων παραμορφώσεων.

Δυναμική ανάλυση (Dynamic analysis)

Η διαδικασία αυτή επιλέγεται με σκοπό την πραγματοποίηση μιας δυναμικής ανάλυσης του εξεταζόμενου προσομοιώματος. Η ανάλυση αυτή χρησιμοποιείται κυρίως για γεωτεχνικές κατασκευές όταν αυτές υπόκεινται σε σεισμική καταπόνηση. Ακόμα, τέτοιες αναλύσεις χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των αναπτυσσομένων επιταχύνσεων και αδρανειακών δυνάμεων σε όλο τον όγκο των κατασκευών που βρίσκονται στην εδαφική τομή που μελετάται.

## Α.3.4 Παράμετροι υπολογισμών

Το φύλλο 'Parameters' (βλ. Σχήμα Α.10) χρησιμοποιείται για τον καθορισμό των παραμέτρων ελέγχου μιας συγκεκριμένης υπολογιστικής φάσης και περιέχει τις ακόλουθες επιλογές:




Σχήμα Α.10: Το φύλλο Parameters του παραθύρου διαλόγου των υπολογισμών.

### A.3.4.1 Παράμετροι ελέγχου (Control parameters)

Επιπρόσθετα βήματα υπολογισμού (Additional steps)

Η παράμετρος αυτή καθορίζει το πλήθος των υπολογιστικών βημάτων που πραγματοποιούνται σε μία συγκεκριμένη υπολογιστική φάση. Στην περίπτωση της επιλογής 'Manual Control' ο αριθμός των επιπρόσθετων βημάτων είναι πάντα ίσος με τη μονάδα, γεγονός που σημαίνει ότι η υπολογιστική φάση θα πραγματοποιηθεί σε ένα μόνο βήμα. Στην περίπτωση της επιλογής 'Load Advancement Number of Steps' ο αριθμός των επιπρόσθετων βημάτων ορίζεται ως ένας ακέραιος αριθμός που αντιστοιχεί στα απαιτούμενα βήματα φόρτισης για τη δεδομένη φάση υπολογισμών. Ως αρχικό πλήθος επιπρόσθετων βημάτων καθορίζεται η τιμή 30, η οποία μπορεί να μεταβληθεί από το 1 έως το 100. Στην περίπτωση της επιλογής 'Load Advancement Ultimate Level' ο αριθμός των επιπρόσθετων βημάτων αποτελεί το άνω όριο του πλήθους των βημάτων που θα πραγματοποιηθούν για την επίλυση. Η προεπιλεγμένη ανώτατη τιμή αυτής της παραμέτρου είναι ίση με 100 και είναι δυνατό να μειωθεί.

Μηδενισμός μετακινήσεων (Reset displacements to zero)

Ο μηδενισμός των μετακινήσεων πραγματοποιείται όταν επιδιώκεται να μη ληφθούν υπόψη μη σχετικές επιλύσεις προηγούμενων υπολογιστικών βημάτων στην έναρξη της συγκεκριμένης υπολογιστικής φάσης, έτσι ώστε η καινούρια επίλυση να ξεκινά από καθεστώς μηδενικών μετακινήσεων. Η ρύθμιση αυτή επιλέγεται από το χρήστη όταν οι παραμορφώσεις που προέκυψαν σε προηγούμενα στάδια υπολογισμών δεν ενδιαφέρουν και άρα πρέπει να αγνοηθούν κατά την έναρξη της δεδομένης υπολογιστικής φάσης, έτσι ώστε αυτή να ξεκινά από μία κατάσταση μηδενικών παραμορφώσεων. Σε περίπτωση που δεν επιλεγεί η ρύθμιση αυτή από το χρήστη, οι παραμορφώσεις που προκύπτουν στη δεδομένη φάση υπολογισμών προστίθενται σε αυτές της προηγούμενης φάσης. Σημειώνεται ότι ο μηδενισμός των παραμορφώσεων δεν επηρεάζει το εντατικό πεδίο του προτύπου.

Παράβλεψη αστράγγιστης συμπεριφοράς (Ignore undrained behaviour)

Η παράβλεψη αστράγγιστης συμπεριφοράς επιλέγεται στην περίπτωση που είναι επιθυμητός ο προσωρινός αποκλεισμός των συνεπειών αστράγγιστων γεωμετρικών χώρων του εδαφικού μοντέλου. Ως αποτέλεσμα όλοι οι αστράγγιστοι γεωμετρικοί χώροι γίνονται προσωρινά στραγγιζόμενοι. Η υπάρχουσα περίσσεια πίεση των πόρων, η οποία δημιουργήθηκε σε προηγούμενο στάδιο παραμένει, ενώ στη συγκεκριμένη υπολογιστική φάση δε θα αναπαραχθούν επιπλέον πρόσθετες πιέσεις του νερού των πόρων.

Διαγραφή ενδιάμεσων βημάτων (Delete intermediate steps)

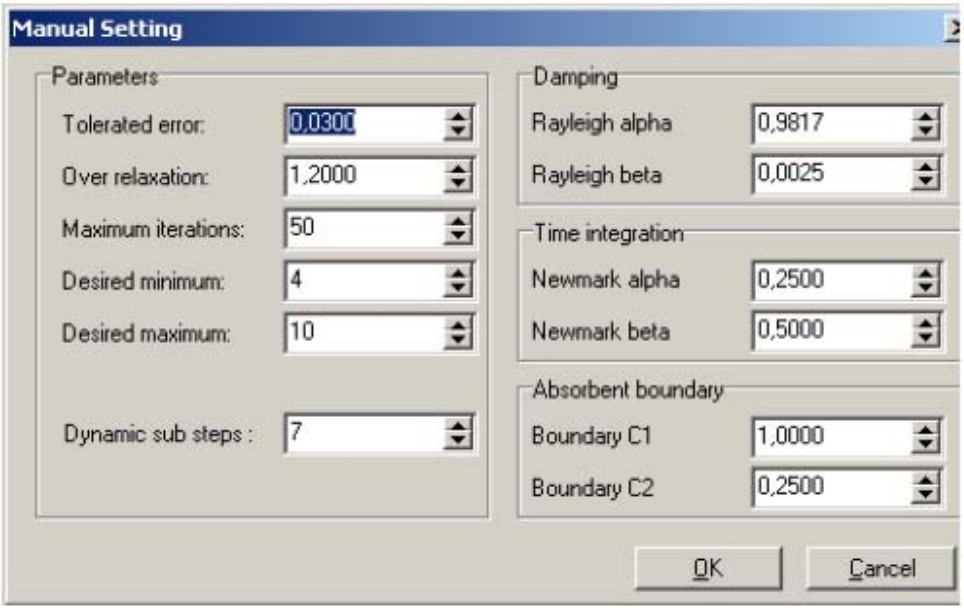
Η διαγραφή των ενδιάμεσων βημάτων επιλέγεται για λόγους οικονομίας της χωρητικότητας του σκληρού δίσκου του υπολογιστή. Με την επιλογή αυτή διαγράφονται όλα τα επιπλέον βήματα της υπολογιστικής φάσης, εκτός φυσικά από το τελευταίο, εφόσον η φάση ολοκληρωθεί επιτυχώς. Γενικά, το τελευταίο βήμα υπολογισμών περιέχει τα πιο σημαντικά αποτελέσματα για τη δεδομένη φάση, ενώ τα ενδιάμεσα βήματα είναι λιγότερο σημαντικά γι' αυτό και η διαγραφή τους δεν επηρεάζει ουσιαστικά την επίλυση.

### Α.3.4.2 Παράμετροι ελέγχου επαναληπτικής διαδικασίας (Iterative procedure)

Το PLAXIS παρέχει στο χρήστη τη δυνατότητα δύο επιλογών, την επιλογή ρυθμίσεων της επαναληπτικής διαδικασίας από το ίδιο το πρόγραμμα ή την επιλογή ρυθμίσεων της επαναληπτικής διαδικασίας από τον ίδιο το χρήστη.

Ρυθμίσεις καθορισμένες από το πρόγραμμα (Standard settings)

Οι ρυθμίσεις αυτές καθορίζονται από το λογισμικό PLAXIS και φαίνεται να λειτουργούν αρκετά καλά στις περισσότερες επαναληπτικές διαδικασίες




Σχήμα Α.11: Το παράθυρο καθορισμού των ρυθμίσεων ανάλυσης από τον χρήστη (Manual settings.).

Ρυθμίσεις καθορισμένες από το χρήστη (Manual settings)

Πρόκειται για τις ρυθμίσεις που κάνει ο ίδιος ο χρήστης, εφόσον σε ορισμένες περιπτώσεις είναι απαραίτητο να αλλάξουν οι καθορισμένες από το πρόγραμμα

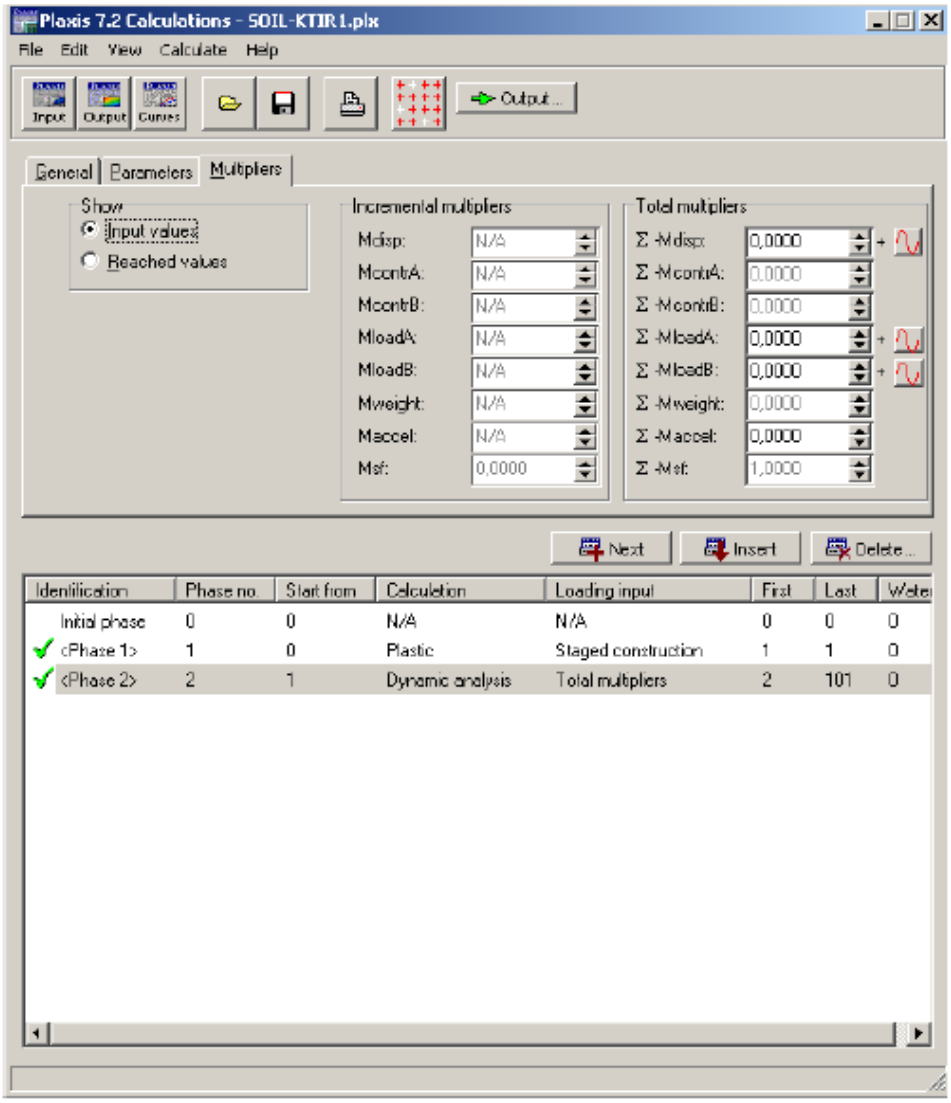
ρυθμίσεις. Στην περίπτωση αυτή ο χρήστης καλείται να επιλέξει ποιες από τις παραμέτρους τις επαναληπτικής διαδικασίας, όπως αυτές παρουσιάζονται στο παραπάνω σχήμα αλλά και στις επόμενες ενότητες, επιθυμεί να αλλάξει. Συνήθως γίνεται αλλαγή των συντελεστών Rayleigh a και b, ανάλογα με την τυπική απόσβεση που έχει το συγκεκριμένο μοντέλο, και των δυναμικών υποβημάτων (Dynamic substeps).

### A.3.4.3 Εισαγωγή δεδομένων φόρτισης (Loading input)

Στο σημείο αυτό καθορίζεται ο τύπος φόρτισης που εφαρμόζεται στη δεδομένη φάση υπολογισμών. Στην περίπτωση που γίνεται στατική ανάλυση της πλαστικής συμπεριφοράς του προσομοιώματος, το λογισμικό PLAXIS διακρίνει τρεις διαφορετικούς τύπους εισαγωγής δεδομένων φόρτισης από τους οποίους ο χρήστης καλείται να επιλέξει μόνο ένα κάθε φορά και οι οποίοι διακρίνονται σε:

- Φόρτιση με την έννοια της αύξησης ή μείωσης των εξωτερικών δυνάμεων, η οποία ενεργοποιείται μεταβάλλοντας τους αντίστοιχους πολλαπλασιαστές σε κάθε στάδιο ή συνολικά (Total multipliers).
- Φόρτιση με την έννοια της μεταβολής του βάρους, της αντοχής ή της δυσκαμψίας των στοιχείων, η οποία ενεργοποιείται μεταβάλλοντας τη γεωμετρία του προτύπου ή την επίδραση της πίεσης των πόρων, μέσω της εντολής της σταδιακής κατασκευής (Staged construction). Με αυτή την επιλογή το λογισμικό PLAXIS δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να διαμορφώσει τη γεωμετρία του μοντέλου μέσω της διαδικασίας της ενεργοποίησης ή απενεργοποίησης γεωμετρικών χώρων και δομικών στοιχείων. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται μία ακριβής και ρεαλιστική προσομοίωση των διάφορων διαδικασιών μιας κατασκευής ή εκσκαφής.
- Φόρτιση με την έννοια της μείωσης της αντοχής (Phi-c reduction) για την ανάλυση ευστάθειας, η οποία ενεργοποιείται με τον ορισμό του πολλαπλασιαστή $\Sigma M_{sf}$.

Σε περίπτωση που γίνεται δυναμική ανάλυση, το PLAXIS δέχεται φόρτιση με την έννοια της αύξησης ή μείωσης των εξωτερικών δυνάμεων, η οποία ενεργοποιείται μεταβάλλοντας τους αντίστοιχους πολλαπλασιαστές. Η σεισμική δόνηση εισάγεται με την κατάλληλη μορφή αρχείου που απαιτείται από το πρόγραμμα (συνήθως χρονικά μεταβαλλόμενη εδαφική επιτάχυνση).




Σχήμα A.12: Το παράθυρο διαλόγου των υπολογισμών – το φύλλο Multipliers.

## A.3.5 Σύστημα πολλαπλασιαστών

Το φύλλο 'Multipliers (βλ. Σχήμα A.12) χρησιμοποιείται σε μία ανάλυση παραμορφώσεων για τον έλεγχο του μεγέθους όλων των τύπων των φορτίσεων. Ο έλεγχος αυτός πραγματοποιείται με ένα σύστημα πολλαπλασιαστών. Οι φορτίσεις που εφαρμόζονται λαμβάνονται ως προϊόν του προγράμματος 'Input', όπου πραγματοποιήθηκε η εισαγωγή τους και καθορίστηκε η αρχική τιμή τους, και των αντίστοιχων πολλαπλασιαστών, η εισαγωγή των οποίων γίνεται στο παρόν στάδιο.

Το PLAXIS δέχεται δύο είδη πολλαπλασιαστών, τους αυξητικούς πολλαπλασιαστές, 'Incremental Multipliers', οι οποίοι επισημαίνονται με το

γράμμα M, και τους ολικούς πολλαπλασιαστές, 'Total Multipliers', οι οποίοι επισημαίνονται με Σ-M.

Ο διαχωρισμός μεταξύ των δύο αυτών ειδών πολλαπλασιαστών είναι ο ακόλουθος. Οι αυξητικοί πολλαπλασιαστές εκφράζουν την αύξηση της φόρτισης σε κάποιο συγκεκριμένο υπολογιστικό βήμα ενώ οι ολικοί το συνολικό επίπεδο της σε εκείνο το βήμα. Ο τρόπος με τον οποίο χρησιμοποιούνται οι διάφοροι πολλαπλασιαστές, εξαρτάται από το είδος της επίλυσης που εφαρμόζεται κάθε φορά. Είναι προφανές ότι οι πολλαπλασιαστές είναι αδιάστατα μεγέθη.

Παρακάτω δίνεται ενδεικτικά ο χαρακτηρισμός των συνηθέστερα χρησιμοποιούμενων πολλαπλασιαστών :

- Σ-Mdisp: Καθορίζουν το μέγεθος των μη-μηδενικών προκαθορισμένων παραμορφώσεων, οι οποίες εισήχθησαν στο πρόγραμμα 'Input'.

- Σ-McontrA, ΣM-contrB: Καθορίζουν το μέγεθος της σύγκλισης.

- Σ-MloadA, Σ-MloadB: Καθορίζουν το μέγεθος των κατανεμημένων και σημειακών δυνάμεων όπως αυτές έχουν οριστεί στο πρόγραμμα 'Input'.

- Σ-Mweight: Καθορίζουν το ποσοστό του βάρους των υλικών (έδαφος, νερό, δομικά στοιχεία) που έχει οριστεί στο πρόγραμμα 'Input'.

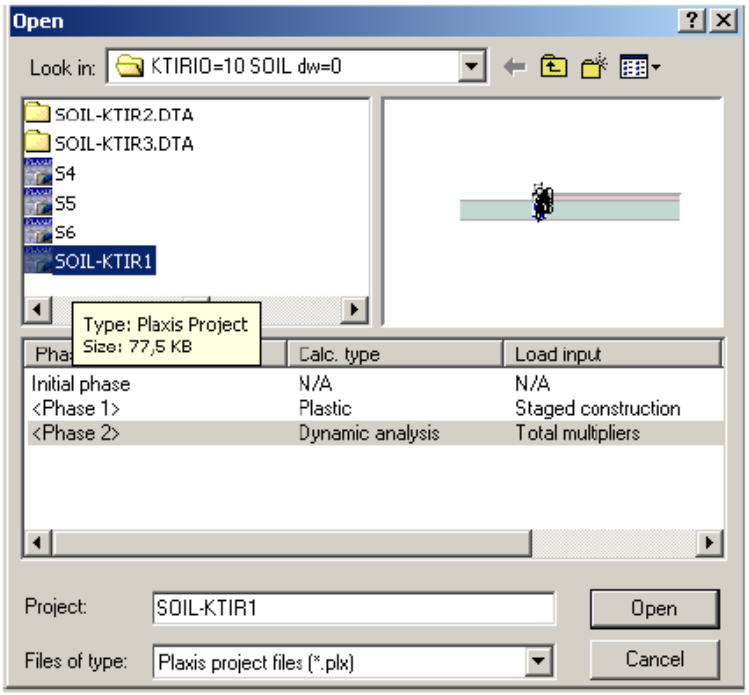
Έπειτα από τον καθορισμό όλων των υπολογιστικών φάσεων και πριν από την έναρξη της υπολογιστικής διαδικασίας ο χρήστης δύναται να επιλέξει σημεία για την παραγωγή των καμπυλών φόρτισης–παραμορφώσεων (load-displacement curves) ή πορείας τάσεων (stress-strain curves). Η εισαγωγή των σημείων πραγματοποιείται με την επιλογή 'Select points for curves' από το μενού 'View' ή από το αντίστοιχο εικονίδιο. Ως αποτέλεσμα 'ανοίγει' το υποπρόγραμμα 'Output' και εμφανίζεται ένα σχέδιο του κανάβου όπου απεικονίζονται όλοι οι κόμβοι. Η επιλογή των σημείων γίνεται με τη βοήθεια του κέρσορα και τα επιλεγμένα σημεία υποδεικνύονται με χαρακτήρες γραμμάτων οι οποίοι επανεμφανίζονται στο υποπρόγραμμα 'Curves'. Υπάρχει επιπλέον η δυνατότητα επιλογής σημείων τάσεων, 'Stress points', για την παραγωγή διαγραμμάτων τάσεων- παραμορφώσεων, πορείας τάσεων κτλ. Μόλις επιλεγούν οι κόμβοι, τα σημεία τάσεων ή οποιαδήποτε άλλα σημεία οι πληροφορίες αποθηκεύονται με την επιλογή του πλήκτρου 'Update'.

Τελευταίο βήμα είναι η επιλογή της εντολής 'Calculate' για την έναρξη της υπολογιστικής διαδικασίας. Μία φάση υπολογισμού η οποία έχει επιλεγεί να πραγματοποιηθεί χαρακτηρίζεται από την ένδειξη ενός μπλε βέλους ( ). Μετά την επιτυχή ολοκλήρωση μιας υπολογιστικής φάσης εμφανίζεται η ένδειξη ( √ ) πράσινου χρώματος, ενώ αν η διαδικασία δεν ολοκληρωθεί επιτυχώς εμφανίζεται η ένδειξη ( X ) κόκκινου χρώματος.

Μετά από όλες αυτές τις ρυθμίσεις, το λογισμικό PLAXIS μπορεί να επιλύσει το προσομοίωμα και να δώσει τα αποτελέσματα της ανάλυσης του, τα οποία μπορούν να παρουσιασθούν σε γραφική μορφή ή να αποθηκευτούν σε μορφή πινάκων.

## Α.4 Υποπρόγραμμα εξαγωγής αποτελεσμάτων (output)

Τα κύρια χαρακτηριστικά ο υπολογισμός των οποίων ζητείται συνήθως από τη δυναμική ανάλυση ενός προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων είναι οι παραμορφώσεις στους κόμβους των στοιχείων και ο καθορισμός των μέγιστων οριζόντιων επιταχύνσεων. Το PLAXIS διαθέτει διάφορους τρόπους απεικόνισης των αποτελεσμάτων μίας ανάλυσης. Στο σχετικό παράθυρο διαλόγου, το οποίο απεικονίζεται στο Σχήμα Α.13 ο χρήστης επιλέγει το αρχείο του οποίου τα αποτελέσματα θέλει να παρουσιαστούν. Κατά την επιλογή ενός συγκεκριμένου αρχείου εμφανίζονται στο ίδιο παράθυρο διαλόγου και οι υπολογιστικές φάσεις τις οποίες αυτό περιέχει. Μετά την επιλογή της φάσης υπολογισμών που ενδιαφέρει το χρήστη εμφανίζεται μια νέα φόρμα αποτελεσμάτων στην οποία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του τελευταίου υπολογιστικού βήματος της δεδομένης φάσης.




Σχήμα Α.13: Το παράθυρο διαλόγου για την επιλογή αρχείου και υπολογιστικής φάσης του ιδίου αρχείου για την εμφάνιση αποτελεσμάτων.

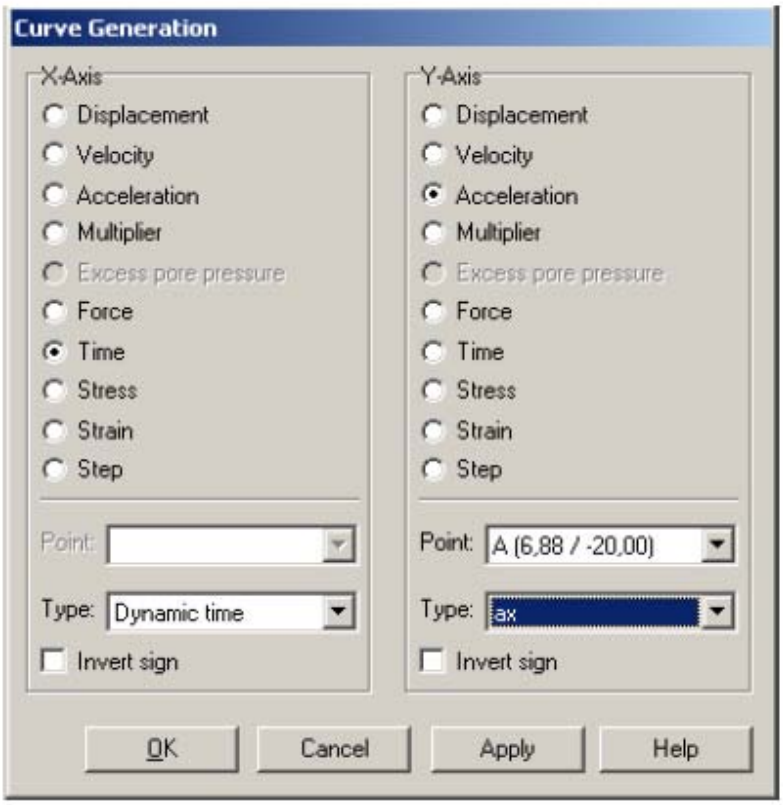
Στο συγκεκριμένο υποπρόγραμμα του PLAXIS μπορεί ο χρήστης να απεικονίσει τις παραμορφώσεις, τις τάσεις, τις κατασκευές και τις διεπιφάνειες, τους σχετικούς πίνακες αποτελεσμάτων και τα διαγράμματα σε τομές του μοντέλου (cross sections). Επίσης, το λογισμικό PLAXIS δίνει στο χρήστη τη δυνατότητα να απεικονίσει το παραμορφωμένο δικτύωμα των στοιχείων όπως αυτό εμφανίζεται μετά την επίλυση του προτύπου (deformed mesh), σε αντιπαράθεση με την αρχική γεωμετρία του μοντέλου, πριν από την επιβολή οποιασδήποτε φόρτισης. Οι παραμορφώσεις των κατασκευών (τοίχων, κτιρίων κλπ) και των διεπιφανειών απεικονίζονται πάνω στην αρχική γεωμετρία του προσομοιώματος. Τα αριθμητικά δεδομένα των διαφόρων αποτελεσμάτων εξάγονται και σε πίνακες, οι οποίοι μπορούν να αποθηκευτούν και να επεξεργαστούν από άλλα προγράμματα (π.χ. Excel). Για την εμφάνιση του πίνακα που αντιστοιχεί στις μετατοπίσεις ή στις επιταχύνσεις πρέπει στο πρόγραμμα των αποτελεσμάτων να εμφανίζεται το μοντέλο με τη σχετική απεικόνιση των μετατοπίσεων. Στον πίνακα αυτόν δίνονται οι συνιστώσες της μετατόπισης ή της επιτάχυνσης για όλους τους κόμβους του εξεταζόμενου προσομοιώματος. Οι μετατοπίσεις $u_x$, $a_x$ και $u_y$, $a_y$ αναφέρονται στο σύνολο των μετατοπίσεων και επιταχύνσεων, αντίστοιχα, όπως

αυτές υπολογίστηκαν από όλες τις προηγούμενες φάσεις υπολογισμών, ενώ οι μετατοπίσεις $\Delta U_x$ και $\Delta U_y$ αναφέρονται στο συγκεκριμένο υπολογιστικό βήμα.

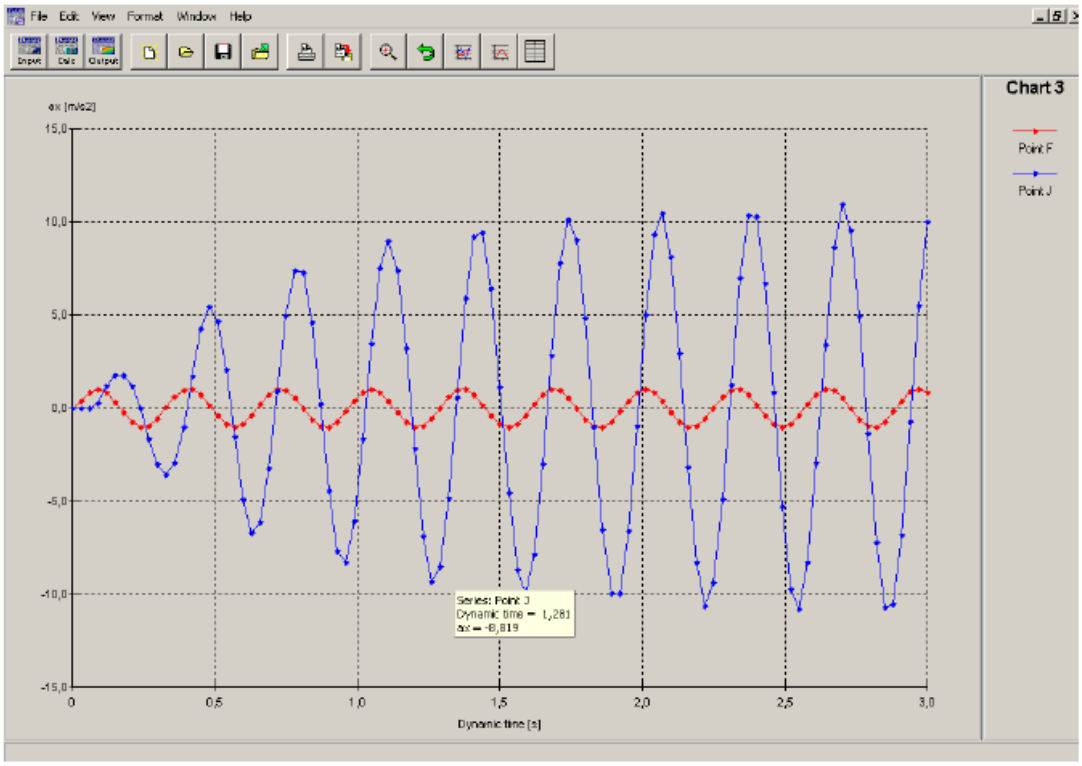
## Α.5 Υποπρόγραμμα σχεδιασμού γραφημάτων (curves)

Το υποπρόγραμμα σχεδιασμού των καμπυλών (ή γραφημάτων) χρησιμοποιείται από το χρήστη για το σχεδιασμό των διαφόρων διαγραμμάτων των αποτελεσμάτων της ανάλυσης του εξεταζόμενου προσομοιώματος όπως π.χ. χρόνου–επιταχύνσεων, χρόνου–μετατοπίσεων κ.α. (ανάλογα και με το είδος της ανάλυσης που έχει προηγηθεί). Οι καμπύλες αυτές απεικονίζουν την ποσοτική διακύμανση συγκεκριμένων παραμέτρων κατά τη διάρκεια των διαφόρων υπολογιστικών φάσεων και δίνουν μία εικόνα για την συνολική και τοπική συμπεριφορά του μοντέλου.

Κατά την έναρξη του προγράμματος σχεδιασμού των γραφημάτων ζητείται από τον χρήστη να επιλέξει από πιο υπάρχον αρχείο επιθυμεί να χρησιμοποιήσει στοιχεία για να σχεδιάσει κάποιο διάγραμμα. Μετά την επιλογή του αρχείου εμφανίζεται το παράθυρο διαλόγου του σχήματος Α.14 στο οποίο γίνονται οι επιλογές για τη δημιουργία του γραφήματος που πρόκειται να παραχθεί. Σε αυτό το παράθυρο διαλόγου υπάρχουν δύο πλαίσια με διάφορες επιλογές για τον οριζόντιο άξονα (άξονας x) και για τον κατακόρυφο άξονα (άξονας y). Για τον κάθε άξονα του διαγράμματος γίνεται ένας συνδυασμός επιλογών με σκοπό τον καθορισμό των παραμέτρων που θα απεικονιστούν στο διάγραμμα. Ο αριθμός των σημείων της κάθε καμπύλης αντιστοιχεί στον αριθμό των βημάτων που απαιτήθηκαν για την επίλυση της συγκεκριμένης φάσης υπολογισμών. Στο Σχήμα Α.15 απεικονίζονται οι καμπύλες οριζόντιας επιτάχυνσης–χρόνου για δύο επιλεγμένα σημεία ενός προσομοιώματος της παρούσας εργασίας, όπως αυτές παράγονται από το υποπρόγραμμα σχεδιασμού των γραφημάτων του λογισμικού PLAXIS.




Σχήμα Α.14: Το παράθυρο διαλόγου για τη δημιουργία καμπύλης.




Σχήμα Α.15: Καμπύλες οριζόντιας επιτάχυνσης-χρόνου.