



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

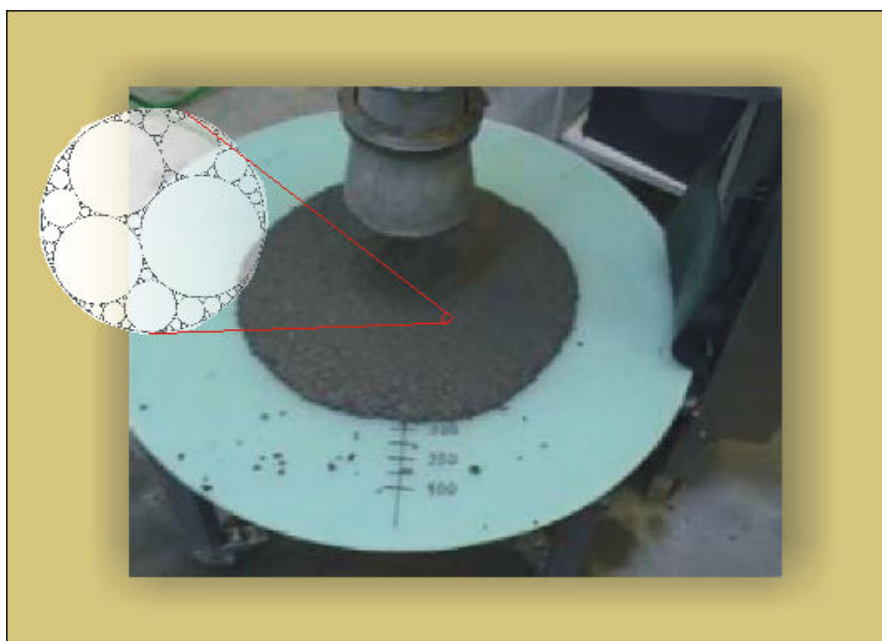
**Σχολή Χημικών Μηχανικών**

**Τομέας Χημικών Επιστημών**

**«ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΑΣΤΑΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ  
ΣΕ ΑΥΤΟΣΥΜΠΥΚΝΟΥΜΕΝΟ  
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ»**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Διαμαντώνης Νικόλαος**



**Επιβλέπουσα:**

**Μπεάζη – Κατσιώτη Μαργαρίτα, Επίκ. Καθηγήτρια**



*Στους γονείς μου, Γιάννη και Αναστασία*

## ***ΠΡΟΛΟΓΟΣ***

Η εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί τμήμα του προγράμματος σπουδών της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, το οποίο αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για τη λήψη του διπλώματος. Το θέμα της εργασίας αυτής, ανατέθηκε από την κα. Μαργαρίτα Μπεάζη – Κατσιώτη, Επίκ. Καθηγήτρια της Σχολής Χημικών Μηχανικών.

Η εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας διήρκεσε από τις αρχές Μαΐου του 2007 έως τα μέσα Ιουνίου του 2008. Η διεξαγωγή των πειραματικών μετρήσεων έγινε στο Εργαστήριο Σκυροδέματος του Κέντρου Δοκιμών Ερευνών και Προτύπων (ΚΔΕΠ) της ΔΕΗ, στην Παιανία Αττικής. Η αρχική επεξεργασία των υλικών έγινε από το Εθνικό Κέντρο Ερευνών Τσιμέντου (ΕΚΕΤ), ενώ τα υλικά προσφέρθηκαν από τη βιομηχανία τσιμέντου ΑΓΕΤ Ηρακλής. Ακόμα, έγιναν ενόργανες αναλύσεις με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης.

Η εργασία έχει ως αντικείμενο το σχεδιασμό και τη μελέτη της ρεολογικής συμπεριφοράς τσιμεντόπαστας με κατάλληλα λεπτόκοκκα αδρανή, η οποία προορίζεται για παραγωγή αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος (ΑΣΣ).

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά όσους συνέβαλλαν με τον τρόπο τους στην πραγματοποίηση αυτής της διπλωματικής εργασίας και πρωτίστως την κα. Μαργαρίτα Μπεάζη – Κατσιώτη που με εμπιστεύθηκε, μου ανέθεσε και με καθοδήγησε σε αυτό το επιστημονικό ταξίδι. Η άφογη και άμεση συνεργασία μας, η επίβλεψή της με τις εύστοχες και ανεκτίμητες συμβουλές της, η διάθεσή της ανά πάσα στιγμή, αποτελούν αναπόσπαστα στοιχεία της πραγματοποίησης της παρούσας μελέτης. Επίσης, η βοήθειά της σε ανθρώπινες στιγμές είναι για εμένα πολύ σημαντική. Όσες φορές και να της απευθύνω τις ευχαριστίες μου θα είναι λίγες.

Πολλές και θερμές ευχαριστίες εκφράζω επίσης προς το προσωπικό του Εργαστηρίου Σκυροδέματος του ΚΔΕΠ της ΔΕΗ, και ιδιαίτερα στον κ. Αντώνη Σακελλαρίου, Διευθυντή του εργαστηρίου, και την κα. Αικατερίνη Παπαθανασίου. Δίχως την ευγενική παραχώρηση του εξοπλισμού, του εργαστηρίου και του προσωπικού εκ μέρους τους, θα ήταν αδύνατη η διεξαγωγή των μετρήσεων.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες επίσης απευθύνονται στον κ. Γιάννη Μαρίνο, Διευθυντή Έρευνας και Ανάπτυξης της ΑΓΕΤ Ηρακλής, του οποίου οι εξέχουσες γνώσεις στο αντικείμενο, οι συμβουλές του, η παροχή ενημερωτικού υλικού και η αρωγή του στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων, αποτελούν αναπόσπαστα τμήματα της μελέτης αυτής. Ακόμα ευχαριστώ θερμά και τον κ. Βασίλη Καλοϊδά από το ΕΚΕΤ, ο οποίος ασχολήθηκε με την πραγματοποίηση της εργασίας με την παροχή των υλικών, καθώς και τη διεξαγωγή των αναλύσεων στα εργαστήρια του ΕΚΕΤ.

Επίσης, ευχαριστίες απευθύνονται προς τον Υ.Δ. Μάριο Κατσιώτη, του οποίου η παροχή των γνώσεων και της τεχνογνωσίας πάνω σε θέματα ηλεκτρονικού μικροσκοπίου (SEM) συνέβαλλαν στο πειραματικό μέρος της μελέτης.

Τέλος, δε θα μπορούσα να μην απευθύνω ευχαριστίες στην οικογένειά μου, τους γονείς μου και τον αδελφό μου, που με υπομονή, αγάπη και ενθουσιασμό με εφοδίασαν κατάλληλα ώστε να φτάσω μέχρι αυτό το σημείο και να ονειρεύομαι ακόμη πιο μακριά.

*Διαμαντώνης Νικόλαος  
Ιούνιος 2008*

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	i
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	iii
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	vi
1. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	1
1.1. ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ.....	1
1.1.1. Γενικά.....	1
1.1.2. Ιστορία του Σκυροδέματος.....	2
1.1.3. Βασική ορολογία για το Σκυρόδεμα.....	5
Φρέσκο σκυρόδεμα.....	5
Σκληρυμένο σκυρόδεμα.....	5
Επί τόπου παρασκευασμένο.....	5
Έτοιμο σκυρόδεμα.....	5
Δραστικό περιεχόμενο νερό.....	6
Συνολικό νερό.....	6
Αναλογία νερού προς τσιμέντο (W/C ή N/T).....	6
Χαρακτηριστική αντοχή.....	6
1.1.4. Γενικά για τα συστατικά του Σκυροδέματος.....	6
Τσιμέντο.....	6
Αδρανή (γενικά).....	9
Χονδρόκοκκα αδρανή.....	10
Λεπτόκοκκα αδρανή.....	10
Νερό ανάμιξης.....	10
Πρόσμικτα συστατικά (additives).....	11
Βελτιωτικά πρόσθετα (admixtures).....	11
1.2. ΑΥΤΟΣΥΜΠΥΚΝΟΥΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ.....	12
1.2.1. Περίληψη.....	12
1.2.2. Γενικά.....	12
1.2.3. Ιστορία.....	14
1.2.4. Πρόσμικτα λεπτόκοκκα υλικά (additives) στο ΑΣΣ.....	15
a. Ασβεστόλιθος (Limestone).....	15
b. Ποζολάνες (Pozzolane) και ποζολανική αντίδραση.....	16
c. Σκωρία Υψικαμίνων (Furnace Slag).....	20
d. Ιπτάμενη Τέφρα (Fly Ash).....	21
e. Πυριτική Παιπάλη (Silica Fume).....	25
1.2.5. Χημικά πρόσθετα (admixtures) για το ΑΣΣ.....	26
a. Μειωτήρες Νερού (HRWR).....	28
b. Αερακτικά Πρόσθετα.....	28
c. Επιβραδυντές.....	29
d. Επιταχυντές.....	30
1.2.6. Σύνθεση ΑΣΣ.....	30
1.2.7. Στατιστικά στοιχεία για τη σύνθεση του ΑΣΣ.....	32
1.2.8. Οδηγίες EFNARC για τη σύνθεση ΑΣΣ.....	38
1.2.9. Πρότυπη μέθοδος σύνθεσης ΑΣΣ - Μέθοδος Okamura.....	40
a. Περιεκτικότητα του ΑΣΣ σε αέρα.....	40
b. Καθορισμός του όγκου των χονδρόκοκκων αδρανών.....	41
c. Καθορισμός της περιεκτικότητας σε άμμο.....	42

d.	Σχεδιασμός της σύστασης της πάστας .....	42
e.	Προσδιορισμός του βέλτιστου λόγου νερού/λεπτόκοκκα και της δόσης του υπερρευστοποιητή στο μίγμα .....	43
f.	Αξιολόγηση των ιδιοτήτων του ΑΣΣ με πρότυπες δοκιμές .....	44
1.2.10.	Καθοριστικές Παράμετροι ΑΣΣ .....	44
I.	Εργασιμότητα .....	44
II.	Ρεολογία .....	47
Γενικά .....	47	
Ρεολογία και Σκυρόδεμα .....	48	
Ιξώδες .....	51	
Κατηγορίες Ρευστών .....	53	
Ρευστά Τύπου Bingham .....	59	
Μόνιμη κατάσταση .....	60	
Προσδιορισμός του $\gamma_{\text{βαθμίδα}}$ .....	63	
Προσδιορισμός μέγιστης ταχύτητας $u_{\text{max}}$ .....	63	
Ογκομετρική παροχή .....	64	
III.	Πυκνότητα Στοίβαξης (Packing Density) .....	65
1.2.11.	Σημαντικές Ιδιότητες Νωπού ΑΣΣ .....	75
1.2.12.	Δοκιμές για το νωπό ΑΣΣ .....	76
a.	Δοκιμή εξάπλωσης .....	77
b.	Δοκιμή με δακτύλιο J .....	78
c.	Δοκιμή με χοάνη V .....	79
d.	Δοκιμή με δοχείο σχήματος L .....	81
e.	Δοκιμή σταθερότητας με κοσκίνιση (GTM) .....	82
1.2.13.	Ιδιότητες Σκληρυμένης Φάσης .....	83
Αντοχή σε θλίψη (compressive strength) .....	83	
Αντοχή σε κάμψη (tensile strength) .....	83	
Αντοχές πρόσφυσης (adhesion strength) .....	84	
Μέτρο ελαστικότητας (modulus of elasticity) .....	84	
1.2.14.	Παρατηρήσεις που προκύπτουν από εφαρμογές .....	84
I.	Παρασκευή ΑΣΣ .....	84
II.	Μεταφορά .....	85
III.	Σύστημα τύπων (καλούπια) .....	86
IV.	Επί τόπου διάστρωση (casting) .....	86
V.	Συμπύκνωση και Συντήρηση .....	87
VI.	Ψυχρή σύνδεση (cold joint) .....	87
1.2.15.	Τοποθέτηση Προβλήματος .....	88
2.	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ .....	89
2.1.	ΣΚΟΠΟΣ .....	89
2.2.	ΥΛΙΚΑ .....	89
2.3.	ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟ ΣΑΡΩΣΗΣ (SEM) ..	92
2.4.	ΜΕΛΕΤΗ ΡΕΟΛΟΓΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ .....	95
2.4.1.	ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΙΓΜΑΤΩΝ (mix design) .....	95
2.4.2.	ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ .....	97
2.4.3.	ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ .....	99
2.4.4.	ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ .....	100
Πλαστικό Ιξώδες .....	100	
Τιμή Κατωφλίου Διάτμησης .....	102	
2.5.	ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ .....	108
Επίδραση της πυριτικής παιπάλης στα μίγματα με ποζολάνη .....	108	

Επίδραση της πυριτικής παιπάλης στα μίγματα με ιπτάμενη τέφρα.....	109
Επίδραση της πυριτικής παιπάλης στα μίγματα με ασβεστόλιθο .....	109
Για το μίγμα Τσιμέντο-Ασβεστόλιθος-Ποζολάνη (Η).....	109
Για το μίγμα Τσιμέντο-Ποζολάνη-Τέφρα (Θ) .....	109
Για το μίγμα Τσιμέντο-Ασβεστόλιθος-Τέφρα (Ι) .....	110
Σύνδεση κοκκομετρίας και σχήματος με τις ρεολογικές ιδιότητες.....	110
2.6. Συμπεράσματα .....	111
2.7. Προτάσεις για το μέλλον .....	112
3. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ .....	113
4. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	115



## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα είναι ένας τύπος σκυροδέματος που εμφανίζει ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και αρκετές διαφορές, έναντι των συμβατικών, όσον αφορά τη ρεολογική συμπεριφορά του ΑΣΣ. Σε πιο τεχνικούς όρους η ρεολογική συμπεριφορά μεταφράζεται στην εργασιμότητα, η οποία είναι γενικά η ιδιότητα που χαρακτηρίζει το πόσο εύκολα γίνεται ο χειρισμός, η ανάμιξη και η διάστρωση του σκυροδέματος κατά τη νωπή του φάση. Συγκεκριμένα, το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα εμφανίζει πολύ καλή εργασιμότητα.

Το ρόλο του συνδετικού υλικού στο σκυρόδεμα, διαδραματίζει η τσιμεντόπαστα που με τις ρεολογικές ιδιότητές της καθορίζει τη σχετική κίνηση των αδρανών μέσα στο μίγμα. Έχουν γίνει αρκετές μελέτες πάνω στον τρόπο με τον οποίο η προσθήκη εξαιρετικά λεπτόκοκκων αδρανών (ultra-fine aggregates) στο τσιμέντο, μεταβάλλει τις ρεολογικές ιδιότητες της τσιμεντόπαστας.

Στην παρούσα εργασία, εξετάζεται η επίδραση μερικών εξαιρετικά λεπτόκοκκων υλικών στο ιξώδες της τσιμεντόπαστας. Γίνεται μια προσπάθεια ποσοτικής συσχέτισης των παραγόντων και σύνδεσης των αποτελεσμάτων με βιβλιογραφικά δεδομένα που αφορούν την εργασιμότητα μιγμάτων αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος που προέρχονται από υλικά όμοια με αυτά που χρησιμοποιούνται στα εν λόγω πειράματα.

# 1. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

## 1.1. ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

### 1.1.1. Γενικά

Το σκυρόδεμα είναι ένα δομικό υλικό το οποίο, στην πιο διαδεδομένη μορφή του, αποτελείται από τσιμέντο Portland, χονδρόκοκκα και λεπτόκοκκα αδρανή και νερό. Ανάλογα την περίπτωση, ενσωματώνονται και υλικά που καλούνται πρόσθετα και βελτιωτικά.

Κατά την τοποθέτησή του, η στερεοποίηση δεν επέρχεται από την ξήρανση του μίγματος, αλλά από την προσρόφηση του νερού από το τσιμέντο. Αυτή η πάστα τσιμέντου – νερού υφίσταται σκλήρυνση, λειτουργώντας ως μέσο σύνδεσης των υπόλοιπων συστατικών του σκυροδέματος, δημιουργώντας ένα υλικό που ομοιάζει σε μορφοποιημένο βράχο και έχει αρκετά ανεπτυγμένες μηχανικές αντοχές.

Ως δομικό υλικό, το σκυρόδεμα έχει χρησιμοποιηθεί περισσότερο από κάθε άλλο υλικό. Οι εφαρμογές του κατακλύζουν την καθημερινή ζωή. Τυπικές κατασκευές από σκυρόδεμα είναι κτίρια, θεμελιώσεις, πεζοδρόμια, δρόμοι, γέφυρες, φράχτες, κολώνες και πολλά άλλα.

Το σκυρόδεμα χρησιμοποιείται ευρύτατα στις μέρες μας, λόγω της ευκολίας παραγωγής του, και της ευκολίας διάστρωσής του στα δομικά στοιχεία των κατασκευών.

Σημαντικό σκέλος της εφαρμογής του σκυροδέματος αποτελεί η συμπίκνωση, η οποία από την πλευρά των κατασκευών, απαιτεί δόνηση του σκυροδέματος (δηλαδή επιβολή μηχανικής ενέργειας) έτσι ώστε να απομακρυνθεί ο περιεχόμενος αέρας και να μειωθεί το πορώδες, οδηγώντας σε αύξηση της αντοχής και των μηχανικών ιδιοτήτων του.

### 1.1.2. Ιστορία του Σκυροδέματος

Η ιστορία του σκυροδέματος ξεκινά 12 εκατομμύρια χρόνια πριν, οπότε και εμφανίστηκαν τα πρώτα φυσικά δημιουργημένα αποθέματα ασβεστολίθου. Η παραγωγή τους οφείλεται στις έντονες γεωλογικές αλλαγές στις οποίες υποβαλλόταν η Γη. Ο άνθρωπος χρησιμοποίησε πρώτα αυτό το φυσικό δομικό υλικό και στη συνέχεια, οι αυξημένες ανάγκες του τον οδήγησαν στην εύρεση τρόπων παραγωγής τσιμέντου και από άλλα υλικά. Από την άλλη πλευρά, η χρήση του σκυροδέματος αριθμεί μερικές εκατοντάδες χρόνια ζωής. Μια σύντομη ιστορική αναδρομή του σκυροδέματος, φαίνεται στα επόμενα σχήματα<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Από τον ιστότοπο <http://matse1.mse.uiuc.edu/concrete/time.html> του University of Illinois.

3000 π.Χ.  
Οι Αιγύπτιοι χρησιμο-  
ποιούσαν λάσπη και άχυρα σε  
συνδυασμό για τα τούβλα. Στις πυρα-  
μίδες έβαζαν ασβεστολιθικές πλάστες και  
γύψο.




300π.Χ.-476μ.Χ.  
Ρωμαϊκά λουτρά, Κολλοσσαίο  
και Πάνθεον χτίστηκαν με ποζολο-  
νικά τσιμέντα. Ως πρόσμικτα είχαν αίμα  
λίπτος και γάλα από ζώα.



## Η ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

1793  
Ο John Smeaton χρησι-  
μοποίησε υδραυλικό ασβεστό-  
λιθο για την ανακατασκευή του  
φάρου του Eddystone στο Cornwall του  
Λονδίνου.

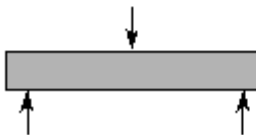


1824  
Ο Joseph Aspdin στην  
Αγγλία εφηύρε το τσιμέντο  
portland καίγοντας κιμωλία και πυλό  
σε κλίνη ασβεστόλιθου μέχρι να φύγει  
όλο το διοξείδιο του άνθρακα.



3000 π.Χ. - σήμερα

1836  
Η πρώτη συστηματική  
δοκιμή για την αντοχή σε κάμψη  
και συμπίεση διεξήχθη στη Γερμανία.



1867  
Ο Joseph Monier (Γαλλία),  
τοποθέτησε πλέγμα από σύρμα  
σε γλάστρες, ακολουθώντας την  
τεχνική του οπλισμένου σκυροδέματος.



1886  
Κατασκευή του πρώτου  
περιστροφικού κλιβάνου στην  
Αγγλία για μαζική παραγωγή  
τσιμέντου.



1889  
Κατασκευή της πρώτης  
ενισχυμένης από  
σκυρόδεμα γέφυρας.



1891  
Κατασκευή του πρώτου  
δρόμου από σκυρόδεμα  
στο Ohio των ΗΠΑ.



1936  
Τα πρώτα μεγάλα  
φράγματα Hoover, Grand  
Coulee, κατασκευάζονται.



1967  
Η πρώτη αθλητική εγκα-  
τάσταση από σκυρόδεμα,  
στο Πανεπιστήμιο του Illinois.



1992  
Κατασκευή του  
ψηλότερου κτιρίου στο  
Chicago.



### **1.1.3. Βασική ορολογία για το Σκυρόδεμα**

Εκτός από τον ορισμό του σκυροδέματος, ο οποίος αναφέρθηκε σε προηγούμενο εδάφιο, θα χρησιμοποιηθούν και κάποιοι άλλοι όροι, οι οποίοι κρίνεται απαραίτητο να επεξηγηθούν.

#### ***Φρέσκο σκυρόδεμα***

Είναι το σκυρόδεμα που έχει μόλις παρασκευασθεί με μίξη όλων των συστατικών του και βρίσκεται σε νωπή και πλαστική κατάσταση, δυνάμενο να μορφοποιηθεί σε καλούπια και να συμπυκνωθεί.

#### ***Σκληρυμένο σκυρόδεμα***

Η κατάσταση στην οποία το σκυρόδεμα έχει ήδη μεταβεί στη στερεά κατάσταση και έχει αναπτύξει τις μηχανικές του ιδιότητες.

#### ***Επί τόπου παρασκευασμένο***

Είναι το σκυρόδεμα που παρασκευάζεται με ανάμιξη των υλικών στον τόπο εφαρμογής του.

#### ***Έτοιμο σκυρόδεμα***

Είναι το σκυρόδεμα εκείνο που παρασκευάζεται σε σταθερό ή κινητό αναμικτήρα και μεταφέρεται στον τόπο εφαρμογής του, υπό την μορφή του φρέσκου σκυροδέματος.

### ***Δραστικό περιεχόμενο νερό***

Είναι η ποσότητα του νερού που προκύπτει από τη διαφορά μεταξύ του συνολικού νερού που περιέχεται στο φρέσκο σκυρόδεμα και του νερού που απορροφούν τα αδρανή.

### ***Συνολικό νερό***

Το άθροισμα του νερού που προέρχεται από τη φυσική υγρασία των αδρανών και του νερού που εισέρχεται στο σκυρόδεμα όταν τα πρόσθετα τροφοδοτούνται υπό την μορφή πολτού.

### ***Αναλογία νερού προς τσιμέντο (W/C ή N/T)***

Είναι η κατά βάρος αναλογία του δραστικού νερού προς το τσιμέντο που περιέχεται στο φρέσκο σκυρόδεμα.

### ***Χαρακτηριστική αντοχή***

Αποτελεί την τιμή αντοχής του σκυροδέματος, κάτω από την οποία υπάρχει πιθανότητα μόλις 5% να βρεθεί η τιμή αντοχής ενός τυχαίου δοκιμίου.

## **1.1.4. Γενικά για τα συστατικά του Σκυροδέματος**

### ***Τσιμέντο***

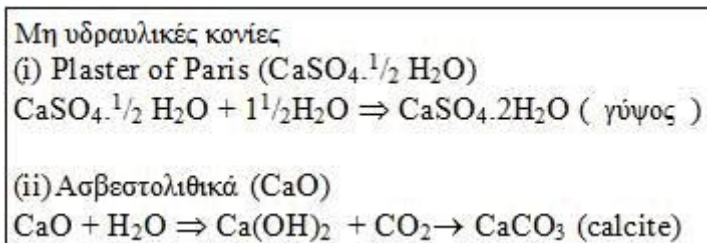
Ιστορικά, οι κονίες άρχισαν να χρησιμοποιούνται από το 3000 π.Χ. στις πυραμίδες, και αργότερα στην ανέγερση του Κολοσσαίου. Οι κονίες μπορούν

να χωριστούν σε δύο ευρείες κατηγορίες: τις υδραυλικές και τις μη υδραυλικές.

Οι μη υδραυλικές κονίες ήταν οι πιο δημοφιλείς στον αρχαίο κόσμο. Οι σχετικά υψηλές διαλυτότητες του πορτλαντίτη ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) και της γύψου οδηγούν σε ταχεία υποβάθμισή τους όταν βρίσκονται σε υγρό περιβάλλον. Οι Ρωμαίοι χρησιμοποιούσαν αποδοτικά κονίες βασισμένες στον ασβεστόλιθο δονώντας τις νωπές πάστες έτσι ώστε να σχηματιστεί ένα επιφανειακό στρώμα υψηλής πυκνότητας, το οποίο ερχόμενο σε επαφή με την ατμόσφαιρα ενανθρακώνεται και έτσι μειώνεται η διαπερατότητα του υλικού. Αιτία αποτελεί το επιφανειακό στρώμα ασβεστίτη που σχηματίζεται μέσω αυτής της διεργασίας. Αυτό το στρώμα δρούσε προστατευτικά για τον υποκείμενο πορτλαντίτη, ενώ παραδείγματα της ρωμαϊκής τεχνικής μπορούν να βρεθούν στο Αδριάνειο Τείχος. Τα ασβεστοπικά κονιάματα χρησιμοποιούντο μέχρι πρόσφατα ακόμη και σε οικιακές εφαρμογές.

Οι πρώτες ύλες, όπως αυτές παραλαμβάνονταν από τη γη, απαιτούσαν θερμική κατεργασία. Αυτή περιλαμβάνει την μερική αφυδάτωση της φυσικής γύψου στους  $200^\circ\text{C}$  και την ασβεστοποίηση (calcination) του ασβεστίτη στους  $850^\circ\text{C}$ .

Οι υδραυλικές κονίες έχουν μεγαλύτερες αντοχές, και τα προϊόντα της ενυδάτωσης είναι περισσότερο δυσδιάλυτα. Η προηγούμενη συστηματική ανάπτυξη των υδραυλικών κονιών πιθανόν από τους Ρωμαίους, έκανε χρήση ασβεστόλιθου, πυριτίου, αλουμίνας και ηφαιστειακών γαιών σαν πρόσθετα.

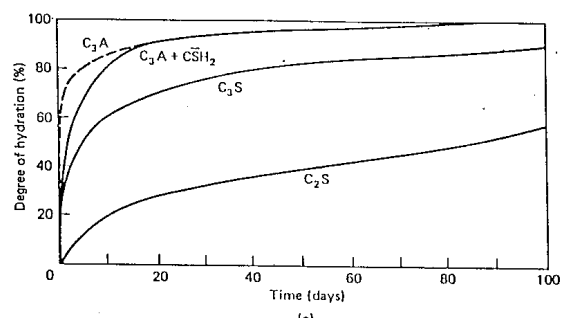
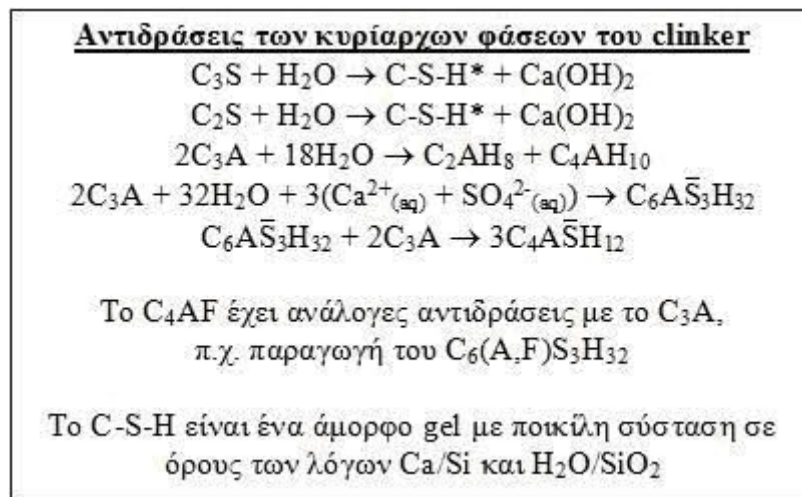


Ενυδάτωση: Ο όρος αυτός χρησιμοποιείται για να περιγράψει ένα εύρος χημικών αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα μεταξύ του τσιμέντου και του νερού έτσι ώστε να παραχθεί το σκληρυμένο προϊόν.

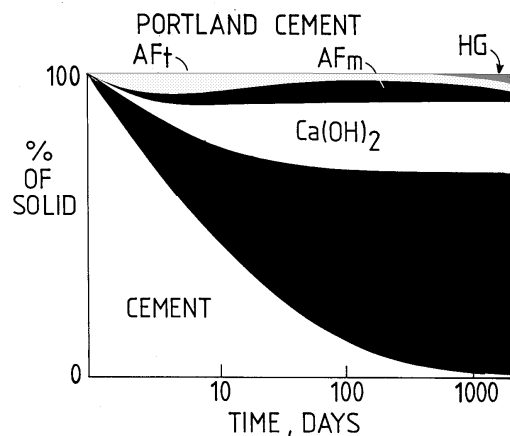


Ένα σωματίδιο τσιμέντου είναι ένα πολυφασικό στερεό σώμα, το οποίο έχει ασβεστοπυριτικές (50 – 100 μm) και ασβεστοαργλικές ενώσεις. Το καθένα από αυτά τα συστατικά συμμετέχει σε συγκεκριμένες δράσεις με το νερό και παράγουν προϊόντα τα οποία διασταυρώνονται προς σχηματισμό ενός πυκνού στερεού, το οποίο είναι ικανό να αυξάνει τις αντοχές του.

Οι ρυθμοί των αντιδράσεων είναι πολύ σημαντικοί. Η αντίδραση του C<sub>3</sub>A είναι η ταχύτερη και παράγει τα μεγαλύτερα ποσά θερμότητας αλλά έχει μικρή συνεισφορά στην τελική αντοχή του υλικού, παρά το γεγονός ότι καθορίζει την πρώιμη αντοχή του. Οι ενώσεις του ασβεστίου με το πυρίτιο είναι αυτές που καθορίζουν την μακρόχρονη αντοχή του τσιμέντου. Το C<sub>3</sub>S είναι το πιο δραστικό, δίδοντας την πρώιμη αντοχή, ενώ το C<sub>2</sub>S έχει μεγαλύτερη συνεισφορά μακροπρόθεσμα. Το παραγόμενο C-S-H είναι η κύρια συνδετική φάση στα τσιμέντα τύπου Portland και είναι το κυριότερο ποσοτικά προϊόν ενυδάτωσης. Οι αντιδράσεις του φερίτη έχουν ενδιάμεσους ρυθμούς αλλά επίσης συνεισφέρουν αρκετά στην αντοχή μακροπρόθεσμα.



Εικόνα 1: Ρυθμοί ενυδάτωσης των διάφορων φάσεων του clinker



Εικόνα 2: Κατανομή των προϊόντων ενυδάτωσης στις τσιμεντόπαστες Portland

### ***Αδρανή (γενικά)***

Είναι υλικά που αποτελούνται από άθραυστες ή θραυστές φυσικές ή τεχνητές ορυκτές ύλες, που κρίνονται κατάλληλες για χρήση στο σκυρόδεμα. Ανάλογα με την πυκνότητά τους διακρίνονται σε ελαφροβαρή ( $< 2000\text{kg/m}^3$ ), κανονικού βάρους ( $2000 - 3000\text{kg/m}^3$ ) και βαριά ( $> 3000\text{kg/m}^3$ ).

Τα αδρανή οφείλουν να εμφανίζουν επαρκείς αντοχές, επαρκή πρόσφυση και χημική συμβατότητα με την τσιμεντοκονία. Επίσης, απαραίτητο είναι να εμφανίζουν υψηλά επίπεδα καθαρότητας, δηλαδή να είναι απαλλαγμένα από ανεπιθύμητες προσμίξεις. Φυσικά, είναι αναγκαίο να έχουν συγκεκριμένη κοκκομετρική διαβάθμιση, καθώς και σχήμα.

Αυτά είναι τα χαρακτηριστικά που θα δώσουν στο μίγμα του σκυροδέματος τις τελικές επιθυμητές ιδιότητες, οι οποίες είναι:

*Αντοχή σε συνάρτηση με το μητρικό ορυκτό*

*Πρόσφυση με την κονία*

*Χημική συμπεριφορά*

### ***Χονδρόκοκκα αδρανή***

Υλικά που απαντώνται στη φύση, επεξεργασμένα ή τεχνητά, τα οποία έχουν συγκεκριμένη σύμφωνα με πρότυπα κατανομή μεγέθους, τα μικρότερα των οποίων κατακρατούνται στα κόσκινα Νο 4 (4,76mm).

### ***Λεπτόκοκκα αδρανή***

Μικρού μεγέθους αδρανή σωματίδια που περνούν τα κόσκινα των 3/8in. και 4,76mm και κατακρατούνται από κόσκινα Νο 200 (74μm).

### ***Νερό ανάμιξης***

Το νερό είναι ένα από τα ενεργά συστατικά του σκυροδέματος, το οποίο μαζί με το τσιμέντο συμμετέχουν σε μια σειρά αντιδράσεων που οδηγούν στην πήξη και σκλήρυνση του σκυροδέματος, μέσω της δημιουργίας ένυδρων κρυσταλλικών ενώσεων. Η θεμελιώδης απαίτηση από το χρησιμοποιούμενο νερό είναι η πλήρης απουσία ενώσεων και συστατικών που θα μπορούσαν να βλάψουν ή να επηρεάσουν τις αντιδράσεις της ενυδάτωσης, ή ακόμα να επιταχύνουν τη διάβρωση του οπλισμού.

Όσον αφορά τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του νερού που χρησιμοποιείται για την παρασκευή του σκυροδέματος υπάρχει μια συγκεκριμένη ανοχή σε σχέση με το νερό που δρα εξωτερικά και μόνιμα. Αυτό συμβαίνει για τον απλό λόγο του ότι το νερό ανάμιξης βρίσκεται σε συγκεκριμένη μικρή σχετικά αναλογία και δρα μέχρι να εξαντληθεί, ενώ τα

νερά που δρουν εξωτερικά και προέρχονται από τον περιβάλλοντα χώρο της κατασκευής (αυτά μπορεί να είναι θαλασσινά νερά, νερά αποχετεύσεων κλπ), έχουν μόνιμη δράση και στις περισσότερες περιπτώσεις είναι ανεξάντλητα.

Πιο ειδικά, το νερό που χρησιμοποιείται για την παρασκευή και συντήρηση του σκυροδέματος, δεν πρέπει να περιέχει ουσίες όπως ζωικά απορρίμματα, σάκχαρα, λίπη και έλαια, ανθρακικό κάλιο. Καλό είναι επίσης, το νερό αυτό να έχει κριθεί ως πόσιμο, ή να χρησιμοποιείται για αρκετό καιρό.

*Πίνακας 1: Όρια περιεχόμενων ουσιών στο νερό ανάμιξης.*

Ουσία	Όριο
Άλατα	< 3,5%
Θειικά	< 0,5%
pH	> 4
Νάτριο	< 3%
Λίπη και έλαια	0%

### ***Πρόσμικτα συστατικά (additives)***

Ανόργανα, λεπτός διαμερισμένα υλικά, τα οποία προστίθενται στο σκυρόδεμα με σκοπό να βελτιώσουν ή να πετύχουν κάποιες συγκεκριμένες ιδιότητες. Κατηγοριοποιούνται στα σχεδόν αδρανή και στα πρόσμικτα με ποζολανικές ή λανθάνουσες υδραυλικές ιδιότητες.

### ***Βελτιωτικά πρόσθετα (admixtures)***

Είναι υλικά που προστίθενται στο σκυρόδεμα σε μικρές, σε σχέση με τη μάζα του τσιμέντου, ποσότητες, κατά τη διεργασία της ανάμιξης, με στόχο την τροποποίηση των ιδιοτήτων του φρέσκου ή του σκληρυμένου σκυροδέματος.

## **1.2. ΑΥΤΟΣΥΜΠΥΚΝΟΥΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ**

### **1.2.1. Περίληψη**

Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1980, ένας αριθμός κρατών, μεταξύ των οποίων η Ιαπωνία, η Σουηδία και η Γαλλία, ανέπτυσαν μίγματα σκυροδέματος τα οποία είχαν την ιδιότητα της αυτοσυμπύκνωσης. Αυτά τα αυτοσυμπυκνούμενα σκυροδέματα (SCC ή ΑΣΣ) χαρακτηρίζονται από: εξαιρετική ρευστότητα, τυπικά 700 – 750 mm τιμή εξάπλωσης. Αυτού του τύπου το σκυρόδεμα τοποθετείται πλήρως συμπυκνωμένο δίχως τη χρήση εξωτερικής ενέργειας (δόνηση) και χωρίς να υφίσταται απόμιξη. Η εισχώρησή του στη αγορά του σκυροδέματος φτάνει το 5% στην Ιαπωνία και το 15% στη Σουηδία και τη Δανία. Το ΑΣΣ έχει οικονομικά, κοινωνικά και περιβαλλοντικά οφέλη μπροστά στο συμβατικό δονούμενο σκυρόδεμα.

Το ΑΣΣ παρασκευάζεται από τα ίδια βασικά συστατικά με το συμβατικό σκυρόδεμα αλλά με την προσθήκη ενός πρόσθετου ρυθμιστή ιξώδους (αναστολέας απόμιξης) και υψηλά επίπεδα υπερπλαστικοποιητών ώστε να αποκτήσει υψηλή εργασιμότητα. Το περιεχόμενο σε τσιμέντο (υδραυλικός συνδέτης), είναι σχετικά υψηλό (περίπου στα 500 kg/m<sup>3</sup>). Η αναλογία λεπτόκοκκων προς χονδρόκοκκα αδρανή είναι αυξημένη, με τα λεπτόκοκκα να καταλαμβάνουν πολλές φορές το 50% του συνολικού όγκου των αδρανών. Λεπτόκοκκα υλικά, όπως ο ασβεστόλιθος, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν προσθήκη στο τσιμέντο. Οι αντοχές του αυθημερόν προσεγγίζουν τα 30 – 40 N/mm<sup>2</sup>, ενώ σε δυο μέρες μπορεί να υπερκεραστεί το φράγμα των 100 N/mm<sup>2</sup>, επιτρέποντας έτσι την ευκολότερη και ασφαλέστερη αφαίρεση των καλουπιών.

### **1.2.2. Γενικά**

Με τον όρο «Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυρόδεμα» προσδιορίζεται μια ειδική κατηγορία σκυροδέματος που κατά την έγχυσή του σε καλούπι ή

ξυλότυπο, πληρώνει όλα τα κενά και τις κοιλότητες χωρίς να απαιτείται κάποιας μορφής συμπύκνωση ή δόνηση. Δηλαδή διέρχεται μέσω του οπλισμού χρησιμοποιώντας μόνο το ίδιο βάρος.

Το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα χαρακτηρίζεται κυρίως από την υψηλή ρευστότητά του όταν αυτό βρίσκεται ακόμα στη νωπή του φάση. Κατ' αυτή την έννοια, διέρχεται μέσα από εμπόδια όπως πυκνός οπλισμός, στενώσεις ξυλοτύπου, και απομακρυσμένες από το σημείο έγχυσης περιοχές του ξυλοτύπου, χωρίς υποβοήθηση, μέσω αντλίας για παράδειγμα. Επιπλέον, αυτό επιτυγχάνεται με ταχύτητα πολύ υψηλή και ίσως αδιανόητη για το συμβατικό σκυρόδεμα.

Ένα ακόμη χαρακτηριστικό του αυτοσυμπυκνούμενου είναι η μεγάλη αντίσταση στο διαχωρισμό. Συγκεκριμένα, είναι η ικανότητα που έχει να εγγέεται και να ρέει μέσα στους ξυλότυπους διατηρώντας πάντα μια ομοιόμορφη κατανομή των συστατικών του (πάστα, αδρανή κλπ). Η αντίσταση στο διαχωρισμό έχει τρεις υποπεριπτώσεις, οι οποίες αναφέρονται σε διαφορετικές φάσεις της εφαρμογής του σκυροδέματος. Πρώτα, παρατηρείται η αντίσταση στον εξωτερικό διαχωρισμό, δηλαδή κατά τη φάση της διάστρωσης. Ακολούθως, αφού το σκυρόδεμα ρέει και προσκρούει στον οπλισμό που υπάρχει εσωτερικά του καλουπιού, εμφανίζεται η αντίσταση στο διαχωρισμό κατά τη ροή. Τέλος, με την πλήρωση του καλουπιού, εμφανίζεται η αντίσταση στον εσωτερικό διαχωρισμό, όπου αποφεύγεται η καθίζηση των χονδρόκοκκων αδρανών στον πυθμένα και η εμφάνιση νερού στην επιφάνεια. Αυτή η ιδιότητα της αντίστασης στο διαχωρισμό, είναι μια από τις πλέον σημαντικές απαιτήσεις σε ένα αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα. Είναι το βαθύτερο αίτιο της υψηλής ρευστότητας, αφού επιτρέπει στο σκυρόδεμα να ρέει μεταξύ πυκνού οπλισμού ή διατομών περίπλοκης γεωμετρίας δίχως δυσκολία. Αν δεν ικανοποιούσε την αντίσταση στο διαχωρισμό, τα χονδρόκοκκα αδρανή θα συγκεντρώνονταν κοντά στον οπλισμό, δυσχεραίνοντας έτσι τη ροή του μίγματος.

Συγκεντρωτικά, τα οφέλη που προκύπτουν από τη χρήση του ΑΣΣ, το οποίο έχει χαρακτηριστεί ως “η πιο επαναστατική πρόοδος στις κατασκευές με σκυρόδεμα τις τελευταίες δεκαετίες”, είναι τα επόμενα:

- *Ταχύτερη κατασκευή*
- *Μείωση του απαιτούμενου εργατικού δυναμικού στο έργο*
- *Καλύτερες τελικές επιφάνειες*
- *Ευκολότερη τοποθέτηση*
- *Αυξημένες αντοχές*
- *Μεγαλύτερη ευελιξία στη σχεδίαση*
- *Μειωμένα επίπεδα θορύβου, απουσία δόνησης*
- *Ασφαλέστερο περιβάλλον εργασίας*

### **1.2.3. Ιστορία**

Το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα και η τεχνολογία του πρωτοεμφανίστηκαν στην Ιαπωνία, το έτος 1983. Πρωτοστάτης ήταν ο Okamura, ο οποίος έθεσε τα θεμέλια για έναν τύπο σκυροδέματος ο οποίος, χάρη στις υψηλές προδιαγραφές του, θα προοριζόταν για μεγάλα και ποιοτικά έργα, επιδεικνύοντας την αυξημένη αντοχή του και την μεγάλη διάρκεια στο χρόνο. Δυο άλλοι Ιάπωνες ερευνητές, οι Ozawa και Mackawa, από το πανεπιστήμιο του Τόκιο, κατέθεσαν τις έρευνές τους περί θεμελιωδών αρχών και κανονισμών που διέπουν το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα. Η Ευρώπη, κάνει την πρώτη της επαφή με το συγκεκριμένο τύπο σκυροδέματος στις αρχές της δεκαετίας του 1990, όταν στη Σκανδιναβία χρησιμοποιείται για προκατασκευασμένα στοιχεία.

#### 1.2.4. Πρόσμικτα λεπτόκοκκα υλικά (additives) στο ΑΣΣ

Με σκοπό την εξασφάλιση ικανοποιητικής εργασιμότητας και μείωσης του κινδύνου απόμιξης (διαχωρισμός ή εξίδρωση), το ΑΣΣ περιέχει περισσότερη κονία από το συμβατικό (περίπου  $500\text{kg/m}^3$ ). Για να αποφευχθούν όμως τα προβλήματα που προκύπτουν από την μεγάλη θερμότητα ενυδάτωσης, η κονία είναι συνδυασμός δύο ή τριών εξαιρετικά λεπτόκοκκων υλικών. Η επιλογή του τύπου κάθε πρόσμικτου γίνεται με βάση τις επιθυμητές ιδιότητες στη νωπή αλλά και σκληρυμμένη φάση. Παρακάτω περιγράφονται τα κυριότερα χρησιμοποιούμενα πρόσμικτα για την παραγωγή ΑΣΣ.

##### *a. Ασβεστόλιθος (Limestone)*

Ο ασβεστόλιθος χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο στο σκυρόδεμα σαν λεπτόκοκκο πρόσμικτο, ενώ αποτελεί κύριο συστατικό του τσιμέντου για πολλά χρόνια. Εφαρμόζεται σε υψηλής απόδοσης σκυροδέματα καθώς επίσης σε μεσαίας ή και χαμηλής. Έχουν διεξαχθεί έρευνες που σχετίζονται με τις μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος που εμπεριέχει ασβεστόλιθο, ώστε να διασφαλιστεί η αξιοπιστία του που θα οδηγήσει σε αυξημένη χρήση του. Ακόμα, υπάρχουν πολυάριθμες έρευνες πάνω στην ανθεκτικότητα του ασβεστόλιθου όταν αυτός υπόκειται σε δυσμενείς συνθήκες. Οι περισσότερες από αυτές τις μελέτες επικεντρώθηκαν στην επίδραση του ασβεστόλιθου στην ανθεκτικότητα του σκυροδέματος.

Συγκεκριμένα, αναφέρεται ότι η χρήση μεγάλων ποσοτήτων ασβεστολιθικών υλικών στο σκυρόδεμα, ενδέχεται να οδηγήσει σε αύξηση της πιθανότητας προσβολής από θειικά ιόντα, τα οποία σχετίζονται με την ανάπτυξη κρυστάλλων θωμασίτη. Συνήθως, ο θωμασίτης σχηματίζεται στο σύστημα όταν το σκυρόδεμα που περιέχει ασβεστόλιθο υπόκειται σε προσβολή από θειικά ιόντα, σε χαμηλές θερμοκρασίες της τάξεως των  $5^{\circ}\text{C}$ , σε περιβάλλον υψηλής υγρασίας. Πολλοί μελετητές έχουν προσπαθήσει να



αποκαλύψουν τον μηχανισμό σχηματισμού θωμασίτη από προσβολή θεικών σε πάστα, κονίαμα ή σκυρόδεμα, στο εργαστήριο και επί τόπου. Παρ' όλα αυτά οι τελευταίες μελέτες αναφέρουν ότι ο θωμασίτης μπορεί να σχηματιστεί και σε θερμοκρασία δωματίου.

Αν και τα μικρά επίπεδα σχηματισμού θωμασίτη δεν συνδέεται πάντα με την επίθεση των θεικών (thaumasite sulfate attack TSA), η TSA μπορεί να επηρεαστεί από τον τύπο των κατιόντων που συνοδεύουν τα  $\text{SO}_4^{2-}$  ιόντα, καθώς και από τη συγκέντρωση του διαλύματος σε θειικά.

### ***b. Ποζολάνες (Pozzolane) και ποζολανική αντίδραση***

Τα ποζολανικά υλικά είναι φυσικά ή βιομηχανικά υλικά, πυριτικής, αργιλοπυριτικής ή συνδυασμού των προηγούμενων σύστασης. Σύμφωνα με το πρότυπο prEN 197-1 ταξινομούνται σε διαφορετικές κατηγορίες από άλλα υλικά με ποζολανικές ιδιότητες όπως η πυριτική παιπάλη (silica fume) και οι ιπτάμενες τέφρες.

Τα ποζολανικά υλικά δεν υφίστανται σκλήρυνση όταν αναμιγνύονται με το νερό από μόνα τους. Η λεπτή άλεσή τους είναι ο παράγοντας που μπορεί να οδηγήσει σε αντίδραση με το  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  που προκύπτει από την ενυδάτωση των συστατικών του clinker, παρουσία νερού σε συνθήκες περιβάλλοντος, σχηματίζοντας ασβεστοπυριτικές και ασβεστοαργλικές ενώσεις, οι οποίες ευθύνονται για την ανάπτυξη αντοχών.

Η σύνθεση των ποζολανών αποτελείται από δραστικό  $\text{SiO}_2$ , που πρέπει να βρίσκεται σε ποσοστό μεγαλύτερο του 25% κ.β. και από  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Το υπόλοιπο περιέχει  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  και άλλα οξειδία με μικρή συμμετοχή του  $\text{CaO}$ .

Οι φυσικές ποζολάνες, P, είναι κυρίως ηφαιστιογενούς προέλευσης υλικά ή ιζηματογενή πετρώματα με κατάλληλη χημική και ορυκτολογική σύσταση. Αλεθόμενες, παρουσιάζουν ομοιότητες στη συμπεριφορά τους με τις ιπτάμενες τέφρες. Υλικά όπως τόφφοι, ζεόλιθοι, θηραϊκή γη, σχιστόλιθοι, περιλαμβάνονται στα υλικά προέλευσης των ποζολανών. Οι απαιτήσεις για

αυτά τα υλικά τίθενται από διεθνή πρότυπα και ομοιάζουν με τις αντίστοιχες για τις ιπτάμενες τέφρες

Οι βιομηχανικές ή τεχνητές ποζολάνες, Q, ορίζονται ως οι άργιλοι και οι σχιστόλιθοι που έχουν υποστεί θερμική κατεργασία και ενεργοποίηση, καθώς και οι ψυχθείσες στον αέρα σκωρίες από βιομηχανίες μολύβδου, χαλκού, ψευδαργύρου και σιδηροκραμάτων. Μια απαίτηση από αυτά τα υλικά, ιδιαίτερα κρίσιμη, είναι ότι δεν πρέπει να αυξάνουν αισθητά την απαίτηση του τσιμέντου σε νερό. Ακόμα, δεν πρέπει να επιδρούν αρνητικά στην ανθεκτικότητα του σκυροδέματος ή του κονιάματος και να μην μειώνουν τις αντοχές του οπλισμού σε διάβρωση.

Ο όρος “ποζολανική αντίδραση” αναφέρεται σε όλες εκείνες τις αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα μεταξύ των ενεργών συστατικών της ποζολάνης, του υδροξειδίου του ασβεστίου  $\text{Ca(OH)}_2$  και του νερού. Ο όρος αυτός, παρόλο που αποτελεί μια προσέγγιση, τυγχάνει αποδοχής σε τεχνικό και πρακτικό επίπεδο. Παρά το γεγονός ότι παρουσιάζεται μεγάλη δυσκολία στην παρακολούθηση της εξέλιξης των ενεργών φάσεων της ποζολάνης κατά τη διαδικασία της ενυδάτωσης, η μείωση του ελεύθερου ασβεστίου στο σύστημα, καθώς και η αύξηση της διάλυσης των πυριτικών και των αργιλικών σε οξύ, δίνουν μια καλή εκτίμηση της προόδου της ποζολανικής αντίδρασης.

Δύο παράμετροι που είναι άρρηκτα συνδεδεμένοι με την ποζολανική αντίδραση είναι το μέγιστο ποσοστό ασβέστη που μπορεί να δεσμεύσει, καθώς και ο ρυθμός με τον οποίο γίνεται η δέσμευση. Οι παράμετροι αυτοί εξαρτώνται κυρίως από τη φύση της ποζολάνης και συγκεκριμένα από την ποσότητα και ποιότητα ενεργών φάσεων που περιέχει. Η ετερογένεια αλλά και τα πολύπλοκα φαινόμενα που συμβαίνουν κατά την ενυδάτωση των ποζολανικών υλικών, καθιστούν αδύνατη την ανάπτυξη ενός μοντέλου για την ποζολανική αντίδραση, περιορίζοντας την ανάλυσή της σε ταυτοποίηση τάσεων.

Όταν το νερό βρίσκεται σε περίσσεια, το ποσοστό του δεσμευμένου ασβέστη καθορίζεται από τον τύπο της ποζολάνης και η τιμή του ποικίλει σημαντικά. Μια απλή ένδειξη για αυτή την πρόταση, είναι ότι μετά από 180

ημέρες προόδου της αντίδρασης, το ποσοστό του δεσμευμένου ασβέστη κυμαίνεται μεταξύ 50-100% της μάζας του. Οι παράγοντες που καθορίζουν αυτό το ποσοστό είναι οι ακόλουθοι:

- *Η φύση των ενεργών φάσεων*
- *Το περιεχόμενό τους σε ποζολάνη*
- *Το περιεχόμενό τους σε δραστικό  $\text{SiO}_2$*
- *Η αναλογία ασβέστη/ποζολάνης στο μίγμα*

Από την άλλη, ο ρυθμός ενυδάτωσης των ποζολανικών υλικών εξαρτάται από την επόμενη σειρά παραγόντων:

- *Ειδική επιφάνεια ποζολάνης*
- *Αναλογία νερού/στερεές φάσεις στο μίγμα*
- *Θερμοκρασία*

Από τη μελέτη της ποζολανικής αντίδρασης εξάγεται μια σειρά από συμπεράσματα, τα οποία παρουσιάζονται ευθύς αμέσως:

- Οι ποζολάνες που προέρχονται από ζεολιθικά ορυκτά είναι πιο ενεργές από τις υαλώδεις, των οποίων η ικανότητα δέσμευσης ασβέστη μεταβάλλεται με το είδος του υλικού.
- Διατηρουμένων των υπολοίπων ιδιοτήτων σταθερών, η αύξηση του ποσοστού του δεσμευμένου ασβέστη επιφέρει αύξηση του περιεχομένου σε ενεργές φάσεις και μείωση στο ποσοστό των αδρανών ή κρυσταλλικών φάσεων (μαγνησίτης, χαλαζίας, μουλίτης κλπ).
- Το ποσό του δεσμευμένου ασβέστη σχετίζεται με το περιεχόμενο των ενεργών φάσεων σε  $SiO_2$ , το οποίο κυμαίνεται μεταξύ 45-75% στις ηφαιστιακές υάλους και τις ιπτάμενες τέφρες, αλλά φτάνει και ξεπερνά σε ορισμένες περιπτώσεις και το 95% στην ενεργή, άμορφη μικροπυριτία.
- Αυτό σημαίνει ότι, εκτός από το περιεχόμενο σε πυριτικά, στον προσδιορισμό της ποζολανικής δράσης, διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο και άλλοι δομικοί παράγοντες. Οι ιπτάμενες τέφρες και συγκεκριμένα οι υαλώδεις φάσεις τους, ενδέχεται να έχουν διαφορετική σύσταση και δομή, προκαλώντας διαφορετικά επίπεδα δραστηριότητας.
- Η αύξηση της αναλογίας ασβέστη/ποζολάνης εντός ορίων επιφέρει αύξηση στο ποσό του δεσμευμένου ασβέστη.
- Η ποσότητα του δεσμευμένου ασβέστη εξαρτάται από τη διάρκεια της ωρίμανσης, ενώ ο ρυθμός καθορίζεται από το είδος της ποζολάνης. Μετά από ωρίμανση 90 ημερών, η αντίδραση των ιπτάμενων τεφρών που είναι τεχνητές ποζολάνες δεν έχει ολοκληρωθεί ακόμα, ενώ των φυσικών ποζολανών τείνει προς την ολοκλήρωσή της.
- Η ειδική επιφάνεια της ποζολάνης καθορίζει κυρίως τη βραχυπρόθεσμη δράση της, ενώ η χημική και ορυκτολογική της σύσταση την μακροπρόθεσμη. Συγκεκριμένα, ο ρυθμός της δράσης είναι ανάλογος με το τετράγωνο της ειδικής επιφάνειας, δηλαδή όσο μεγαλύτερη η ειδική επιφάνεια (άρα και η λεπτότητα), τόσο πιο γρήγορη η αντίδραση με τον ασβέστη.

- Η αύξηση της περιεκτικότητας του μίγματος σε νερό αυξάνει το ρυθμό δέσμευσης του ασβέστη. Άρα, στις πάστες, η ποζολανική αντίδραση είναι πολύ βραδεία και δεν ολοκληρώνεται ακόμη και με την πάροδο κάποιων ετών.
- Η αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνει το ρυθμό της δράσης. Ωστόσο, όταν η θερμοκρασία ξεπεράσει την τιμή των 70°C, η ποσότητα του δεσμευμένου ασβέστη τείνει να σταθεροποιηθεί ή ακόμα και να μειωθεί. Παρόμοιο φαινόμενο παρατηρείται στις ιπτάμενες τέφρες στους 60°C περίπου και η πιθανή εξήγηση είναι η ποικιλία στη σύνθεση των ενυδατωμένων φάσεων.
- Η προσθήκη γύψου στο σύστημα ποζολάνης – ασβέστη – νερού βελτιώνει το ρυθμό δέσμευσης του ασβέστη.

### *c. Σκωρία Υψηκαμίνων (Furnace Slag)*

Η χημική σύσταση των σκωριών εξαρτάται από τις προσμίξεις στα σιδηρομεταλλεύματα, το βαθμό καθαρότητας του σβεστολίθου ή του δολομίτη που θα χρησιμοποιηθεί για τα συλλιπάσματα και τέλος από την περιεκτικότητα σε ανόργανα συστατικά του κωκ που θα χρησιμοποιηθεί ως μέσο αναγωγής. Οι αναλογίες των κύριων συστατικών CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO κυμαίνονται αντιστοίχως μεταξύ 30-50%, 27-40%, 5-33%, 1-21%. Επιπλέον οι σκωρίες εμπεριέχουν Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> σε ποσοστό <1%, λιγότερο από 2% MnO, ένα μέγιστο ποσοστό του 3% για καθένα από τα συστατικά TiO<sub>2</sub> και S, το σύνολο των Na<sub>2</sub>O και K<sub>2</sub>O κυμαίνεται στο 1-3%, ενώ το Cl ακόμη χαμηλότερα στο 0,20-0,25%.

Η χημική τους σύσταση και το ποσοστό της υαλώδους φάσης είναι τα δύο κύρια συστατικά που προσδιορίζουν τις υδραυλικές ιδιότητες των σκωριών.

Οι κόκκοι των σκωριών είναι γωνιώδεις και συμπεριλαμβάνουν ακανόνιστου σχήματος αμμώδη υλικά με μέγεθος σωματιδίων της τάξης των

μερικών mm. Η υδραυλική δραστηριότητα των σκωριών αυξάνεται όταν αυτές αλέθονται σε μεγέθη κόκκου μικρότερα των 45μm, ενώ παρουσιάζει την ιδιομορφία του να αλέθεται εύκολα μέχρι τα 100-150μm αλλά πολύ δύσκολα από κει και κάτω. Αυτός είναι και ο λόγος που η σκωρία δε δύναται να συμμετέχει σε διεργασίες συνάλεσης υλικών για την παραγωγή σύνθετων τσιμέντων.

#### *d. Ιπτάμενη Τέφρα (Fly Ash)*

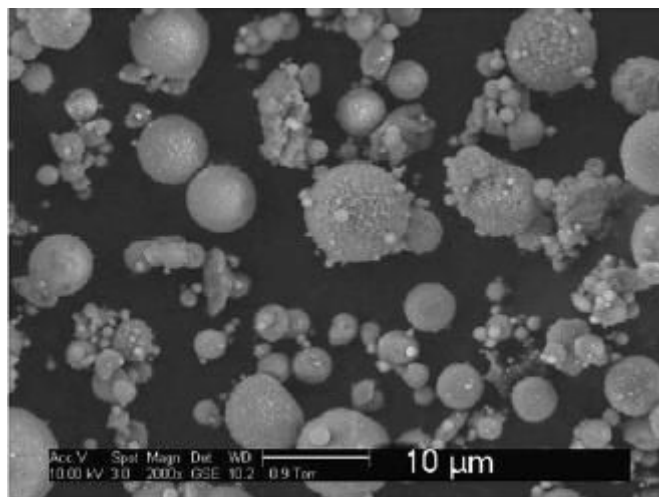
Η χημική σύσταση των ιπτάμενων τεφρών (IT) εξαρτάται από τη σύσταση σε ανόργανα συστατικά του ανθρακοφόρου κοιτάσματος. Τα γενικότερα χαρακτηριστικά του όμως, που έχουν και άμεση επίδραση στην εκδήλωση των ιδιοτήτων τους ως πρόσμικτα στο τσιμέντο ή στο σκυρόδεμα, εξαρτώνται από τις συνθήκες καύσης (θερμοκρασία φλογοθαλάμων, ατμόσφαιρα μέσα στο χώρο καύσης κλπ), τη λειτουργική κατάσταση των διατιθέμενων μέσων συλλογής (φίλτρα), καθώς και από άλλους παράγοντες που σχετίζονται με τη λειτουργία των μονάδων και είναι δεδομένοι σε κάθε περίπτωση.

Οι τέφρες διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Η τέφρα που λαμβάνεται από ανθρακίτες και γενικότερα από γαιάνθρακες με μεγάλο ποσοστό άνθρακα και αυξημένη θερμογόνο δύναμη, είναι γνωστή ως κανονική IT, ενώ η τέφρα που λαμβάνεται από την καύση κατώτερης γεωλογικής περιόδου ανθράκων, όπως είναι οι λιγνίτες, ονομάζεται “τέφρα υψηλού περιεχομένου σε ασβέστιο, TYA” (high calcium fly ash).

Στις πρώτες, όπου το συνολικό οξειδίο του ασβεστίου είναι μικρότερο του 10%, επικρατούν ενώσεις αργιλοπυριτικής σύστασης (κυρίως  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$  και  $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ), ενώ στις δεύτερες, με το CaO μεταξύ 10 και 35% επικρατούν ενώσεις ασβεσταργιλικής και ασβεστοπυριτικής σύστασης ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ,  $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ ) ή ενίοτε και θειοασβεσταργιλικής σύστασης.

Κατά ASTM (C-618), οι κανονικές τέφρες χαρακτηρίζονται ως τύπου F, ενώ οι ΤΥΑ ως τύπου C, με αντίστοιχες σχέσεις  $(Al_2O_3 + SiO_2 + Fe_2O_3) > 70\%$  και  $(Al_2O_3 + SiO_2 + Fe_2O_3) > 50\%$ .

Τα χαρακτηριστικά του μεγέθους και του σχήματος των σωματιδίων εξαρτώνται από τους παράγοντες που αναφέρθηκαν στην αρχή της παραγράφου. Η πλειονότητα των σωματιδίων της ΙΤ είναι υαλώδη συμπαγή ή κοίλα σφαιρικού σχήματος. Οι ΙΤ συνίστανται από απλές και συνθετότερες σφαίρες που περιέχουν μικρότερους σφαιρικούς κόκκους μέσα τους. Οι άδειες κοίλες σφαίρες ονομάζονται κενόσφαιρες ενώ οι σφαίρες που περιέχουν μικρότερες μέσα τους ονομάζονται πλευρόσφαιρες. Για τη χρήση των ΙΤ στη βιομηχανία τσιμέντου επιδιώκεται η πλειονότητα των σωματιδίων να διέρχεται από το κόσκινο των 45μm, ενώ η ειδική επιφάνεια κατά Blaine να κυμαίνεται μεταξύ 2000 και 4000 cm<sup>2</sup>/g. Μεγαλύτερος βαθμός άλεσης μειώνει το μέγεθος των σωματιδίων, σπάει τις κενόσφαιρες και απελευθερώνει τα μικρότερα σωματίδια που βρίσκονται εγκλεισμένα στις πλευρόσφαιρες.



Εικόνα 3: Φωτογραφία κόκκων ιπτάμενης τέφρας με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM).

Η επιφάνειά τους είναι λεία μόνο όταν προέρχονται από έψηση σε υψηλή θερμοκρασία κατά κανόνα ομοιογενοποιημένου καυσίμου. Όσο η θερμοκρασία μειώνεται, το ακανόνιστο σχήμα του χαλαζία επηρεάζει τη σφαιρικότητα των σωματιδίων που καλύπτονται από  $Fe_2O_3$ ,  $CaSO_4$  και θειικά αλκάλια. Η χρήση σύγχρονων συστημάτων αποκονίωσης, όπως

ηλεκτροστατικά φίλτρα και σακόφιλτρα, συνεισφέρει στη μείωση της τραχύτητας των σωματιδίων της τέφρας.

Η υψηλού ασβεστίου τέφρα που έχει εκτεθεί σε υψηλές θερμοκρασίες, περιέχει χαλαζία, μουλίτη και C<sub>3</sub>A. Σε μικρότερες θερμοκρασίες συνυπάρχουν επίσης CaO, C<sub>3</sub>A<sub>3</sub> και CaSO<sub>4</sub>.

Η δομή της υαλώδους φάσης στις κανονικές τέφρες είναι παρόμοια με αυτή του χριστοβαλίτη (SiO<sub>2</sub>), ενώ στις ΤΥΑ με αυτή του μελιλίτη.

Στην Ελλάδα η ιπτάμενη τέφρα παράγεται στους ατμοηλεκτρικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος της ΔΕΗ στην Πτολεμαΐδα και στην Μεγαλόπολη. Η τέφρα που προέρχεται από την Πτολεμαΐδα ανήκει στην κατηγορία C, δηλαδή περιέχει υψηλά ποσοστά οξειδίου του ασβεστίου CaO. Αντίθετα, εκείνες οι τέφρες που προέρχονται από τη Μεγαλόπολη, παρουσιάζουν μεγάλη περιεκτικότητα σε οξείδια του πυριτίου SiO<sub>2</sub>.

Στον επόμενο Πίνακα φαίνονται οι αναλυτικές χημικές συστάσεις των Ελληνικών τεφρών.

*Πίνακας 2: Χημική σύσταση Ελληνικών τεφρών.*

Στοιχείο	Ι.Τ. Πτολεμαΐδας %	Ι.Τ. Μεγαλόπολης %
SiO <sub>2</sub>	25,40	48,50
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,80	22,00
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,80	7,80
CaO	39,60	12,30
MgO	2,90	2,60
SO <sub>3</sub>	7,75	2,70
K <sub>2</sub> O	0,85	1,75
Na <sub>2</sub> O	0,65	0,45
A.Π.	4,60	1,80
A.Υ.	20,00	46,00
(βάση ελληνικών κανονισμών)		
CO <sub>2</sub>	2,50	0,30
CaO	14,00	ίχνη

Όσον αφορά τις χρήσεις της ιπτάμενης τέφρας, δεν παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλία εκτός της βιομηχανίας τσιμέντου. Ακόμα μία χρήση τους είναι στα ορυχεία, όπου δρα βελτιωτικά προς το έδαφος, εγκυμονώντας όμως



κινδύνους για το περιβάλλον. Στη διαχείριση αποβλήτων αποτελεί αδρανοποιητικό παράγοντα για τα τοξικά στοιχεία, ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως πρόσθετο στη βιομηχανία πολυμερών.

Διάφορες μελέτες γίνονται για την επέκταση των χρήσεων της ιπτάμενης τέφρας. Κάποιες από αυτές την υποδεικνύουν σαν ένα καλό υποκατάστατο του ενεργού άνθρακα στα φίλτρα. Σε αυτό οδηγούν οι μακροπόροι που σχηματίζονται στη δομή της ιπτάμενης τέφρας από την επίδραση του αργιλίου και του πυριτίου στον άκαυστο άνθρακα. Το υλικό αυτό, αφού διαχωριστεί από την υπόλοιπη τέφρα, αποτελεί βελτιωτικό για πλαστικά και άλλου είδους υλικά, αυξάνοντας τη χρηστική και εμπορική τους αξία.

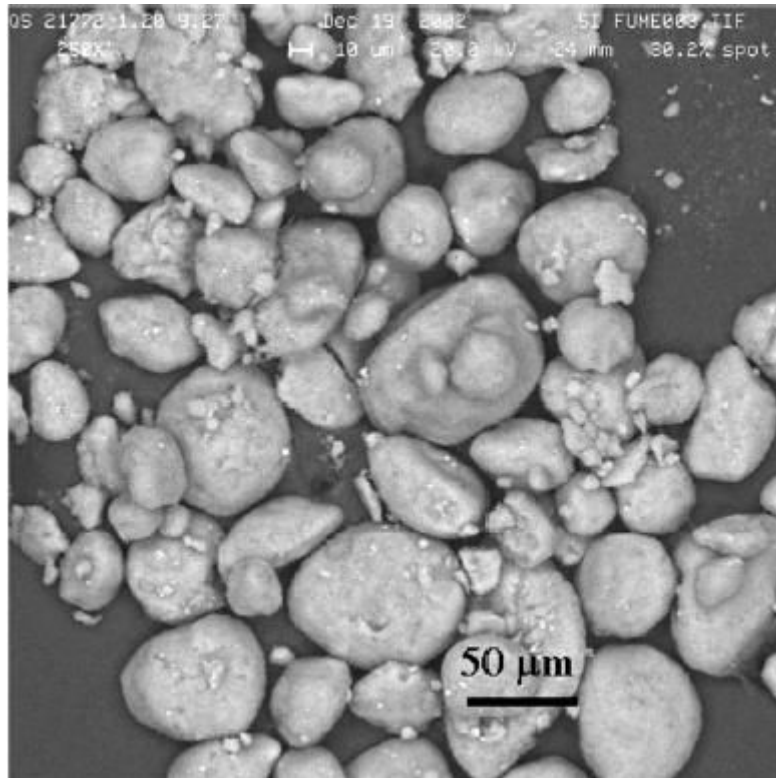
Η ανάμιξη της τέφρας με ασβεστόλιθο και λάσπες υπονόμων, για τη δημιουργία ειδικών λιπασμάτων με κύριο στόχο τις άγονες περιοχές της Αφρικής, αποτελεί αντικείμενο έρευνας με αξιόλογα και ενθαρρυντικά αποτελέσματα.

Η ιπτάμενη τέφρα χρησιμοποιείται συχνά στο αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα, επειδή οδηγεί στην απαιτούμενη ρεολογία ώστε να δημιουργηθούν υψηλής ποιότητας τελικές επιφάνειες χωρίς την επιβολή δόνησης. Η ρεολογία του κλάσματος της κονίας πρέπει να είναι τέτοια ώστε να μπορεί να ρέει το υλικό γύρω και μέσα στα καλούπια και τον οπλισμό, καθώς επίσης και να αποβάλει τον εγκλεισμένο αέρα με χρήση μόνον του ίδιου βάρους του. Οι αναλογίες και η φύση των λεπτόκοκκων υλικών, τσιμέντο, ιπτάμενη τέφρα, λεπτόκοκκα αδρανή, έχουν σημαντική επίδραση στο τελικό σκυρόδεμα. Οι ιδιότητες της ιπτάμενης τέφρας να μειώνει το διαθέσιμο νερό για το υπόλοιπο μίγμα, καθώς και η επίδραση των σφαιρικών σωματιδίων της στο θιξοτροπικό χαρακτήρα του σκυροδέματος, την καθιστούν συχνά χρησιμοποιούμενη. Αυτή μειώνει το διαχωρισμό των χονδρόκοκκων αδρανών μέσα στη μήτρα της κονίας. Το επίπεδο της απόμιξης ορίζει τη διαφορά μεταξύ ενός καλώς και ενός κακώς σχεδιασμένου αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος. Ανάλογα την κατανομή των μεγεθών των σωματιδίων και το σχήμα των λεπτόκοκκων αδρανών, διάφορες αναλογίες ιπτάμενης τέφρας μπορούν να χρησιμοποιηθούν.

### *e. Πυριτική Παιπάλη (Silica Fume)*

Η σύσταση της πυριτικής παιπάλης δεν εξαρτάται μόνο από τις πρώτες ύλες και την παραγωγική διαδικασία της αναγωγής του χαλαζία με άνθρακα, αλλά και από την ποιότητα του ηλεκτροδίου και την καθαρότητα του άνθρακα. Το πυρίτιο στην πυριτική παιπάλη είναι συνήθως περισσότερο από 80%, ενώ το υλικό αυτό έχει το επιπλέον πλεονέκτημα ότι αν και είναι παραπροϊόν δεν μεταβάλλεται ουσιαστικά η σύστασή του. Το περιεχόμενο οξειδίου του πυριτίου είναι μεγαλύτερο στην πυριτική παιπάλη που προκύπτει από βιομηχανίες κραμάτων πυριτίου από την αντίστοιχη των βιομηχανιών κραμάτων σιδηροπυριτίου.

Η πυριτική παιπάλη αποτελείται κυρίως από άμορφη φάση και είναι σε λεπτό διαμερισμό, ενώ μερικές φορές περιέχει και μικρά ποσοστά χαλαζία. Η άμορφη φάση στην πυριτική παιπάλη δεν είναι υαλώδης σε αντίθεση με την άμορφη φάση που περιέχεται στις σκωρίες και τις τέφρες. Αυτό συμβαίνει γιατί η πυριτική παιπάλη προέρχεται από αντίδραση αερίου – αερίου, ενώ ως γυαλί ορίζεται μια ανόργανη ουσία που προέρχεται από ταχέως ψυχθέν τήγμα χωρίς κρυσταλλοποίηση. Έχει σφαιρικό σχήμα και το μεγαλύτερο μέρος του υλικού έχει μέγεθος 0,03-0,3μm, με μέσο μέγεθος σωματιδίων 0,1μm.



Εικόνα 4: Φωτογραφία κόκκων πυριτικής παιπάλης με SEM.

Η ειδική της επιφάνεια, μετρημένη με απορρόφηση αζώτου, είναι υψηλή και της τάξης των  $20\text{m}^2/\text{g}$ , είναι δηλαδή περίπου 15-40 φορές λεπτότερη από ότι οι σκωρίες και οι τέφρες.

Το πορώδες της συμπιεσμένης πυριτικής παιπάλης ανέρχεται στα 82%. Διαλύεται γρήγορα μέσα σε 30 λεπτά μετά την επαφή της με κορεσμένο διάλυμα  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  και η συγκέντρωση του  $\text{SiO}_2$  στο διάλυμα στην αρχή φτάνει τα 5-6ppm, ενώ στη συνέχεια και λόγω του σχηματισμού ένυδρων φάσεων μειώνεται στα 1-2ppm.

### 1.2.5. Χημικά πρόσθετα (admixtures) για το ΑΣΣ

Ρυθμίζοντας το περιεχόμενο του σκυροδέματος σε αδρανή και χρησιμοποιώντας έναν συνδυασμό χημικών και ορυκτών προσθέτων, το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα συμπεριφέρεται με τρόπο ο οποίος δεν παρατηρείται υπό κανονικές συνθήκες στο συμβατικό σκυρόδεμα. Αυτά τα

πρόσθετα, τα οποία τυπικά αποτελούνται από μεγάλο εύρος μειωτήρες νερού (high range water – reducing, HRWR, superplasticizers) και ρυθμιστές ιξώδους, συμφωνούν με τις προδιαγραφές της ASTM C494

Οι υψηλές δόσεις των HRWR παράγουν μίγματα με υψηλή ρευστότητα και επιτρέπουν μειωμένους λόγους νερού/λεπτόκοκκα (όπου τα λεπτόκοκκα για το ΑΣΣ μπορούν να θεωρηθούν όλα τα σωματίδια μικρότερα από 0,025cm, στα οποία περιλαμβάνονται κάποια λεπτόκοκκα αδρανή, το τσιμέντο, η ιπτάμενη τέφρα, ο ασβεστόλιθος, η σκωρία υφικαμίνων, και η πυριτική παιπάλη).

Χωρίς τους ρυθμιστές ιξώδους, το μίγμα θα έχει την τάση να εμφανίζει διαχωρισμό. Οι ρυθμιστές ιξώδους βελτιώνουν το ιξώδες των μιγμάτων, το οποίο με τη σειρά του μειώνει την τάση προς διαχωρισμό των αδρανών. Το τελικό μίγμα, όταν είναι κατάλληλα σχεδιασμένο, θεωρείται αυτοσυμπυκνούμενο ή αυτοεπιπεδούμενο. Συγκεκριμένα, ένα σκυρόδεμα για να θεωρηθεί ΑΣΣ θα πρέπει να επιδεικνύει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Το μίγμα θα πρέπει να ρέει εύκολα και να γεμίζει πλήρως τα διάκενα μεταξύ του οπλισμού και των τύπων με την επίδραση μόνο του ίδιου βάρους του, ελαχιστοποιώντας την εξάρτησή του από την εξωτερική δόνηση. Επίσης πρέπει να έχει αρκετά καλή σταθερότητα και συνεκτικότητα ώστε να ανθίσταται στο διαχωρισμό των αδρανών και του νερού.

Τα μίγματα που εμφανίζουν αυτά τα ποιοτικά χαρακτηριστικά, θα μειώνουν αισθητά την ανάγκη για δόνηση ή άλλα μέτρα συμπύκνωσης. Αυτό θα αυξάνει την ποιότητα και την αντοχή των προϊόντων, αφού τα προβλήματα που προκύπτουν από την ανεπαρκή δόνηση, είναι αδύνατο να διορθωθούν μετά τη σκλήρυνση του σκυροδέματος.

Ένα ακόμα χαρακτηριστικό των μιγμάτων του ΑΣΣ είναι ότι συμπεριφέρονται ως θιξοτροπικά, εννοώντας ότι τα μίγματα αυτά ρευστοποιούνται όταν αναδεύονται ή ανακινούνται, ενώ κατά την ανάπαυση τρέπονται πάλι σε μία ημιστερεά κατάσταση.

Σημαντικό είναι να τονιστεί ότι το ΑΣΣ είναι διαφορετικό από το “ρευστό σκυρόδεμα” (flowing concrete), όπως αυτό ορίζεται στα ACI<sup>1</sup> 212.3R, "Chemical Admixtures for Concrete, Chapter 5, και ASTM 1017, "Standard Specification for Chemical Admixtures for Use in Producing Flowing Concrete".

### ***a. Μειωτήρες Νερού (HRWR)***

Αρχικά, είναι υποκατηγορία των μειωτήρων νερού. Συχνά καλούνται και υπερπλαστικοποιητές (superplasticizers) και μειώνουν το υδατικό περιεχόμενο ενός δοθέντος μίγματος σκυροδέματος μεταξύ 12% και 25%. Οι μειωτήρες νερού χρησιμοποιούνται για την αύξηση της αντοχής του σκυροδέματος και τη μείωση της διαπερατότητας (permeability) μέσω της μείωσης του νερού που περιέχεται στο μίγμα. Ακόμα μπορούν να αυξήσουν την εξάπλωση, προσδίδοντας στο σκυρόδεμα την ικανότητα να ρέει πιο εύκολα χωρίς την περαιτέρω προσθήκη νερού. Αυτού του είδους τα πρόσθετα είναι απαραίτητα για τα σκυροδέματα υψηλής αντοχής και υψηλής απόδοσης, των οποίων τα μίγματα περιέχουν μεγάλες ποσότητες τσιμέντου και πυριτικής παιπάλης.

Για παράδειγμα, η προσθήκη μιας ποσότητας HRWR σε ένα μίγμα σκυροδέματος που παρουσιάζει εξάπλωση μεταξύ 75 και 100 mm θα δημιουργήσει ένα μίγμα με 200 mm εξάπλωση.

Τα πρότυπα που πρέπει να ακολουθούνται από αυτού του είδους τα πρόσθετα είναι τα ASTM C 494 και ASTM C 1017.

### ***b. Αερακτικά Πρόσθετα***

Τα αερακτικά πρόσθετα είναι υγρά χημικά τα οποία προστίθενται στο σκυρόδεμα κατά την επεξεργασία της νωπής φάσης, έτσι ώστε να

---

<sup>1</sup> American Concrete Institute

δημιουργήσουν μέσα στον όγκο του φυσαλίδες που περιέχουν αέρα. Αυτές οι φυσαλίδες συμβάλουν σημαντικά στην αύξηση της αντοχής του σκυροδέματος και ιδιαίτερα στην αντίσταση κατά την ψύξη και απόψυξη. Η παρουσία τους στη νωπή φάση, διευκολύνει την εργασιμότητα του σκυροδέματος και αποτρέπει το διαχωρισμό του μίγματος.

Ο όγκος του εγκλεισμένου αέρα πρέπει να κυμαίνεται από 4% έως 7% του όγκου του σκυροδέματος (ανάλογα και το μέγεθος των χονδροκόκκων αδρανών), όταν αυτό χρησιμοποιείται σε χώρους που υπόκεινται σε σημαντικές μεταβολές θερμοκρασίας. Σημειωτέον ότι η χρήση τους δεν είναι απαραίτητη σε σκυρόδεμα που προορίζεται για εσωτερικούς χώρους, μιας και δεν υπόκειται σε κύκλους ψύξης – απόψυξης.

Σε μίγματα με υψηλό περιεχόμενο σε τσιμέντο, η χρήση αερακτικών μειώνει αισθητά την αντοχή τους (περίπου 5% για κάθε 1% εγκλεισμένου αέρα). Αντίθετα, σε σκυροδέματα με χαμηλό ποσοστό τσιμέντου, ενδέχεται να αυξήσουν κάπως την αντοχή, λόγω των μειωμένων απαιτήσεων σε προσθήκη νερού προς αύξηση της εξάπλωσης.

Τα αερακτικά πρόσθετα θα πρέπει να είναι σύμφωνα με τις προδιαγραφές που ορίζει ο ASTM C 260.

### *c. Επιβραδυντές*

Οι επιβραδυντές είναι χημικά που καθυστερούν την αρχική τοποθέτηση του σκυροδέματος κατά περίπου μία ώρα. Χρησιμοποιούνται σε μεγάλα έργα ή όταν η σκυροδέτηση γίνεται παρουσία υψηλών θερμοκρασιών. Με αυτόν τον τρόπο επεκτείνεται ο χρόνος που το σκυρόδεμα μπορεί να δεχθεί επεμβάσεις όσον αφορά την τοποθέτηση και το φινίρισμα. Οι περισσότεροι από τους επιβραδυντές λειτουργούν και ως μειωτήρες νερού.

Το πρότυπο που πρέπει να ακολουθείται είναι το ASTM C 494.

#### *d. Επιταχυντές*

Οι επιταχυντές προκαλούν ταχεία συμπύκνωση στο σκυρόδεμα, αυξάνοντας το ρυθμό που αυτό αποκτά αντοχή. Δεν λειτουργούν τόσο σαν αντιψυκτικά πρόσθετα, όσο σαν μέσο ταχείας απόκτησης αντοχής με ταυτόχρονη μείωση του χρόνου συμπύκνωσης. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές όπου χρειάζεται μείωση του χρόνου (δρόμος που πρέπει να δοθεί γρήγορα στην κυκλοφορία), και απαιτείται γρήγορη αφαίρεση των τύπων.

Υπάρχουν δυο τύποι επιταχυντών, βασισμένων στο χλώριο ή όχι. Ένα από τα πιο φθηνά και αποδοτικά πρόσθετα της κατηγορίας αυτής είναι το χλωριούχο ασβέστιο, που είναι διαθέσιμο είτε σε υγρή μορφή είτε σε νιφάδες. Για το μη οπλισμένο σκυρόδεμα, το χλωριούχο ασβέστιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ποσοστό έως και 2% κατά βάρος τσιμέντου. Στο οπλισμένο με χάλυβα σκυρόδεμα, τα ποσοστά είναι πολύ χαμηλότερα, μιας και υπάρχουν ανησυχίες για διάβρωση του οπλισμού από τα χλωριόντα. Περαιτέρω, όταν ο οπλισμός αποτελείται από αλουμίνιο ή κάποιο γαλβανισμένο μέταλλο, απαιτείται η χρήση μη – χλωριούχων επιταχυντών.

#### **1.2.6. Σύνθεση ΑΣΣ**

Η σύνθεση του ΑΣΣ πρέπει να ικανοποιεί όλες τις απαιτήσεις για το νωπό και για το σκληρυμένο σκυρόδεμα.

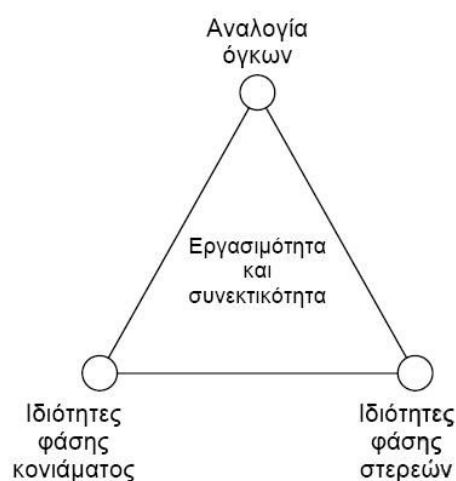
Ως μέσο για να σχεδιαστούν οι ρεολογικές ιδιότητες του ΑΣΣ χρησιμοποιείται το προσομοίωμα στερεών – πάστας, σύμφωνα με το οποίο η φάση της πάστας περιβάλλει τη φάση των στερεών και γεμίζει όλους τους κενούς χώρους.

Το ελεύθερο νερό, τα πρόσμικτα και όλα τα σωματίδια με μέγεθος μικρότερο από 0,125mm αποτελούν την πάστα του τσιμέντου, η οποία θεωρείται ιξώδες ρευστό και συγκεκριμένα παρουσιάζει συμπεριφορά τύπου Bingham.

Από την άλλη, η φάση των στερεών αποτελείται από όλα τα σωματίδια με μέγεθος μεγαλύτερο των 0,125mm και το νερό που απορροφάται από αυτά και θεωρείται φάση με ιδιότητες τριβής. Το απορροφούμενο νερό από τα σωματίδια αυτής της φάσης δε συμμετέχει στις ρεολογικές ιδιότητες του ΑΣΣ. Η χρήση του μοντέλου στερεών – πάστας δε συνεπάγεται ότι το κλάσμα των αδρανών που συγκρατείται στο κόσκινο των 0,125mm είναι διαχωρισμένο από το αντίστοιχο πέρασμα στις διαδικασίες παραγωγής ΑΣΣ, μολονότι η διάκριση αυτή χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς κατά το στάδιο του σχεδιασμού.

Το περιεχόμενο σε χονδρόκοκκα αδρανή πρέπει να είναι σε τέτοια επίπεδα έτσι ώστε κάθε μονάδα αδρανούς να λιπαίνεται επαρκώς με το μίγμα της τσιμεντόπαστας με τα λεπτόκοκκα αδρανή. Κατ' αυτόν τον τρόπο αυξάνεται η ικανότητα ροής και μειώνεται ο κίνδυνος γεφύρωσης των χονδρόκοκκων αδρανών, φαινόμενο που οδηγεί στην εμπλοκή, όταν το σκυρόδεμα πρέπει να διέλθει από περιοχές πυκνού οπλισμού.

Η υγρή φάση (πάστα) χαρακτηρίζεται κυρίως από τις ιδιότητες της εργασιμότητας και της συνεκτικότητας, ενώ η φάση των στερεών από τα κενά μεταξύ των σωματιδίων. Οι ιδιότητες του ΑΣΣ προσδιορίζονται από τις ιδιότητες των επιμέρους όγκων και από τις αναλογίες των όγκων τους. Στο επόμενο σχήμα φαίνεται ποιοτικά αυτή η σχέση.



Σχήμα 1: Σχέση σύνθεσης και ιδιοτήτων στο ΑΣΣ.



Επαρκής ικανότητα ροής και ιξώδες της πάστας (mortar) επιτυγχάνεται περιορίζοντας το περιεχόμενο σε λεπτόκοκκα αδρανή και το λόγο νερού/τσιμέντου, προσθέτοντας υπερπλαστικοποιητή και, προαιρετικά, ρυθμιστή ιξώδους (vma). Έτσι το σκυρόδεμα αποκτά επαρκή ικανότητα πλήρωσης και αντοχή στο διαχωρισμό, μιας και τα χονδρόκοκκα υλικά μπορούν μέσω της πάστας να κινούνται μεταξύ τους, αλλά και να συνδέονται ικανοποιητικά.

Η χρήση του μοντέλου στερεών – πάστας δε συνεπάγεται ότι το κλάσμα των αδρανών που συγκρατείται στο κόσκινο των 0,125mm είναι διαχωρισμένο από το αντίστοιχο πέρασμα στις διαδικασίες παραγωγής ΑΣΣ, μολονότι η διάκριση αυτή χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς κατά το στάδιο του σχεδιασμού.

Αυτά, οδηγούν σε μίγματα ΑΣΣ τα οποία, συγκριτικά με το συμβατικό σκυρόδεμα, έχουν τα εξής χαρακτηριστικά:

- *Χαμηλότερο περιεχόμενο χονδρόκοκκων αδρανών*
- *Αυξημένο περιεχόμενο πάστας*
- *Υψηλά επίπεδα κονίας (υλικό <0,0125mm)*
- *Χαμηλή αναλογία νερού/τσιμέντου*
- *Υψηλή δόση υπερπλαστικοποιητή*
- *Ρυθμιστή ιξώδους (μερικές φορές)*

### **1.2.7. Στατιστικά στοιχεία για τη σύνθεση του ΑΣΣ**

Εν γένει, το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα δε διαφέρει δραματικά από το συμβατικό σκυρόδεμα σε όρους περιεχόμενων υλικών. Το είδος των αδρανών, η γεωμετρία και το μέγεθός τους είναι τα χαρακτηριστικά που μπορούν να βελτιώσουν τις ρεολογικές ιδιότητες του αυτοσυμπυκνούμενου.

Την τελευταία δεκαετία έχουν γίνει αρκετά έργα ανά τον κόσμο στα οποία χρησιμοποιήθηκε το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα. Από στατιστικές που έχουν διεξαχθεί σχετικά με το είδος των αδρανών που περιείχαν τα χρησιμοποιηθέντα μίγματα προκύπτει ο παρακάτω πίνακας:

*Πίνακας 3: Τύπος χονδρόκοκκων αδρανών και μέγιστα μεγέθη.*

Τύπος	Αριθμός Εφαρμογών	Μέγιστο μέγεθος (mm)	Αριθμός Εφαρμογών
Θραυστά	34	40	2
Γαρμπίλι	10	32	1
Ελαφροβαρή	2	22 – 25	3
Άλλα υλικά	22	16 – 20	48
		10 – 15	10
		Άγνωστο	4

Παρατηρείται ότι τα θραυστά αδρανή χρησιμοποιούνται τρεις φορές όσο η το γαρμπίλι, το οποίο αρχικά μπορεί να αποδοθεί στην τοπική διαθεσιμότητα των εν λόγω αδρανών. Μελετώντας το μέγιστο μέγεθος, διακρίνεται ότι το 70% των περιπτώσεων περιείχαν αδρανή με μέγιστο μέγεθος 16 – 20 mm . Αξίζει να σημειωθεί ότι η μία εκ των δύο εφαρμογών που κατασκευάστηκαν με χονδρόκοκκα αδρανή μεγέθους 40mm είναι η γέφυρα Akashi – Kaikyo στην Ιαπωνία (γνωστή και ως Pearl Bridge), η οποία είναι η μεγαλύτερη κρεμαστή γέφυρα στον κόσμο, μήκους 3.911m .



*Εικόνα 5:Κρεμαστή γέφυρα Akashi – Kaikyo στην Ιαπωνία.*

Σημαντικό στοιχείο προς μελέτη αποτελεί και η επιλογή των συστατικών της κονιάς που χρησιμοποιείται για το αυτοσυμπυκνούμενο

σκυρόδεμα. Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζονται τα στοιχεία από διάφορες εφαρμογές.

*Πίνακας 4: Συχνότητα εμφάνισης διαφόρων κονιών στο ΑΣΣ.*

Συστατικά	Αριθμός Εφαρμογών
Τσιμέντο Portland	2
Τσιμέντο Portland + Κονία Ασβεστόλιθου	19
Τσιμέντο Portland SR + Κονία Ασβεστόλιθου	1
Ασβεστολιθικό τσιμέντο Portland + κονία ασβεστόλιθου	3
Τσιμέντο Portland + Σκωρία Υψικαμίνων	8
Τσιμέντο Portland Υψικαμίνων	2
Τσιμέντο Portland + Πυριτική Παιπαλή	5
Τσιμέντο Portland Υψικαμίνων + Ιπτάμενη τέφρα (pfa)	9
Τσιμέντο Portland Υψικαμίνων + Σκόνη Ασβεστόλιθου	1
Τσιμέντο Portland + Ιπτάμενη Τέφρα (pfa)	4
Τσιμέντο Portland + Ιπτάμενη τέφρα (pfa) + Πυριτική Παιπάλη	3
Τσιμέντο Portland + Ιπτάμενη τέφρα (pfa) + Σκωρία Υψικαμίνων	1
Ασβεστολιθικό τσιμέντο Portland + Ιπτάμενη τέφρα (pfa)	3
Ασβεστολιθικό τσιμέντο Portland + Σκόνη Ασβεστόλιθου + Ιπτάμενη Τέφρα	1
Τσιμέντο Portland + Σκωρία Υψικαμίνων + Πυριτική Παιπάλη	1
Τσιμέντο Portland Ιπτάμενης Τέφρας + Σκόνη Ασβεστόλιθου + csf	1
Τσιμέντο Portland Υψικαμίνων + Ιπτάμενη Τέφρα (pfa) + Σκόνη ασβεστόλιθου	2

Από τον πίνακα φαίνεται ότι όλες οι κονίες, εκτός από δύο, αποτελούνταν από μίγμα τσιμέντου Portland και ενός ή περισσότερων προσμίκτων, είτε στη μορφή του προαναμεμιγμένου τσιμέντου είτε με προσθήκη κατά την ανάμιξη. Σε 19 περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκε τριαδικό μίγμα, ενώ τετραδικό μίγμα εμφανίζεται σε τρεις μόνο περιπτώσεις. Το περισσότερο χρησιμοποιούμενο πρόσθετο είναι ο ασβεστόλιθος, που χρησιμοποιείται σε 28 περιπτώσεις.

Η πιο κοινή εξήγηση για την επιλογή του μίγματος είναι η μείωση της ανόδου της θερμοκρασίας κατά την αντίδραση της ενυδάτωσης ή/και τη μείωση της θλιπτικής δύναμης, μιας και αν όλη η ποσότητα ήταν τσιμέντο Portland, και οι δύο αυτές ιδιότητες θα ήταν σε υπερβολικά υψηλά επίπεδα. Η

αιτιολόγηση της επιλογής συγκεκριμένου προσθέτου είναι κυρίως η τοπική ακολουθούμενη πρακτική καθώς και η τοπική διαθεσιμότητα. Το ποσοστό των προσμίκτων στις κονίες ήταν πάνω από 30%.

Όσον αφορά τα πρόσθετα, όλα τα μίγματα περιείχαν απαραίτητα υπερπλαστικοποιητή. Χρονικά αργότερα, χρησιμοποιήθηκαν κυρίως πρόσθετα των οποίων οι συνθέσεις βασίζονταν κυρίως σε πολυκαρβοξυλικά οξέα. Μερικά τέτοια πρόσθετα, περιγράφονταν ως “ειδικά για αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα”. Η διαφοροποίηση της απόδοσης ακόμα και μεταξύ όμοιων τύπων καθιστά μικρής σημαντικότητας την ανάλυση της δοσολογίας.

Σε 30 περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκε επίσης αερακτικός παράγοντας, μερικές φορές προαναμεμιγμένος με τα υπόλοιπα χημικά πρόσθετα. Δεν γινόταν πάντα ξεκάθαρη η αρωγή του στην αύξηση των αντοχών στους κύκλους ψύξης – απόψυξης ή στη βελτίωση της ρεολογίας.

Σε 34 εφαρμογές χρησιμοποιήθηκε ρυθμιστής ιξώδους. Η χρήση του αιτιολογείται από την ανάγκη μείωσης της ευαισθησίας του μίγματος σε μικρές μεταβολές των υλικών κατά τη διάρκεια της παραγωγής, ειδικά της υγρασίας των αδρανών.

Από την ίδια μελέτη του P. L. Domone, προκύπτουν κάποια πολύ ενδιαφέροντα στατιστικά στοιχεία όσον αφορά την ποσοτική σύσταση του αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος σε διάφορα έργα.

Σχετικά με τα χονδρόκοκκα αδρανή αναφέρεται ότι το περιεχόμενο των μιγμάτων σε αυτά εκτεινόταν μεταξύ του 28% και του 38% του συνολικού όγκου του σκυροδέματος. Η πλειοψηφία όμως, περί το 80% των μιγμάτων, περιείχε από 29,1% ως 34,8%, τα οποία ποσοστά αντιστοιχούν σε 770 – 925 kg/m<sup>3</sup> για μια μέση σχετική πυκνότητα της τάξης του 2,65. Η μέση τιμή για τα μίγματα που είχαν αδρανή με μέγεθος 10 – 15 mm ήταν υψηλότερη κατά 1% περίπου από το γενικό 31,2%, ενώ με τη χρήση μη θραυστών αδρανών ο μέσος όρος έπεφτε κατά 0,5%.

Αναλύοντας το περιεχόμενο σε πάστα, αυτό ήταν μεταξύ του 30% και του 42% κατ' όγκο, με το 80% των μιγμάτων να βρίσκονται στο διάστημα 32,3 – 39%. Τα μίγματα με μέγεθος αδρανών 10 – 15 mm είχαν μέσο όρο υψηλότερο κατά 2,5% (αρχικός μέσος όρος 34,8%) ενώ τα μη θραυστά αδρανή έριχναν το μέσο όρο κατά 1%.

Τα δεδομένα δείχνουν ότι το περιεχόμενο σε κονία κυμαίνεται από 445 μέχρι 605 kg/m<sup>3</sup> δίνοντας έναν μέσο όρο 525 kg/m<sup>3</sup>. Τα μίγματα με χαμηλότερα ποσοστά κονίας επαληθεύεται ότι περιείχαν και ρυθμιστές ιξώδους (vma).

Όσον αφορά την ποσοτική ανάλυση, μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει η αναλογία νερού/κονία, η ποσότητα ρυθμιστή ιξώδους, καθώς και η μεταξύ τους σχέση.

Η αναλογία νερού/κονίας έχει μεγάλη επίδραση στις ιδιότητες και του φρέσκου αλλά και του σκληρυμένου αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος, ενώ η τιμή της καθορίζεται κυρίως από τις επιθυμητές ιδιότητες για το νωπό. Από την άλλη, η σύνθεση της κονίας καθορίζει την αντίδραση της ενυδάτωσης σε όρους εκλυόμενης θερμότητας και απόκτησης αντοχών.

Το 80% των μιγμάτων που μελετήθηκαν από τον Domone είχαν αναλογία νερού/κονίας 0,28 – 0,42.

Η σύνδεση της αναλογίας και του ρυθμιστή ιξώδους μπορεί να γίνει με την ένταξη κάποιου μίγματος σε μια από τις τρεις προτεινόμενες γενικές κατηγορίες:

- Μίγματα βασισμένα στην κονία (powder-type), με μεγάλες δόσεις κονίας και υπερπλαστικοποιητή
- Βασισμένα στο ρυθμιστή ιξώδους (vma-type), τα οποία περιέχουν αυξημένες δόσεις ρυθμιστή ιξώδους
- Συνδυασμένου τύπου (combined-type), τα οποία έχουν μέτριους λόγους νερού/κονίας και κάποια ποσότητα ρυθμιστή

Σύμφωνα με την μελέτη των Ouchi et al., που αναφέρεται σε εφαρμογές αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος στον κόσμο, προκύπτουν δεδομένα για μίγματα και των τριών τύπων σε Ιαπωνία, Ευρώπη και Αμερική.

Πίνακας 5: Παραδείγματα μιγμάτων ΑΣΣ στην Ιαπωνία.

Συστατικά	Μίγμα I <sub>1</sub> (powder-type)	Μίγμα I <sub>2</sub> (vma-type)	Μίγμα I <sub>3</sub> (combined-type)
Νερό, kg	175	165	175
Τσιμέντο Portland, kg	530	220	298
Ιπτάμενη τέφρα, kg	70	0	206
Σκωρία υψικαμίνων, kg	0	220	0
Πυριτική παιπάλη, kg	0	0	0
Λεπτόκοκκα αδρανή, kg	751	870	702
Χονδρόκοκκα αδρανή, kg	789	825	871
HRWR, kg	9,0	4,4	10,6
VMA, kg	0	4,1	0,0875
Εξάπλωση, mm (slump test)	625	600	660

Πίνακας 6: Παραδείγματα μιγμάτων ΑΣΣ στην Ευρώπη.

Συστατικά	Μίγμα E <sub>1</sub> (powder-type)	Μίγμα E <sub>2</sub> (vma-type)	Μίγμα E <sub>3</sub> (combined-type)
Νερό, kg	190	192	200
Τσιμέντο Portland, kg	280	330	310
Ιπτάμενη τέφρα, kg	0	0	190
Σκόνη ασβεστόλιθου, kg	245	0	0
Σκωρία υψικαμίνων, kg	0	200	0
Πυριτική παιπάλη, kg	0	0	0
Λεπτόκοκκα αδρανή, kg	865	870	700
Χονδρόκοκκα αδρανή, kg	750	750	750
HRWR, kg	4,2	5,3	6,5
VMA, kg	0	0	7,5
Εξάπλωση, mm (slump test)	600-750	600-750	600-750

Πίνακας 7: Παραδείγματα μιγμάτων ΑΣΣ στις Η.Π.Α..

Συστατικά	Μίγμα A <sub>1</sub> (powder-type)	Μίγμα A <sub>2</sub> (vma-type)	Μίγμα A <sub>3</sub> (combined-type)
Νερό, kg	174	180	154
Τσιμέντο Portland, kg	408	357	416
Ιπτάμενη τέφρα, kg	45	0	0
Σκωρία υψικαμίνων, kg	0	119	0
Πυριτική παιπάλη, kg	0	0	0
Λεπτόκοκκα αδρανή, kg	1052	936	1015
Χονδρόκοκκα αδρανή, kg	616	684	892
HRWR, ml	1602	2500	2616
VMA, ml	0	0	542
Εξάπλωση, mm (slump test)	710	660	610

### 1.2.8. Οδηγίες EFNARC για τη σύνθεση ΑΣΣ

Η EFNARC (European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems), είναι η Ευρωπαϊκή Ομοσπονδία για τα Εξειδικευμένα Κατασκευαστικά Χημικά και τα Συστήματα Σκυροδέματος, έχει καταρτίσει ορισμένες οδηγίες για τη σύνθεση μιγμάτων ΑΣΣ. Χρησιμοποιούνται οι κατ' όγκο αναλογίες των συστατικών στο μίγμα, ενώ γίνεται λόγος πάντα για ενδεικτικές τιμές.

Σύμφωνα με τις οδηγίες της EFNARC, οι ενδεικτικές αναλογίες των υλικών για παρασκευή ΑΣΣ είναι οι εξής:

- *Λόγος νερού/λεπτόκοκκα: 0,80 – 1,10 κατ' όγκο*
- *Συνολική περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκα: 160 – 240 lt/m<sup>3</sup> ΑΣΣ*
- *Η περιεκτικότητα σε χονδρόκοκκα δεν υπερβαίνει τα 500 lt/m<sup>3</sup> ΑΣΣ*
- *Περιεκτικότητα σε τσιμέντο: 350 – 450 kg/m<sup>3</sup> ΑΣΣ*
- *Λόγος νερού/τσιμέντο: Ακολουθείται το πρότυπο EN 206-1:2000*
- *Το ελεύθερο νερό, τυπικά, δεν υπερβαίνει τα 200 lt/m<sup>3</sup> ΑΣΣ*
- *Περιεκτικότητα σε πάστα: > 400 lt/m<sup>3</sup> ΑΣΣ*
- *Περιεκτικότητα σε άμμο: > 50% κατά βάρος συνολικών αδρανών*

Γενικώς, η προσέγγιση στο σχεδιασμό που συνίσταται από την EFNARC, είναι συντηρητική έτσι ώστε να εξασφαλίζεται ότι το ΑΣΣ θα διατηρεί τις ρεολογικές του ιδιότητες κατά τη διακύμανση των ιδιοτήτων των συστατικών. Συνήθως, για να αντισταθμίζεται η διακύμανση της κοκκομετρικής κατανομής της άμμου ή/και η υγρασία των αδρανών, χρησιμοποιούνται οι ρυθμιστές ιξώδους.

Αξίζει να σημειωθεί ότι για να επιτευχθούν οι απαιτούμενες ιδιότητες (εργασιμότητα, συνεκτικότητα, αντοχή, ανθεκτικότητα κλπ) απαιτούνται εργαστηριακές μελέτες με σκοπό την επιλογή των κατάλληλων συστατικών και τη ρύθμιση των αναλογιών τους. Στην περίπτωση που ικανοποιούνται όλες οι απαιτήσεις στο εργαστηριακό ανάμιγμα, η σύνθεση θα πρέπει να δοκιμαστεί σε βιομηχανική κλίμακα, στη μονάδα παρασκευής σκυροδέματος ή επί τόπου στο έργο.



### 1.2.9. Πρότυπη μέθοδος σύνθεσης ΑΣΣ - Μέθοδος Okamura

Η μέθοδος Okamura είναι μια εργαστηριακή μέθοδος σχεδιασμού συνθέσεων (mix design) αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος, η οποία αναπτύχθηκε από τον Okamura που πρώτος ασχολήθηκε με το συγκεκριμένο τύπο σκυροδέματος.

Η μέθοδος Okamura, αποτελείται σε διαδικασία από τα εξής βήματα:

1. Καθορισμός της επιθυμητής περιεκτικότητας σε αέρα (συνήθως 2% κ.ό.)
2. Καθορισμός του όγκου των χονδρών αδρανών
3. Καθορισμός της περιεκτικότητας σε άμμο
4. Σχεδιασμός της σύστασης της πάστας
5. Καθορισμός της βέλτιστης σχέσης νερού/λεπτόκοκκα αδρανή και της δόσης του υπερρυστοποιητή στο κονίαμα
6. Αξιολόγηση των ιδιοτήτων/επιδόσεων του ΑΣΣ με πρότυπες δοκιμές

Η αξιολόγηση γίνεται σύμφωνα με τα επόμενα:

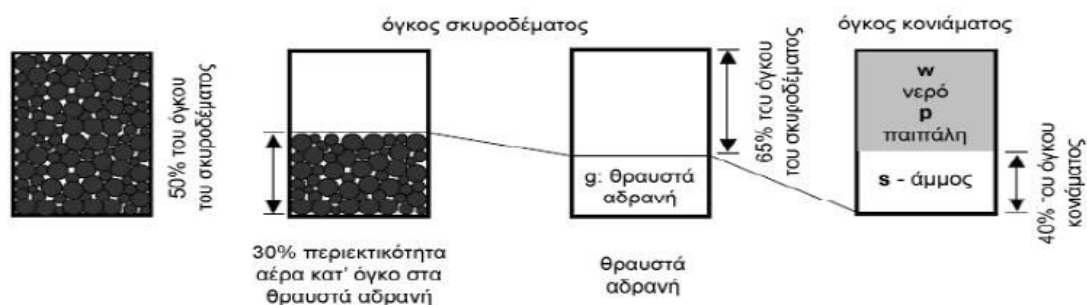
#### *a. Περιεκτικότητα του ΑΣΣ σε αέρα*

Η περιεκτικότητα του ΑΣΣ σε αέρα λαμβάνεται συνήθως 2% κ.ό. ΑΣΣ. Για τη δημιουργία σκυροδέματος με μεγάλη ανθεκτικότητα στην ψύξη/απόψυξη, η αεροπεριεκτικότητα οφείλει να έχει μεγαλύτερες τιμές.

## ***b. Καθορισμός του όγκου των χονδρόκοκκων αδρανών***

Η περιεκτικότητα του ΑΣΣ σε χονδρόκοκκα αδρανή υπολογίζεται με βάση το φαινόμενο βάρος των αδρανών (φαινόμενο βάρος σωρευμένου υλικού χύδην ορίζεται ως η μάζα του υλικού που περιέχεται στην μονάδα του όγκου σωρευμένου υλικού και εκφράζεται σε  $\text{kg}/\text{m}^3$ ). Κατά τον Okamura, η περιεκτικότητα σε χονδρόκοκκα αδρανή (κόκκοι μεγέθους μεγαλύτερου από 4mm) θα πρέπει να ισούται με το 50-60% του φαινόμενου βάρους των αδρανών. Για παράδειγμα, εάν το φαινόμενο βάρος των χονδρόκοκκων αδρανών είναι  $1550 \text{ kg}/\text{m}^3$ , η περιεκτικότητα των αδρανών στο ΑΣΣ θα είναι  $775\text{-}930 \text{ kg χονδρόκοκκων}/\text{m}^3 \text{ ΑΣΣ}$ . Η λογική των υπολογισμών φαίνεται στο Σχήμα.

Όταν ο όγκος των αδρανών στο σκυρόδεμα υπερβαίνει ένα όριο, η πιθανότητα επαφής μεταξύ των κόκκων αυξάνεται απότομα και υπάρχει αυξημένος κίνδυνος έμφραξης όταν το σκυρόδεμα διέρχεται μεταξύ των ράβδων του οπλισμού.



*Σχήμα 2: Αναλογίες όγκων αδρανών.*

Η βέλτιστη περιεκτικότητα σε χονδρά αδρανή εξαρτάται από:

- Το μέγιστο μέγεθος κόκκου. Όσο μειώνεται αυτό, τόσο μπορεί να αυξηθεί η περιεκτικότητα σε χονδρά αδρανή.
- Την επιφάνεια των αδρανών. Η περιεκτικότητα σε χονδρά αδρανή μπορεί να αυξηθεί με τη χρήση στρογγυλεμένων αντί θραυστών αδρανών.

### ***c. Καθορισμός της περιεκτικότητας σε άμμο***

Η περιεκτικότητα του κονιάματος σε άμμο (κόκκοι μεγέθους 0,125 – 4mm) θα πρέπει να ισούται με το 40-50% του φαινόμενου βάρους της άμμου. Για παράδειγμα, εάν το φαινόμενο βάρος της άμμου είναι 1610 kg/m<sup>3</sup> η περιεκτικότητα της άμμου στο ΑΣΣ θα είναι 644-805 kg/m<sup>3</sup> ΑΣΣ.

### ***d. Σχεδιασμός της σύστασης της πάστας***

Ο σχεδιασμός της σύστασης της πάστας γίνεται πειραματικά. Στην πειραματική διαδικασία προσδιορίζεται ο λόγος νερού/λεπτόκοκκα αδρανή για τον οποίο η δοκιμή εξάπλωσης της πάστας με τον κώνο κάθισης παρουσιάζει μηδενική σχετική εξάπλωση. Ο λόγος αυτός συμβολίζεται ως β<sub>p</sub>. Η πάστα μετά την ανάσυρση του κώνου παραμορφώνεται από το ίδιο βάρος και μετριέται το μήκος δύο διαμέτρων, d<sub>1</sub> και d<sub>2</sub> που σχηματίζουν γωνία 90°. Η σχετική εξάπλωση Γρ/μ υπολογίζεται από τις σχέσεις:

$$d = 0,5 \cdot (d_1 + d_2)$$

$$\Gamma p / m = (d / d_0)^2 - 1$$

Όπου d<sub>0</sub> η αρχική διάμετρος της βάσης του κώνου (=100mm).

Παρασκευάζονται πάστες με την προκαθορισμένη αναλογία συστατικών, τσιμέντο και λεπτόκοκκα, και διαφορετικούς λόγους w/p (νερού/λεπτόκοκκα). Στις πάστες αυτές προσδιορίζεται η σχετική εξάπλωση Γρ/μ και από τη συσχέτιση του Γρ/μ με τον λόγο w/p προσδιορίζεται ο λόγος β<sub>p</sub>.

***ε. Προσδιορισμός του βέλτιστου λόγου νερού/λεπτόκοκκα και της δόσης του υπερρευστοποιητή στο μίγμα***

Ο προσδιορισμός του βέλτιστου λόγου νερού/λεπτόκοκκα και της δόσης του υπερρευστοποιητή στο μίγμα γίνεται πειραματικά με χρήση των δοκιμών του κώνου εξάπλωσης και της χοάνης εκροής σχήματος V.

Οι δοκιμές πραγματοποιούνται με λόγο w/p στην περιοχή από 0,8 β<sub>p</sub> έως 0,9 β<sub>p</sub> με διαφορετικές περιεκτικότητες υπερρευστοποιητή και με περιεκτικότητα σε άμμο όπως καθορίζεται από τα πρότυπα.

Οι παρακάτω τιμές για τις δοκιμές θεωρούνται ικανοποιητικές:

- *Εξάπλωση: 24 – 26 cm.*
- *Χρόνος εκροής από τη χοάνη σχήματος V: 7 – 11 s.*

Στην περίπτωση που ικανοποιείται η δοκιμή του κώνου εξάπλωσης και ο χρόνος εκροής από τη χοάνη είναι μικρότερος από 7s προτείνεται η μείωση του λόγου w/p, ενώ στην περίπτωση που είναι μεγαλύτερος από 11s προτείνεται η αύξηση του w/p.

Σε περίπτωση που τα κριτήρια δεν ικανοποιούνται τότε ο συνδυασμός συστατικών που χρησιμοποιήθηκε δεν ήταν ο κατάλληλος για την παρασκευή ΑΣΣ. Στην περίπτωση αυτή προτείνεται κατά σειρά η δοκιμή διαφορετικού υπερρευστοποιητή, διαφορετικού προσθέτου και τέλος διαφορετικού τσιμέντου.

## *f. Αξιολόγηση των ιδιοτήτων του ΑΣΣ με πρότυπες δοκιμές*

Η δόση του υπερρευστοποιητή καθορίζεται τελικά με βάση τις πρότυπες δοκιμές στο ΑΣΣ, στο οποίο έχουν καθοριστεί, όπως παραπάνω, οι αναλογίες των υπολοίπων συστατικών.

### **1.2.10. Καθοριστικές Παράμετροι ΑΣΣ**

Στο ΑΣΣ, που είναι ένας ξεχωριστός τύπος σκυροδέματος, σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν η εργασιμότητα του μίγματος, η ρεολογία της τσιμεντόπαστας και η πυκνότητα στοιβαξης των αδρανών. Ακολουθεί ανάλυση των παραμέτρων αυτών.

#### **I. Εργασιμότητα**

Από τις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα, η βιομηχανία του σκυροδέματος αναγνώρισε την ανάγκη να παρακολουθείται η εργασιμότητα του σκυροδέματος έτσι ώστε να διασφαλίζεται η κατάλληλη διάστρωση και οι επιθυμητές μηχανικές ιδιότητες μετά τη σκλήρυνση. Πολλές δοκιμές αναπτύχθηκαν στοχεύοντας στον προσδιορισμό της εργασιμότητας, για χρήση σε ερευνητικό επίπεδο, στο σχεδιασμό μιγμάτων αλλά και στην επί τόπου χρήση. Η πλειοψηφία των μεθόδων αυτών δεν βρήκαν ποτέ εφαρμογή πέραν από κάποιες αρχικές μελέτες. Εξαιρουμένης της ευρέως διαδεδομένης δοκιμής της εξάπλωσης, οι λίγες μέθοδοι που εξετάστηκαν εκτενώς, απέτυχαν στο να αποκτήσουν ευρεία αποδοχή. Ακόμα και με την αύξηση της γνώσης πάνω στη ρεολογία του σκυροδέματος, η δοκιμή της εξάπλωσης παραμένει η κυρίαρχα χρησιμοποιούμενη μέθοδος για τη μέτρηση της εργασιμότητας του σκυροδέματος. Τα σύγχρονα συστήματα που χρησιμοποιούνται στις παραγωγικές μονάδες έτοιμου σκυροδέματος δεν κατάφεραν να εξαλείψουν την ανάγκη για μια επί τόπου δοκιμή της εργασιμότητας. Αντιθέτως, η ανάπτυξη του νέου τύπου σκυροδέματος που καλείται “σκυρόδεμα υψηλών

επιδόσεων” (high performance concrete), κατέστησε την παρακολούθηση της εργασιμότητας ακόμα πιο κρίσιμη. Πράγματι, η NRMCA<sup>1</sup> διεξήγε μια έρευνα, η οποία αναγνώρισε την ανάγκη για μια καλύτερη μέθοδο χαρακτηρισμού της εργασιμότητας των νέων τύπων σκυροδέματος. Ύστερα από 80 χρόνια προσπαθειών, η βιομηχανία σκυροδέματος βρίσκεται ακόμη αντιμέτωπη με την πρόκληση της ανάπτυξης μιας επί τόπου δοκιμής, η οποία να μετράει τις σχετικές ρεολογικές ιδιότητες του σκυροδέματος γρήγορα και αξιόπιστα.

Ο όρος εργασιμότητα είναι πολύ πλατιά ορισμένος. Καμία δοκιμή από μόνη της δεν μπορεί να μετρήσει όλα τα επίπεδα της εργασιμότητας. Το Αμερικανικό Ινστιτούτο Σκυροδέματος περιγράφει την εργασιμότητα ως “εκείνη την ιδιότητα του φρέσκου σκυροδέματος ή κονιάματος που καθορίζει την ευκολία με την οποία μπορεί να αναμιχθεί, να τοποθετηθεί και να φινιριστεί σε ομογενή κατάσταση”. Κατά την Ένωση Ιαπώνων Μηχανικών Σκυροδέματος, η εργασιμότητα ορίζεται ως “η ιδιότητα του φρέσκου σκυροδέματος ή κονιάματος που καθορίζει την ευκολία και την ομοιογένεια με τις οποίες μπορεί να αναμιχθεί, τοποθετηθεί και να συμπυκνωθεί λόγω της συνεκτικότητάς του, της ομοιογένειας με την οποία μπορεί να μετατραπεί σε σκυρόδεμα και του βαθμού στον οποίο μπορεί να αντισταθεί στο διαχωρισμό των υλικών”. Ακόμα ο Neville ορίζει την εργασιμότητα ως “το ποσό του χρήσιμου εσωτερικού έργου που είναι απαραίτητο για να επιτευχθεί πλήρης συμπίκνωση”. Η εργασιμότητα δεν εξαρτάται μόνο από τις ιδιότητες του σκυροδέματος, αλλά επίσης και από τη φύση της εφαρμογής. Για παράδειγμα, ένα σκυρόδεμα που είναι πολύ στεγνό και φαίνεται να έχει χαμηλή εργασιμότητα, μπορεί να είναι το καταλληλότερο για τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Το επίκεντρο των μετρήσεων της εργασιμότητας έχει αλλάξει πολλές φορές μέσα στα χρόνια. Όταν στις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα αναπτύχθηκε η δοκιμή της εξάπλωσης, οι ερευνητές του σκυροδέματος είχαν μόλις αρχίσει να αναγνωρίζουν τη σημαντικότητα του περιεχόμενου νερού στην πρόβλεψη των αντοχών. Η δοκιμή της εξάπλωσης δίνει μια ένδειξη για το περιεχόμενο νερό και περαιτέρω για τις αντοχές του σκληρυμένου σκυροδέματος. Η ικανότητα βελτίωσης των αντοχών διαμέσου του ελέγχου της συνεκτικότητας αντιπροσώπευσε μια νέα τάση στη βιομηχανία σκυροδέματος. Η δοκιμή της

---

<sup>1</sup> National Ready Mixed Concrete Association, Εθνική Ομοσπονδία Έτοιμου Σκυροδέματος.

εξάπλωσης υιοθετήθηκε πολύ γρήγορα εξαιτίας της απλότητάς της, παρά το ότι ήταν συνειδητή η ανικανότητά της να αποδόσει πλήρως την εργασιμότητα. Όμως, στα επόμενα χρόνια έγιναν διάφορες προσπάθειες ανάπτυξης καλύτερων και πληρέστερων δοκιμών. Αν και πολλές δοκιμές και μέθοδοι αναπτύχθηκαν στα επόμενα χρόνια μέχρι τη δεκαετία του 1920, η αρχές προσδιορισμού των καμπυλών ροής του σκυροδέματος με τις παραμέτρους της διατμητικής τάσης και του ρυθμού διάτμησης, δεν είχαν εδραιωθεί μέχρι που το σκυρόδεμα αναγνωρίστηκε ως ρευστό τύπου Bingham από τους Tattersall και Banfill το 1983. Πολλές από τις μεταγενέστερες μεθόδους αποπειράθηκαν να μετρήσουν την τάση κατωφλίου και το πλαστικό ιξώδες. Οι μέθοδοι που ακολουθούνται για τη δοκιμή της εργασιμότητας μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση διάφορα σχήματα κατάταξης.

*Πίνακας 8: Κατηγοριοποίηση μεθόδων μέτρησης εργασιμότητας με βάση το ποσοτικό στοιχείο.*

Μετρήσεις Εργασιμότητας	Σχόλιο
Κατηγορία I – Ποιοτικές Εργασιμότητα, Ρευστότητα, Ικανότητα συμπίκνωσης, Τελείωμα επιφανειών, Αντλησιμότητα, κλπ.	Για χρήση μόνο με περιγραφικό σκοπό, χωρίς καμία τάση για ποσοτικοποίηση.
Κατηγορία II – Ποσοτικές Εμπειρικές Εξάπλωση, Παράγων συμπίκνωσης, Χρόνος Vebe, κλπ.	Υπό συγκεκριμένες συνθήκες χρησιμοποιούνται για έναν απλό ποσοτικό χαρακτηρισμό.
Κατηγορία III – Θεμελιώδεις Ποσοτικές Ιξώδες, Κινητικότητα, Ρευστότητα, Τιμή ροής.	Χρησιμοποιούνται για ποσοτικό χαρακτηρισμό σε σύνδεση με αυστηρούς ορισμούς μεγεθών.

Η εργασιμότητα του σκυροδέματος δεν πρέπει σε καμία περίπτωση να θυσιάζεται ώστε να αναπτυχθούν καλύτερες ιδιότητες στο σκληρυμένο σκυρόδεμα, όπως η αντοχή και η ανθεκτικότητα. Η εργασιμότητα μετρείται τυπικά στον τόπο διάστρωσης του σκυροδέματος μέσω των αποτελεσμάτων της δοκιμής εξάπλωσης (cone slump test). Εντούτοις, κάποιες έρευνες που διεξήχθησαν από την NMRCΑ και το NIST<sup>1</sup>, έδειξαν ότι οι μετρήσεις αυτές δεν είναι και τόσο αντιπροσωπευτικές για την πραγματική συμπεριφορά του νωπού σκυροδέματος στο πεδίο τοποθέτησής του. Αναφέρθηκε ότι μίγματα σκυροδέματος με την ίδια μετρούμενη τιμή εξάπλωσης, δε συμπεριφέρονται

<sup>1</sup> National Institute of Standards and Technology, Εθνικό Ινστιτούτο Προτύπων και Τεχνολογίας.

το ίδιο κατά την τοποθέτηση. Αυτό υπονοεί ότι η τιμή εξάπλωσης δε δίνει αρκετά δεδομένα για να χαρακτηριστεί η ρεολογική συμπεριφορά του σκυροδέματος.

Στο πεδίο της κατασκευής, τεχνικοί όροι όπως η εργασιμότητα, η ρευστότητα και η συνεκτικότητα, χρησιμοποιούνται εναλλακτικά για την περιγραφή της συμπεριφοράς του νωπού σκυροδέματος κατά τη ροή του. Οι ορισμοί τους βέβαια είναι πολύ υποκειμενικοί. Παρ' όλα αυτά, υπάρχει ανάγκη για μια πιο θεμελιώδη και ποσοτική περιγραφή της ροής του σκυροδέματος.

Αρκετοί ερευνητές, όπως ο Banfill και ο De Larrard, έχουν χρησιμοποιήσει με επιτυχία την εξίσωση του Bingham. Σύμφωνα με αυτή, δύο είναι οι παράμετροι που προσδιορίζουν τη ροή, η διατμητική τάση και το πλαστικό ιξώδες. Η μεν διατμητική τάση σχετίζεται με την εξάπλωση, το δε πλαστικό ιξώδες συνήθως αμελείται λόγω του ότι υπάρχουν πολύ λίγοι τύποι συσκευών και διατάξεων που μπορούν να το μετρήσουν. Όμως το ιξώδες μπορεί να σχετιστεί και με άλλες ιδιότητες όπως την ευκολία τοποθέτησης και άντλησης, το βαθμό φινιρίσματος και την κολλώδη συμπεριφορά. Επιπροσθέτως, η απόμιξη θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως η ικανότητα των αδρανών να μη βυθίζονται μέσα στην πάστα του τσιμέντου. Αυτό το φαινόμενο συνδέεται με το ιξώδες της τσιμεντόπαστας και το σχεδιασμό των αναλογιών στο μίγμα του σκυροδέματος.

Συνεπώς, οι μέθοδοι που αξιοποιούνται για την πρόβλεψη της εργασιμότητας του σκυροδέματος, πρέπει να λάβουν υπόψη τους κι άλλες παραμέτρους, πέραν από τη διατμητική τάση.

## **II. Ρεολογία**

### *Γενικά*

Ρεολογία είναι η μελέτη της παραμόρφωσης και της ροής της ύλης, υπό την επίδραση μιας εφαρμοζόμενης τάσης, η οποία μπορεί να είναι, για παράδειγμα, μια διατμητική τάση ή μια εφελκυστική τάση. Ο πειραματικός



χαρακτηρισμός της ρεολογικής συμπεριφοράς ενός υλικού είναι γνωστός ως ροομετρία, αν και ο όρος ρεολογία χρησιμοποιείται συχνά σε συνώνυμη της ροομετρίας, ειδικά από τους πειραματικούς. Οι θεωρητικές πτυχές της ρεολογίας είναι η σχέση μεταξύ της εσωτερικής δομής του υλικού (π.χ. ο προσανατολισμός και το μήκος πολυμερικών αλυσίδων) και της συμπεριφοράς κατά τη ροή ή την παραμόρφωση. Η συμπεριφορά ροής και παραμόρφωσης κάποιων υλικών, που δε μπορεί να περιγραφεί με την κλασική μηχανική ρευστών, καλείται μηχανική των μη – νευτωνικών ρευστών (στην περίπτωση των ρευστών).

Ο όρος ρεολογία αποδίδεται στον Eugene Bingham, ο οποίος ήταν Καθηγητής στο πανεπιστήμιο του Lehigh το 1920. Την ονομασία εμπνεύστηκε από τη φράση του Ηράκλειτου “πάντα ρει”.

### ***Ρεολογία και Σκυρόδεμα***

Το σκυρόδεμα, σαν υλικό που μπορεί να ρεύσει, έστω και κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες, ανήκει στην κατηγορία των ρευστών. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η πάστα του τσιμέντου δίνει την ιδιότητα αυτή στο σκυρόδεμα. Με τη σειρά της, η ρεολογική συμπεριφορά της τσιμεντόπαστας καθορίζεται από τη λειτουργία των λεπτομερών μέσα στο μίγμα.

Τα πρόσμικτα είναι λοιπόν αυτά που κατά κύριο λόγο επηρεάζουν τη ρεολογική συμπεριφορά της τσιμεντόπαστας, χωρίς να μεταβάλλουν τη σύνθεση και συμπεριφορά των χονδροκόκκων αδρανών. Συνεπώς, φαίνεται λογικό το να γίνεται προσπάθεια επιλογής προσμίκτων, μέσω πειραμάτων που περιλαμβάνουν μόνο την τσιμεντόπαστα. Σε ιδανικές καταστάσεις, τα αποτελέσματα αυτά θα σχετίζονταν άμεσα με την εργασιμότητα του σκυροδέματος. Όμως, η σχέση μεταξύ της ρεολογικής συμπεριφοράς της τσιμεντόπαστας και αυτής του σκυροδέματος, δεν έχει ακόμα προσδιοριστεί πλήρως. Ο κύριος λόγος για αυτό είναι ότι η ρεολογία της τσιμεντόπαστας μετρείται υπό συνθήκες που δε συναντώνται ποτέ στη μάζα του σκυροδέματος. Έτσι, οι προσδιοριζόμενες παράμετροι για την τσιμεντόπαστα

ενδέχεται να διαφέρουν από τις εκτιμώμενες για το σκυρόδεμα. Οι τιμές που συνήθως αναφέρονται στη βιβλιογραφία δε λαμβάνουν υπόψη τους την επίδραση των χονδροκόκκων αδρανών. Τα τελευταία ασκούν διατμητική τάση στην τσιμεντόπαστα κατά τη διάρκεια της διαδικασίας της ανάμιξης. Ένα υπολογιστικό μοντέλο βρίσκεται υπό ανάπτυξη από το NIST, το οποίο θα προσομοιώνει τη διάτμηση του σκυροδέματος. Το μοντέλο θα προβλέπει τη ρεολογία του σκυροδέματος μέσω ιδιοτήτων οι οποίες θα λαμβάνονται από ρεολογικές μετρήσεις στην τσιμεντόπαστα.

Οι ρεολογικές ιδιότητες της τσιμεντόπαστας, αν αυτές μετρηθούν κατάλληλα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μια πρώτη επιλογή των προσμίκτων. Οι λεπτομέρειες της μεθοδολογίας αποτελούν ξεχωριστό θέμα. Όμως κάποιες βασικές αρχές αξίζει να σημειωθούν.

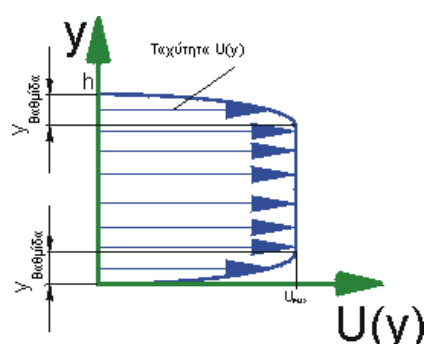
Η τσιμεντόπαστα πρέπει να αναμιχθεί και να υποβληθεί στις δοκιμές, σε συνθήκες που προσεγγίζουν καλά αυτές που θα υφίσταται και το σκυρόδεμα, κυρίως σε όρους διάτμησης και θερμοκρασίας. Συνεπώς, πρέπει να χρησιμοποιείται εξοπλισμός με δυνατότητα ρύθμισης της θερμοκρασίας και με εύρος διάτμησης. Ακόμα κάτι που πρέπει να σημειωθεί είναι ότι το ιξωδόμετρο που θα χρησιμοποιηθεί πρέπει να είναι παράλληλων πλακών, επειδή είναι το μόνο με μεταβλητή γεωμετρία. Έχει αποδειχθεί ότι οι ρεολογικές ιδιότητες της τσιμεντόπαστας μεταβάλλονται όταν το υλικό συμπιέζεται μεταξύ δύο επιφανειών ή αδρανών όπως στο μίγμα. Η απόσταση μεταξύ των δύο επιφανειών ονομάζεται διάκενο και μπορεί να αλλαχθεί εύκολα στα ιξωδόμετρα παράλληλων πλακών.

Το νωπό σκυρόδεμα μπορεί να χαρακτηριστεί ως ρευστό, δεδομένου ότι μπορεί να επιτευχθεί ένας συγκεκριμένος βαθμός ρευστότητας και ότι το υλικό είναι ομογενές. Αυτός ο περιορισμός μπορεί να καθοριστεί στα 100mm για την εξάπλωση, χωρίς να παρατηρηθεί απόμιξη (εμφάνιση νερού στα άκρα της εξαπλωμένης πάστας). Η περιγραφή της ροής ενός σκυροδέματος περιλαμβάνει τη χρήση εννοιών όπως η διατμητική τάση (shear stress) και ο ρυθμός διάτμησης (shear rate). Ο λόγος των δύο μεγεθών δίνει το πλαστικό ιξώδες (plastic viscosity). Το σκυρόδεμα, ως ρευστό, συνήθως κατατάσσεται στα λεγόμενα ρευστά Bingham.

Τα ρευστά Bingham χαρακτηρίζονται από μια τιμή κατωφλίου διάτμησης. Σε αντίθεση με τα νευτωνικά ρευστά, μπορούν να μεταδώσουν τη διατμητική τάση χωρίς την ύπαρξη βαθμίδας ταχύτητας. Όμως, για να αρχίσει ένα ρευστό τύπου Bingham να ρέει, θα πρέπει η ασκούμενη σε αυτό διατμητική τάση να υπερβεί την τιμή κατωφλίου. Το ρευστό αυτό, με διατμητικές τάσεις μικρότερες του κατωφλίου θα συμπεριφέρεται περίπου ως στερεό, ενώ με μεγαλύτερες τιμές αυτής θα περνάει στην περιοχή των υγρών. Παραδείγματα ρευστών Bingham, εκτός από το σκυρόδεμα, είναι οι οδοντόπαστες και οι μπουγιές.

Όσον αφορά το προφίλ ταχυτήτων κατά την κίνηση του ρευστού, πρέπει να σημειωθούν τα παρακάτω:

Όταν τα νευτωνικά ρευστά ρέουν μέσα σε αγωγούς ή κανάλια, εμφανίζουν ένα προφίλ ταχυτήτων, του οποίου η βαθμίδα μειώνεται προς το κέντρο του αγωγού. Έτσι, η διατμητική τάση που μεταδίδεται από στρώμα σε στρώμα, συνεχώς ελαττώνεται όσο η μελέτη προχωρά προς το κέντρο. Επειδή τα ρευστά τύπου Bingham τρέπονται σε στερεά, όταν η ασκούμενη διατμητική τάση μειωθεί κάτω από την τιμή κατωφλίου, καθίσταται σαφές ότι θα γίνονται στερεά κοντά στο κέντρο του αγωγού, δημιουργώντας ένα στερεό μόνρφωμα, το οποίο συμπαρασύρεται από το υπόλοιπο ρευστό κατά τη ροή. Το ύψος αυτής της στερεάς περιοχής αποτελεί σημαντικό παράγοντα κατά τον προσδιορισμό του προφίλ ταχυτήτων.



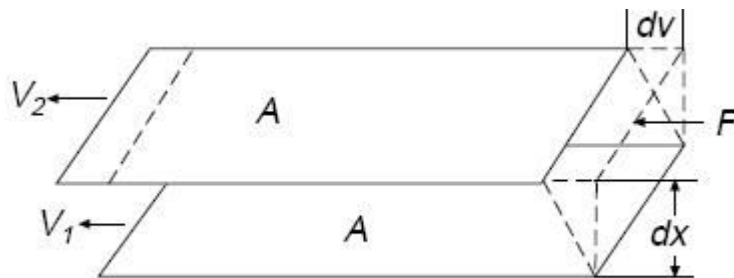
Σχήμα 3: Προφίλ ταχυτήτων σε ρευστό τύπου Bingham (σκυρόδεμα).

## Ιξώδες

Το ιξώδες (viscosity) είναι το μέτρο της εσωτερικής τριβής ενός ρευστού. Αυτή η τριβή εμφανίζεται όταν ένα στρώμα ρευστού εξωθείται σε σχετική κίνηση ως προς ένα άλλο. Όσο μεγαλύτερη είναι η τριβή, τόσο μεγαλύτερη δύναμη απαιτείται για να πραγματοποιηθεί η κίνηση. Η δύναμη αυτή ονομάζεται διατμητική δύναμη.

Η διάτμηση συμβαίνει οποτεδήποτε το ρευστό κινείται ή διανέμεται, όπως στην έγχυση, την εξάπλωση, την εκνέφωση, την ανάμιξη κ.ά.. Τα πολύ ιξώδη ρευστά, απαιτούν μεγαλύτερη δύναμη για να κινηθούν, απ' ότι τα λιγότερο ιξώδη υλικά.

Ο Isaac Newton όρισε το ιξώδες θεωρώντας το μοντέλο που φαίνεται στην επόμενη εικόνα.



Σχήμα 4: Μοντέλο διάτμησης κατά Newton.

Δύο παράλληλες επίπεδες επιφάνειες ρευστού με ίδια επιφάνεια  $A$ , απέχουν απόσταση  $dx$  και κινούνται προς την ίδια κατεύθυνση αλλά με διαφορετικές ταχύτητες  $V_1$  και  $V_2$ . Ο Newton συμπέρανε ότι η δύναμη που απαιτείται για να διατηρηθεί αυτή η διαφορά στην ταχύτητα είναι ανάλογη με τη διαφορά των ταχυτήτων μέσα στο ρευστό, ή τη βαθμίδα ταχυτήτων. Για να το εκφράσει αυτό, ο Newton έγραψε την επόμενη σχέση:

$$\frac{F}{A} = \eta \cdot \frac{dV}{dx}$$

όπου το  $\eta$  είναι μια σταθερά του υλικού και καλείται ιξώδες.

Η βαθμίδα της ταχύτητας  $\frac{dV}{dx}$  είναι μέτρο της μεταβολής της ταχύτητας με την οποία τα στρώματα εκτελούν σχετική κίνηση με τα υπόλοιπα. Περιγράφει τη διάτμηση που ασκείται στο ρευστό και έτσι καλείται ρυθμός διάτμησης. Αυτό μπορεί να συμβολίζεται και ως  $\dot{\gamma}$ , και η μονάδα μέτρησής του είναι το  $\text{sec}^{-1}$ . Ο όρος  $\frac{F}{A}$  υποδεικνύει τη δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας που απαιτείται για να προκληθεί η διάτμηση. Ονομάζεται και διατμητική τάση και μετριέται σε  $\frac{N}{m^2}$  ή σε  $\text{dynes/cm}^2$ . Με τη χρήση αυτών των απλών όρων, το ιξώδες μπορεί να οριστεί μαθηματικά με τον επόμενη τύπο:

$$\eta = \text{ιξώδες} = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \frac{\text{διατμητική τάση}}{\text{ρυθμός διάτμησης}}$$

Η θεμελιώδης μονάδα για το ιξώδες είναι το poise (P). Ένα υλικό που απαιτεί διατμητική τάση  $1 \text{ dynes/cm}^2$  για να παράγει ρυθμό διάτμησης  $1 \text{ sec}^{-1}$  έχει ιξώδες  $1 \text{ poise}(P)$ , ή  $100 \text{ centipoise}(cP)$ <sup>1</sup>.

Ο Newton έκανε την υπόθεση ότι όλα τα υλικά έχουν, σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία, ιξώδες ανεξάρτητο από το ρυθμό διάτμησης. Πρακτικά, διπλασιασμός της διατμητικής τάσης θα σήμαινε διπλασιασμό της ταχύτητας με την οποία κινείται το ρευστό. Όπως θα φανεί παρακάτω, αυτό δεν ισχύει σε όλες τις περιπτώσεις.

<sup>1</sup> Οι μονάδες αυτές είναι στο σύστημα CGS. Οι αντίστοιχες στο διεθνές σύστημα SI είναι Pa\*s, και η ισοδυναμία είναι  $1\text{Pa}\cdot\text{s}=10\text{P}$ .

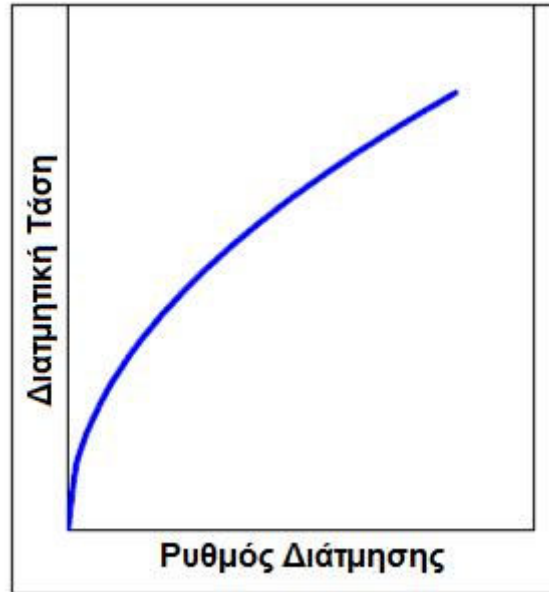
## *Κατηγορίες Ρευστών*

Ρευστά όπως ο αέρας, το νερό και το βενζόλιο χαρακτηρίζονται ως Νευτωνικά. Αυτό σημαίνει ότι αν κατασκευαστεί ένα διάγραμμα της διατμητικής τάσης (shear stress) ως προς το ρυθμό διάτμησης (shear rate) σε μια δεδομένη θερμοκρασία, θα ληφθεί μια ευθεία γραμμή σταθερής κλίσης, ανεξάρτητης από το ρυθμό διάτμησης. Η κλίση αυτή αποδίδει το ιξώδες του ρευστού.

Όλα τα αέρια είναι επίσης Νευτωνικά ρευστά. Ακόμα, υγρές ουσίες με μικρή σχετική μοριακή μάζα και διαλύματα ουσιών με μικρή σχετική μοριακή μάζα είναι συνήθως Νευτωνικά. Κάποια παραδείγματα είναι τα υδατικά διαλύματα ζάχαρης ή αλατιού.

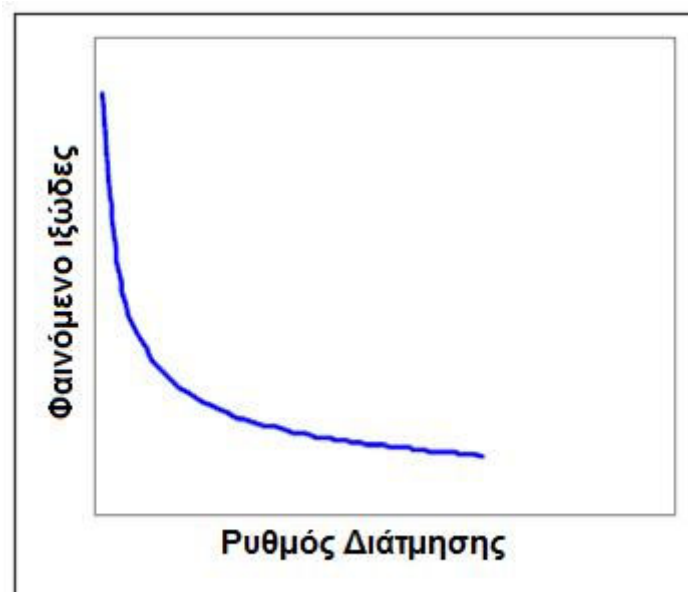
Οποιοδήποτε ρευστό που δεν υπακούει στην παραπάνω (Νευτωνικά) σχέση μεταξύ διατμητικής τάσης και ρυθμού διάτμησης, καλείται μη – Νευτωνικό. Το αντικείμενο της ρεολογίας είναι η μελέτη της συμπεριφοράς τέτοιων ρευστών. Υγρά υψηλού μοριακού βάρους, που περιέχουν διαλύματα ή τήγματα πολυμερών, όπως και υγρά τα οποία περιέχουν αιωρούμενα σωματίδια, είναι συνήθως μη – Νευτωνικά.

Στην περίπτωση αυτή, η κλίση της καμπύλης της διατμητικής τάσης ως προς το ρυθμό διάτμησης θα μεταβάλλεται με τις αλλαγές του ρυθμού διάτμησης. Όταν το ιξώδες του ρευστού μειώνεται με την αύξηση του ρυθμού διάτμησης, τότε το ρευστό χαρακτηρίζεται ως ψευδοπλαστικό, ενώ στην αντίθετη περίπτωση, όπου το ιξώδες αυξάνει με την αύξηση του ρυθμού διάτμησης, τα ρευστά χαρακτηρίζονται ως διασταλτικά. Γενικά, τα ψευδοπλαστικά ρευστά είναι πιο κοινά από τα διασταλτικά. Παρακάτω παρουσιάζεται ένα τυπικό διάγραμμα διατμητικής τάσης – ρυθμού διάτμησης για τα ψευδοπλαστικά ρευστά.



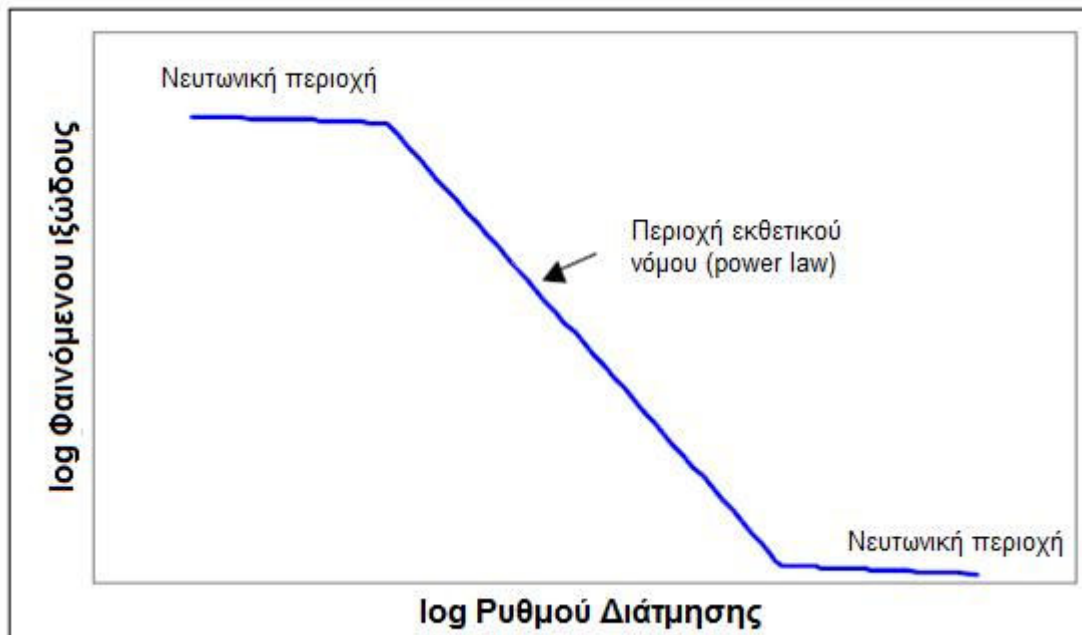
Διάγραμμα 1: Διατμητική τάση συναρτήσει του ρυθμού διάτμησης στα ψευδοπλαστικά ρευστά.

Στη σχέση μεταξύ της διατμητικής τάσης και του ρυθμού διάτμησης,  $\tau = \eta \cdot \dot{\theta}$ , υπεισέρχεται η παράμετρος  $\eta$ , η οποία καλείται φαινόμενο ιξώδες του ρευστού και είναι συνάρτηση του ρυθμού διάτμησης. Σύμφωνα με τα παραπάνω, η γραφική παράσταση του φαινόμενου ιξώδους (apparent viscosity) ως προς το ρυθμό διάτμησης θα έχει τη μορφή:



Διάγραμμα 2: Φαινόμενο ιξώδες συναρτήσει του ρυθμού διάτμησης στα ψευδοπλαστικά ρευστά.

Πολλά ψευδοπλαστικά ρευστά δύνανται να επιδείξουν συμπεριφορά Νευτώνιων ρευστών όταν ο ρυθμός διάτμησης λαμβάνει ακραίες τιμές, είτε χαμηλές είτε υψηλές. Αν σχεδιαστεί σε λογαριθμική κλίμακα το παραπάνω διάγραμμα, προκύπτει μια μορφή του που δείχνει σαφώς την προηγούμενη πρόταση:



Διάγραμμα 3: Φαινόμενο ιξώδες – Ρυθμός διάτμησης στα ψευδοπλαστικά ρευστά σε λογαριθμική κλίμακα.

Οι περιοχές που το φαινόμενο ιξώδες παραμένει σταθερό ονομάζονται Νευτωνικές περιοχές, ενώ η ενδιάμεση περιοχή μπορεί να περιγραφεί από τον εκθετικό νόμο ως εξής:

$$\log \eta = a + b \cdot \log \theta$$

επειδή είναι ευθεία

$$\eta = K \cdot \theta^b$$

με μετασχηματισμό της προηγούμενης σχέσης



όπου  $K = \exp(a)$ .

Αντί για το  $b$ , συνήθως χρησιμοποιείται ως εκθέτης το  $(n-1)$ , οπότε η σχέση γράφεται ως εξής:

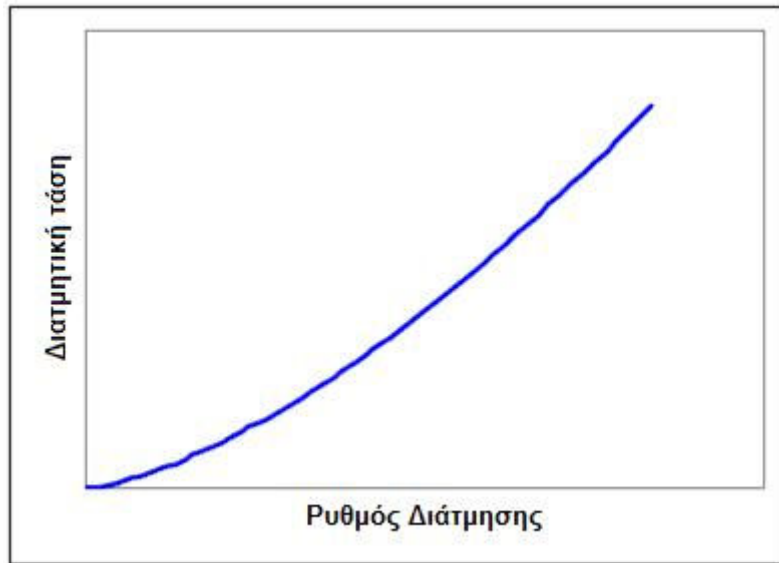
$$\eta = K \cdot \theta^{n-1}$$

Κατόπιν, χρησιμοποιώντας τη σχέση μεταξύ διατμητικής τάσης, φαινόμενου ιξώδους και ρυθμού διάτμησης, λαμβάνεται το μοντέλο του εκθετικού νόμου:

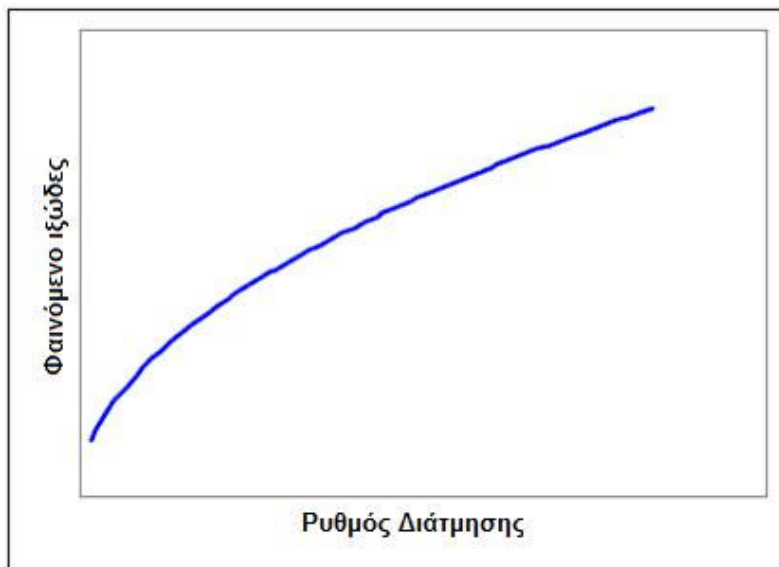
$$\tau = K \cdot \theta^n$$

Εύκολα παρατηρείται ότι για  $n=1$  η σχέση ανάγεται στη Νευτωνική συμπεριφορά. Τυπικά, για τα ψευδοπλαστικά ρευστά το  $n$  είναι ανάμεσα στο  $1/3$  και το  $1/2$ , χωρίς να αποκλείονται άλλες τιμές.

Από την άλλη, μερικά ρευστά, υπόκεινται σε αύξηση του φαινόμενου ιξώδους τους, όταν ο ρυθμός διάτμησης αυξάνει. Τα ρευστά αυτά ονομάζονται διασταλτικά. Αμέσως παρακάτω, παρουσιάζονται τυπικές γραφικές παραστάσεις της εξάρτησης του φαινόμενου ιξώδους καθώς και της διατμητικής τάσης, από το ρυθμό διάτμησης.



Διάγραμμα 4: Διασταλτικά ρευστά, σχέση διατμητικής τάσης και ρυθμού διάτμησης.



Διάγραμμα 5: Σχέση φαινόμενου ιξώδους με το ρυθμό διάτμησης στα διασταλτικά ρευστά.

Τυπικά παραδείγματα της κατηγορίας αυτής των ρευστών είναι το καλαμποκάλευρο, οι αμυλούχες κόλλες, το υγρό σκυρόδεμα, η άμμος και ο χαλαζίας.

Τα περισσότερα διασταλτικά ρευστά, σε πολύ χαμηλούς ρυθμούς διάτμησης, τείνουν να προσομοιάζουν στη συμπεριφορά των ψευδοπλαστικών ρευστών.

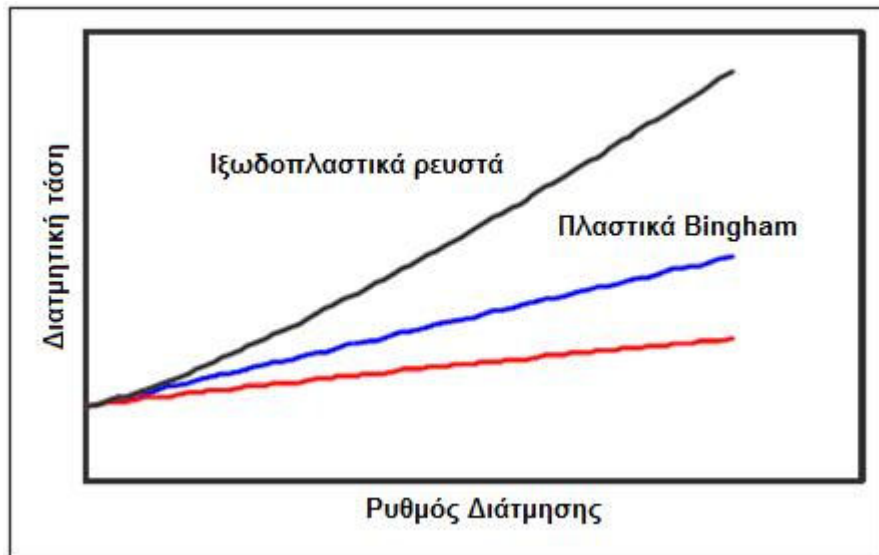
Πλαστικά ρευστά είναι τα μη Νευτωνικά ρευστά, τα οποία δε ρέουν όσο η διατμητική τάση κυμαίνεται σε χαμηλές τιμές. Η διατμητική τάση πρέπει να

ξεπεράσει μια κρίσιμη τιμή η οποία ονομάζεται τάση ροής ή τάση κατωφλίου διάτμησης (yield stress) του ρευστού, έτσι ώστε να ξεκινήσει να ρέει. Αυτή η οριακή τιμή εξαρτάται από τη φύση του ρευστού. Όταν η τιμή αυτή ξεπεραστεί από την εφαρμοζόμενη διατμητική τάση, τότε το ρευστό ρέει συμπεριφερόμενο ως Νευτωνικό ρευστό, με τάση ίση με τη διαφορά της οριακής από την εφαρμοζόμενη. Δηλαδή:

$$\tau - \tau_0 = \mu_{\pi} \cdot \theta$$

όπου  $\mu_{\pi}$  είναι το πλαστικό ιξώδες (ή συντελεστής ακαμψίας) του πλαστικού ρευστού. Η καμπύλη ροής των πλαστικών ρευστών (διάγραμμα διατμητικής τάσης ως προς ρυθμό διάτμησης) είναι μια ευθεία γραμμή με αποτέμνουσα το σημείο  $(0, \tau_0)$ . Η κλίση της ευθείας δηλώνει το πλαστικό ιξώδες. Σημαντική παρατήρηση αποτελεί το ότι το πλαστικό ιξώδες δεν είναι πραγματική ιδιότητα του ρευστού. Από πειραματικά δεδομένα φαίνεται ότι το ιξώδες ενός ρευστού Bingham (άλλη ονομασία για τα πλαστικά ρευστά), δεν παραμένει σταθερό όταν ο ρυθμός διάτμησης υφίσταται σημαντικές μεταβολές. Επομένως η προηγούμενη σχέση περιγράφει ένα ιδανικό πλαστικό ρευστό, αγνοώντας τις αποκλίσεις που προκύπτουν από τις μεταβολές του ρυθμού διάτμησης. Πρακτικά όμως, ακόμα και αυτή η εξιδανικευμένη σχέση, δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα για τα περισσότερα ρευστά της κατηγορίας.

Στο επόμενο διάγραμμα, φαίνεται το διάγραμμα της διατμητικής τάσης ως προς το ρυθμό διάτμησης για ρευστά τύπου Bingham. Εύκολα παρατηρείται η αποτέμνουσα καθώς και η κλίση της ευθείας.



Διάγραμμα 6: Διατμητική τάση ως συνάρτηση του ρυθμού διάτμησης σε διάφορες κατηγορίες ρευστών.

Όταν η εφαρμοζόμενη τάση είναι μικρότερη της οριακής, το ρευστό αντιδρά υφιστάμενο στατική παραμόρφωση, δηλαδή προσεγγίζει τη συμπεριφορά ενός στερεού σώματος.

Για την καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς αυτών των ρευστών μπορεί να δοθεί η εξής ερμηνεία:

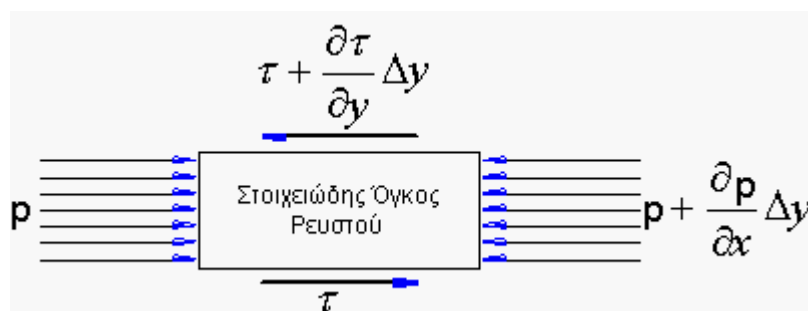
Τα πλαστικά ρευστά σε κατάσταση ηρεμίας έχουν μια συγκεκριμένη τρισδιάστατη ελαστική δομή. Η δομή αυτή είναι ανθεκτική στην επίδραση μικρών διατμητικών τάσεων, όμως όταν υπερβούν μια συγκεκριμένη τιμή, η δομή καταρρέει. Μετά την άρση της διατμητικής τάσης που προκάλεσε την παραμόρφωση ή και την πλήρη κατάρρευση της δομής του πλαστικού ρευστού, η δομή επανέρχεται σταδιακά στην αρχική της μορφή.

### ***Ρευστά Τύπου Bingham***

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενα εδάφια, το σκυρόδεμα χαρακτηρίζεται γενικά ως ρευστό τύπου Bingham. Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει η εξαγωγή του μαθηματικού μοντέλου για τα ρευστά Bingham, το

οποίο αποτελεί τη βάση για τις μελέτες ανάπτυξης μοντέλων προσομοίωσης της ρεολογικής συμπεριφοράς του σκυροδέματος.

Όπως σε κάθε ανάλυση που αφορά τον κλάδο της μηχανικής ρευστών, για να εξαχθεί η σχέση Bingham, η οποία και περιγράφει τη ρεολογική συμπεριφορά του σκυροδέματος, θα πρέπει να εστιαστεί η μελέτη σε έναν στοιχειώδη όγκο ρευστού, όπως αυτός που φαίνεται στην επόμενη εικόνα:



Σχήμα 5: Βασικό σχήμα για την ανάλυση του στοιχειώδους όγκου ρευστού.

Καθώς το ρευστό ρέει, υφίσταται δυνάμεις κατά την έννοια που φαίνονται στο σχήμα. Αναγκαίες παραδοχές για τη συνέχεια της μελέτης είναι οι εξής:

Σταθερή μαζική ροή κατά μήκος του καναλιού, δηλαδή απουσία επιτάχυνσης κατά τη διεύθυνση της κίνησης.

### Μόνιμη κατάσταση.

Από τα προηγούμενα προκύπτει ότι η συνισταμένη των δυνάμεων πάνω στο στοιχειώδη όγκο πρέπει να ισούται με το μηδέν. Άρα υπάρχει ισορροπία δυνάμεων, η οποία εκφράζεται ως εξής:

$$\frac{dp}{dx} = \frac{d\tau}{dy} \quad (1)$$

Η διαμητρική τάση για ένα ρευστό Bingham δίνεται από την επόμενη σχέση:

$$\tau = \tau_0 + \eta \cdot \frac{du}{dy} \quad (2)$$

Εξισώνοντας τις εξισώσεις (1) και (2) εξάγεται το εξής:

$$\frac{dp}{dx} = \frac{d\tau}{dy} = \frac{d}{dy} \left( \tau_0 + \eta \cdot \frac{du}{dy} \right)$$
$$\frac{dp}{dx} = \eta \cdot \frac{d^2u}{dy^2} \quad (3)$$

Με αναδιάταξη της σχέσης (3) βγαίνει ο τύπος:

$$\frac{d^2u}{dy^2} = \frac{1}{\eta} \cdot \frac{dp}{dx}$$

Αν, σύμφωνα με τις παραδοχές,  $\frac{dp}{dx} = \text{σταθερό}$ , τότε με διπλή ολοκλήρωση της (3) προκύπτει το εξής:

$$u = \frac{1}{2 \cdot \eta} \cdot \frac{dp}{dx} \cdot y^2 + C_1 \cdot y + C_2 \quad (4)$$

Για να καθοριστούν οι σταθερές της ολοκλήρωσης,  $C_1$  και  $C_2$ , είναι αναγκαίο να χρησιμοποιηθούν οι οριακές συνθήκες:

Στη θέση  $y = 0$ : Ισχύει η συνθήκη μη ολίσθησης, άρα  $u_{y=0} = 0$ .

Η τριβή στα τοιχώματα του αγωγού πρέπει να εξισορροπείται με την ωθούσα δύναμη πίεσης.

Από την πρώτη οριακή συνθήκη διαπιστώνεται ότι  $u_{y=0} = 0$ .

Η δύναμη τριβής στα τοιχώματα, δίνεται από το γινόμενο του εμβαδού της επιφάνειας επί τη διατμητική τάση στα τοιχώματα.

Η δύναμη πίεσης προκύπτει αν πολλαπλασιάσει κανείς το εμβαδόν της διατομής του αγωγού με τη διαφορά πίεσης μεταξύ των δύο άκρων του αγωγού. Η διαφορά πίεσης συμβολίζεται με  $p$ .

Η επιφάνεια των τοιχωμάτων έχει εμβαδόν:  $W = 2 \cdot b \cdot l$ , όπου  $b$  είναι το πλάτος του καναλιού.

Το εμβαδόν της διατομής είναι:  $S = b \cdot h$ , όπου  $h$  το ύψος του καναλιού.

Εξάγεται ο παρακάτω τύπος:

$$-\left(\tau_0 + \eta \cdot \frac{du}{dy}\bigg|_{y=0}\right) \cdot (2 \cdot b \cdot l) = p \cdot b \cdot h \quad (5)$$

Αναδιατάσσοντας τη σχέση (5) δίνεται:

$$\frac{p}{l} = -\left(\tau_0 + \eta \cdot \frac{du}{dy}\bigg|_{y=0}\right) \cdot \frac{2}{h} \quad (6)$$

Επειδή παρατηρείται σταθερή πτώση πίεσης, αυξανόμενης της διαδρομής κατά τη διεύθυνση της κίνησης έπεται ότι:

$$-\frac{p}{l} = \frac{dp}{dx} \quad (7)$$

Εξισώνοντας κατά μέλη τις εξισώσεις (6) και (7) συνάγεται ότι:

$$\frac{du}{dy}\bigg|_{y=0} = -\frac{1}{\eta} \cdot \left(\frac{h}{2} \cdot \frac{dp}{dx} + \tau_0\right) \quad (8)$$

Με τη βοήθεια αυτής της σχέσης και της εξίσωσης (4), υπολογίζεται η τιμή της σταθεράς  $C_1$  ίση με:

$$C_1 = -\frac{1}{\eta} \cdot \left( \frac{h}{2} \cdot \frac{dp}{dx} + \tau_0 \right)$$

Τελικά, η εξίσωση για την ταχύτητα παίρνει την τελική της μορφή, με αντικατάσταση των σταθερών:

$$u(y) = \frac{1}{2 \cdot \eta} \cdot \frac{dp}{dx} \cdot y^2 - \frac{1}{\eta} \cdot \left( \frac{h}{2} \cdot \frac{dp}{dx} + \tau_0 \right) \cdot y \quad (9)$$

για το  $y$  να κυμαίνεται μεταξύ 0 και  $y_{\text{Βαθμίδα}}$ .

#### Προσδιορισμός του $y_{\text{Βαθμίδα}}$ .

Αφού εξήχθη η εξίσωση υπολογισμού της ταχύτητας, παραγωγίζοντας αυτήν ως προς  $y$ , για την περιοχή πέρα από το  $y_{\text{Βαθμίδα}}$  όπου το ρευστό Bingham συμπεριφέρεται σαν στερεό, λαμβάνεται το  $\left. \frac{du}{dy} \right|_{y_{\text{Βαθμίδα}}} = 0$ .

Με αυτή τη συνθήκη, και με τη σχέση (4) εξάγεται το εξής:

$$0 = \frac{1}{\eta} \cdot \frac{dp}{dx} \cdot y_{\text{Βαθμίδα}} - \frac{1}{\eta} \cdot \left( \frac{h}{2} \cdot \frac{dp}{dx} + \tau_0 \right)$$

αντικαθιστώντας την πτώση πίεσης από την εξίσωση (7), η προηγούμενη σχέση μετατρέπεται στην:

$$y_{\text{Βαθμίδα}} = \frac{h}{2} + \frac{\tau_0}{-\frac{p}{l}} \quad (10)$$

#### Προσδιορισμός μέγιστης ταχύτητας $u_{\text{max}}$ .

Ισχύει ότι  $u_{\text{max}} = u(y_{\text{Βαθμίδα}})$



Από αυτό συνεπάγεται ότι πρέπει να αντικατασταθεί η (10) στην (9):

$$u_{\max} = \frac{dp}{dx} \cdot \left( \frac{h}{2} + \frac{\tau_0}{\frac{dp}{dx}} \right)^2 - \frac{1}{\eta} \cdot \left( \frac{h}{2} \cdot \frac{dp}{dx} + \tau_0 \right) \cdot \left( \frac{h}{2} + \frac{\tau_0}{\frac{dp}{dx}} \right)$$

Απλοποιώντας την παράσταση, εξακολουθώντας να είναι επιλυμένη ως προς τη  $u_{\max}$ , εξάγεται το παρακάτω:

$$u_{\max} = -\frac{1}{2\eta} \cdot \left( \frac{dp}{dx} \frac{h^2}{4} + h \cdot \tau_0 + \frac{\tau_0^2}{\frac{dp}{dx}} \right) \quad (11)$$

### Ογκομετρική παροχή

Η συνολική ογκομετρική παροχή διαμέσου του καναλιού, μπορεί να υπολογιστεί σαν το άθροισμα δύο επιμέρους παροχών. Η μία προέρχεται από την κίνηση του μέρους του ρευστού που βρίσκεται κοντά στο κέντρο του αγωγού, όπου και το ρευστό συμπεριφέρεται ως στερεό. Η δεύτερη, αντιστοιχίζεται στη ροή του ρευστού που είναι κοντά στα τοιχώματα και έχει βαθμίδα ταχύτητας, και άρα ακολουθεί τα σχήματα συμπεριφοράς του υγρού. Σημειώνεται, ότι γίνεται χρήση της συμμετρίας του εκάστοτε αγωγού, ώστε να διευκολυνθούν οι πράξεις.

$$\dot{Q} = b \cdot \left( 2 \cdot \int_0^{y_{\text{Βαθμ}}} u(y) dy + 2 \cdot u_{\max} \cdot \left( \frac{h}{2} - y_{\text{Βαθμ}} \right) \right) \quad (12)$$

Υγρό
Στερεό

Το μέρος που συμπεριφέρεται ως στερεό, μπορεί εύκολα να υπολογιστεί, καθώς πιο πάνω καθορίστηκαν τα μεγέθη  $y_{\text{Βαθμίδα}}$  και  $u_{\max}$ .

$$2 \cdot u_{\max} \left( \frac{h}{2} - y_{\text{grenz}} \right) = -\frac{1}{\eta} \left( \frac{dp}{dx} \frac{h^2}{4} + h \cdot \tau_0 + \frac{dp}{dx} \left( \frac{h}{2} - \left( \frac{h}{2} + \frac{dp}{dx} \right) \right) \right) = \frac{1}{\eta} \left( \frac{\tau_0 h^2}{4} + \frac{dp}{dx} + \frac{dp}{dx} \right) \quad (13)$$

Για το μέρος του ρευστού που συμπεριφέρεται ως υγρό στην εξίσωση (12) υπολογίζεται το ολοκλήρωμα, με το  $y_{\text{Βαθμίδα}}$  να είναι γνωστό.

$$\begin{aligned} 2 \int_0^{y_{\text{grenz}}} u(y) dy &= 2 \int_0^{y_{\text{grenz}}} \left( \frac{1}{2\eta} \frac{dp}{dx} y^2 - \frac{1}{\eta} \left( \frac{h}{2} \frac{dp}{dx} + \tau_0 \right) y \right) dy = \\ &= \frac{1}{\eta} \int_0^{y_{\text{grenz}}} \left( \frac{dp}{dx} y^2 - \left( h \frac{dp}{dx} + 2\tau_0 \right) y \right) dy = \\ &= \frac{1}{\eta} \left( \frac{1}{3} \frac{dp}{dx} y_{\text{grenz}}^3 - \frac{1}{2} \left( h \frac{dp}{dx} + 2\tau_0 \right) y_{\text{grenz}}^2 \right) = \\ &= \frac{1}{\eta} \left( \frac{1}{3} \frac{dp}{dx} \left( \frac{h}{2} + \frac{\tau_0}{\frac{dp}{dx}} \right)^3 - \frac{dp}{dx} \left( \frac{h}{2} + \frac{\tau_0}{\frac{dp}{dx}} \right) \left( \frac{h}{2} + \frac{\tau_0}{\frac{dp}{dx}} \right)^2 \right) = \\ &= -\frac{2}{3} \frac{1}{\eta} \frac{dp}{dx} \left( \frac{h}{2} + \frac{\tau_0}{\frac{dp}{dx}} \right)^3 \end{aligned} \quad (14)$$

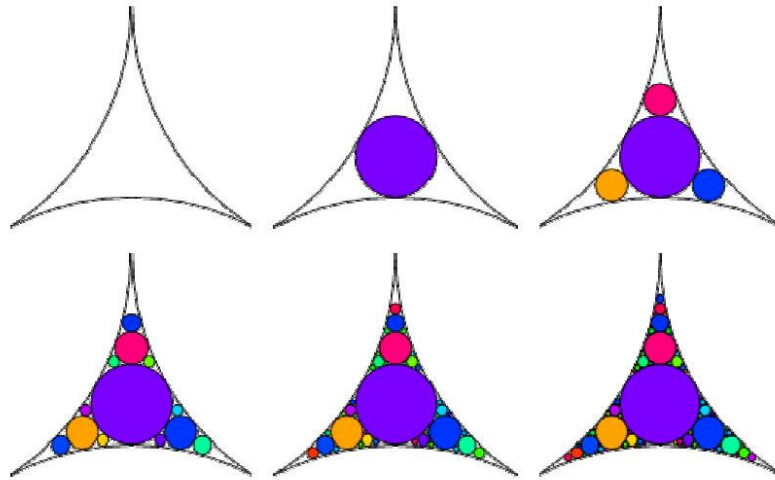
Αθροίζοντας το υγρό και το στερεό μέρος, τις εξισώσεις (13) και (14) αντίστοιχα, εξάγεται η παρακάτω συνολική ογκομετρική παροχή.

$$\dot{Q} = \frac{b}{12\eta} \frac{1}{\left( \frac{dp}{dx} \right)^2} \left( -h^3 \left( \frac{dp}{dx} \right)^3 + 4\tau_0^3 - 3\tau_0 h \left( \frac{dp}{dx} \right)^2 \right)$$

### III. Πυκνότητα Στοιβαξης (Packing Density)

Η διάταξη σφαιρών ή σφαιρικών σωματιδίων σε συγκεκριμένο όγκο είναι ένα μαθηματικό πρόβλημα που όμως βρίσκει εφαρμογή ευρέως σε τεχνολογικές εφαρμογές.

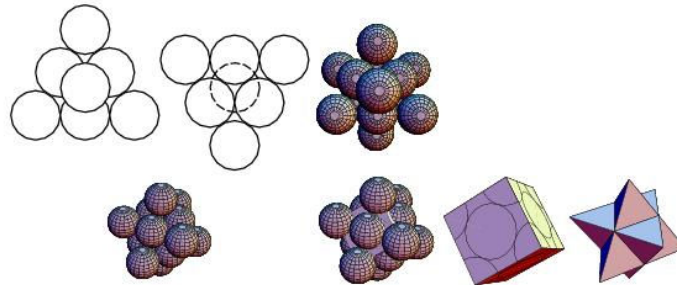
Ουσιαστικά πρόκειται για την μελέτη του πόσο καλά θα τοποθετηθούν οι σφαίρες σε ένα κυβικό δοχείο. Δηλαδή πόσο αποτελεσματικά θα καλύψουν τα μεταξύ τους κενά μεγιστοποιώντας το πηλίκο του όγκου των σφαιρών προς τον όγκο του κυβικού δοχείου. Αυτός ο λόγος είναι γνωστός ως πυκνότητα στοίβαξης (packing density).



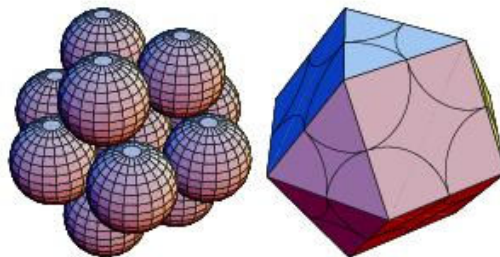
*Εικόνα 6: Σταδιακή πλήρωση του χώρου μεταξύ τριών εφαιπτόμενων ίσων κύκλων.*

Από τις πρώτες εργασίες πάνω σε αυτό το πρόβλημα, έγινε σαφές ότι πρέπει να ακολουθηθεί μια δομημένη διάταξη των σφαιρών και όχι να τοποθετηθούν με τυχαίο τρόπο. Έτσι, αναπτύχθηκαν δομές ανάλογες με τα κρυσταλλικά πλέγματα. Στις τρεις διαστάσεις και για όμοιες σφαίρες, εφαρμόζονται τρεις περιοδικές διατάξεις:

- Χωροκεντρωμένο κυβικό
- Εδροκεντρωμένο κυβικό



- Εξαγωνικό



Αξίζει να σημειωθεί ότι το κυβικό εδροκεντρωμένο είναι πιο πυκνό από το κυβικό χωροκεντρωμένο και γι' αυτό το πρώτο μπορεί να αναφερθεί και ως “πυκνό κυβικό”.

Πρώτος ο Kepler το 1611 υπέθεσε ότι η διάταξη που ακολουθεί ένα από τα παραπάνω σχήματα (εδροκεντρωμένο κυβικό ή εξαγωνικό) είναι εκείνη που επιτυγχάνει την υψηλότερη πυκνότητα. Από τότε το πρόβλημα είναι γνωστό ως “πρόβλημα Kepler”.

Η έννοια της πυκνότητας που μελετάται από τους μαθηματικούς εμφανίζει εκπληκτική ομοιότητα με τον όρο του “αριθμού ατομικής πλήρωσης” (APF) που χρησιμοποιείται στην κρυσταλλογραφία.

Στον επόμενο πίνακα φαίνονται οι τιμές του APF και της πυκνότητας για τα δύο επικρατέστερα συστήματα.

Πίνακας 9: Βασικά χαρακτηριστικά κύριων κρυσταλλικών συστημάτων.

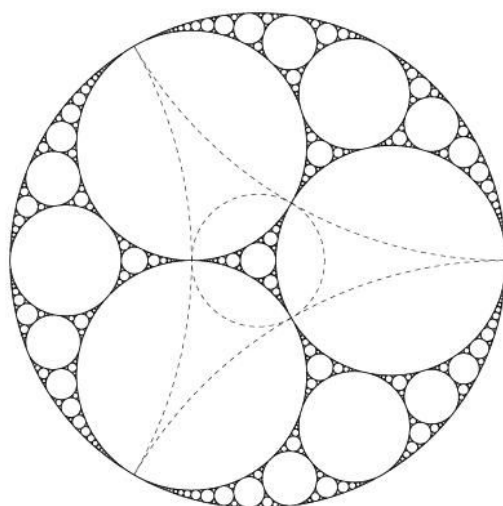
Σύστημα	Συντομογραφία	APF	$\eta$ (packing density)
Κυβικό εδροκεντρωμένο	fcc	0,74	74,048%
Εξαγωνικό	hcp	0,74	74,048%

Ένας ακόμη όρος με ενδιαφέρον για αυτού του είδους τις αναλύσεις είναι ο αριθμός συνδιάταξης (kissing number). Αναφέρεται στον αριθμό των σφαιρών με τις οποίες έρχεται σε επαφή μια τυχαία σφαίρα του πλέγματος. Ο αριθμός συνδιάταξης είναι 12 και για το κυβικό εδροκεντρωμένο και για το εξαγωνικό. Δηλαδή, ένα συγκεκριμένο σφαιρικό σωματίδιο έρχεται σε επαφή με άλλα 12 στο πλέγμα του.

Εκτός από τη γεωμετρική ομορφιά τους, οι μοναδικοί συμμετρικοί τρόποι με τους οποίους στοιβάζονται οι σφαίρες, χρησιμοποιούνται και σαν μοντέλα προσέγγισης της ιδανικότητας για πυκνές στοιβάξεις κόκκων. Για παράδειγμα, αν και δεν είναι δυνατό να αναμένεται πλήρης και ακριβής αναπαραγωγή των θέσεων των σφαιρών, η κατανομή μεγεθών μιας τέτοιας στοιβάξης είναι καλό δεδομένο ώστε να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία σκυροδέματος υψηλής επιτελεστικότητας και ΑΣΣ, αν οι κόκκοι των αδρανών προσεγγισθούν σε σφαιρικά σωματίδια.

Η γνωστή Απολλώνια στοιβάξη (Apollonian Packing) κύκλων ή Απολλώνιο πλέγμα, είναι ένα παράδειγμα στις δύο διαστάσεις. Οι Herrmann et al<sup>1</sup> ανέπτυξαν έναν αλγόριθμο για να παράγουν διάφορες στοιβάξεις κύκλων, ανάμεσα στις οποίες βρίσκεται και η Απολλώνια ως μια ειδική περίπτωση.

<sup>1</sup> H.J. Herrmann, G. Mantica, and D. Bessis, 1990, Space-filling bearings. Phys. Rev. Lett. 56 3223-6.



Εικόνα 7: Σχηματική απεικόνιση Απολλώνιου πλέγματος.

Στις τρεις διαστάσεις, μόνο μία χωροπληρωτική στοίβαξη έχει αναπτυχθεί και μελετηθεί. Οι Peikert et al<sup>1</sup> χρησιμοποιούν μια αρκετά αποδοτική μέθοδο που ονομάζεται ‘αλγόριθμος αναστροφής’ (inversion algorithm) ώστε να παραχθεί το Απολλώνιο σχήμα στο χώρο.

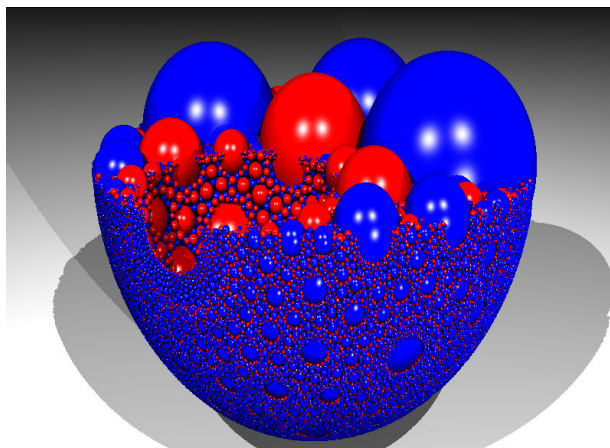
Η τεχνολογική εφαρμογή όμως απέχει από τη θεωρητική μελέτη, μιας και τα σωματίδια δεν είναι ποτέ σχεδόν του ίδιου μεγέθους. Εν προκειμένω, στο τσιμέντο, το μίγμα των στερεών αποτελείται από διαφόρων μεγεθών σωματίδια που στην καλύτερη περίπτωση προσεγγίζουν τη σφαιρικότητα. Σε αυτές τις περιπτώσεις, αναπτύσσονται ειδικά μοντέλα που λαμβάνουν υπόψη τους τη διαβάθμιση του μεγέθους αλλά και τον παράγοντα σφαιρικότητας των σωματιδίων.

Όταν αναμιγνύονται υλικά που έχουν προέλθει από θραύση και μείωση μεγέθους με συνδετικά υλικά, όπως στην περίπτωση των αδρανών με το τσιμέντο προς δημιουργία σκυροδέματος, είναι κρίσιμο να επιτευχθεί η μεγαλύτερη δυνατή “σωματιδιακή πλήρωση” (particle pack). Με αυτό τον όρο εννοείται ο συνδυασμός των υλικών έτσι ώστε το μίγμα να έχει τη μεγαλύτερη πυκνότητα όταν ανακατεύεται χωρίς την προσθήκη νερού. Η επίτευξη της υψηλότερης πυκνότητας μπορεί να αυξήσει σημαντικά τις αντοχές και να μειώσει την απαίτηση σε υδατικό περιεχόμενο. Τα τελευταία επιτυγχάνονται

---

<sup>1</sup> M. Borkovec, W. de Paris, and R. Peikert, The fractal dimension of the Apollonian sphere packing. *Fractals* 2 (4), 521-526, 1994

αυξάνοντας την επιφάνεια σύνδεσης ανά μονάδα μάζας του υλικού. Όσο μεγαλύτερη είναι η πυκνότητα, τόσο περισσότερα είναι τα σωματίδια με τα οποία έρχεται σε επαφή ένα συγκεκριμένο σωματίδιο, συνεπώς αυξάνει η επιφάνεια σύνδεσης, με άμεση επίδραση στις μηχανικές αντοχές.



*Εικόνα 8: Υπολογιστική προσομοίωση ενός μίγματος με μεγάλο εύρος κατανομής, γνωστό και ως 'στοίβαξη Mahmoodi'.*

Οι διεπιφάνειες μεταξύ των σωματιδίων είναι ο χώρος στον οποίο γίνεται η μεταφορά των τάσεων οι οποίες ασκούνται σε στερεά που αποτελούνται από κόκκους. Η κατανομή και η φύση των διασωματιδιακών επαφών πρόκειται να διαδραματίσουν εξέχοντα ρόλο στις μηχανικές ιδιότητες του στερεού σώματος.

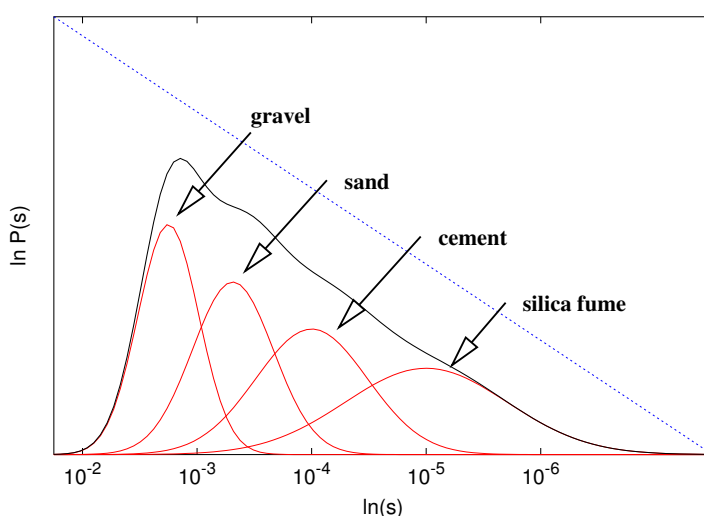
Οι παράμετροι που επηρεάζουν τη φύση και την κατανομή των επαφών, οι οποίες είναι το σχήμα των σωματιδίων και η κατανομή των μεγεθών τους, επηρεάζουν επίσης τις μηχανικές ιδιότητες. Οι ερευνητές έχουν χρησιμοποιήσει φυσικές μεθόδους για τη λήψη πληροφοριών για τις διεπιφάνειες, όπως η χρώση των σωματιδίων, καθώς και οπτικές μεθόδους. Προκαταρκτικές εργασίες με αυτές τις μεθόδους δείχνουν ότι οι μέθοδοι αυτές δε θα έχουν την απαιτούμενη διακριτική ικανότητα ώστε να διακρίνουν τις διεπαφές που μεταφέρουν τάσεις από εκείνες που δεν μεταφέρουν.

Το πρόβλημα εντείνεται, όταν μελετώνται συστήματα με πολύ ευρεία κατανομή μεγεθών. Αργότερα, οι προσπάθειες στράφηκαν στη χρήση υπολογιστών ώστε να γίνει προσομοίωση, και μέσω αυτής να μελετηθούν η φύση και η κατανομή των επαφών. Η σωματιδιακή στοίβαξη έχει και

θεωρητική και πρακτική σπουδαιότητα σε πολλές περιοχές της επιστήμης και της μηχανικής. Η υπολογιστική προσομοίωση της σωματιδιακής στοίβαξης διαδίδεται και εφαρμόζεται ευρέως σε συστήματα που περιέχουν σωματίδια ενός μεγέθους, σωματίδια με κατανομή μεγεθών μικρού εύρους και λογαριθμικής – κανονικής κατανομής.

Σε κάποιες βιομηχανίες, είναι απαραίτητο να αντιμετωπισθούν ευρείες κατανομές μεγεθών. Για παράδειγμα, τα αδρανή που χρησιμοποιούνται στα ασφαλτικά, έχουν τυπικά μέγιστο κόκκο 19mm, ενώ παράλληλα το 5% κ.β. των σωματιδίων είναι λεπτότερα από 75μm. Τέτοιου είδους προσομοιώσεις θέτουν σημαντικές προκλήσεις, σε θέματα επεξεργαστικής ισχύος αλλά και αλγορίθμων που θα μπορούν να χειριστούν σωματίδια με διαφορά δύο τάξεων μεγέθους και άνω.

Οι πυκνές στοιβάξεις κοκκωδών σωματιδίων εμφανίζουν εξαιρετική σημαντικότητα για τους κλάδους παραγωγής κεραμικών και σκυροδέματος. Η σημαντικότητα αυξάνεται όσο αυξάνεται και η ανάγκη για πιο ανθεκτικά υλικά. Ο παράγων κλειδί στο θέμα αυτό έγκειται στην κατανομή μεγεθών των χρησιμοποιούμενων υλικών. Η εξαιρετικά ιδανική περίπτωση εμφανίζεται σε κλίνες σφαιρών, που συντάσσονται σύμφωνα με το Απολλώνιο σχήμα και τα συστατικά τους ακολουθούν εκθετική κατανομή μεγεθών (power law).



Διάγραμμα 7: Ιδανική κατανομή μεγεθών σωματιδίων για προσέγγιση του Απολλώνιου πλέγματος.



Όσον αφορά τα σωματίδια, αναφέρθηκε ότι στις πλείστες των περιπτώσεων των τεχνολογικών εφαρμογών δεν είναι όμοια μεταξύ τους. Οι παράμετροι που διαφοροποιούνται είναι το μέγεθος και το σχήμα.

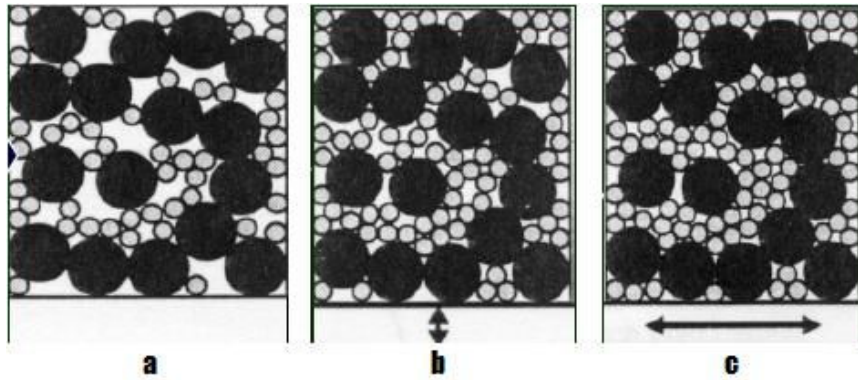
Για το μέγεθος πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι ένα μη σφαιρικό σωματίδιο έχει πολλές διαστάσεις. Δεδομένου ότι είναι αδύνατο αλλά και μη πρακτικό να μετρηθούν όλες, το μέγεθός του θα εξαρτάται από τον τρόπο μέτρησης, την χαρακτηριστική ιδιότητα του σωματιδίου (το ρόλο του μέσα στο μίγμα) και τη μορφολογία του.

Σχετικά με το σχήμα του σωματιδίου, αυτό που προσδιορίζεται είναι η απόκλιση του από τη σφαιρικότητα. Αυτό μπορεί να γίνει με δύο τρόπους. Είτε να μετρηθούν δυο διαστάσεις του χαρακτηρισμένες ως μήκος και πλάτος και να προσδιοριστεί ο λόγος τους, είτε να υπολογιστεί το μέγεθος της σφαιρικότητας. Η σφαιρικότητα είναι ο λόγος της περιφέρειας της προβολής ενός σωματιδίου, προς την περιφέρεια ενός κύκλου ίσης επιφάνειας με την προβολή του σωματιδίου.

$$SPHT = \frac{U}{2 \cdot \sqrt{\pi \cdot A}}$$

Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η πυκνότητα μιας κλίνης σωματιδίων μπορεί να διαφοροποιείται ανάλογα τη διαδικασία της τοποθέτησής τους στο δοχείο. Έτσι, μια αραιή δομή επιτυγχάνεται αν απλά τοποθετηθούν τα σωματίδια στο δοχείο χωρίς καμία ανάδευση ή ανακίνηση. Με λίγα “χτυπήματα” στο δοχείο, η πυκνότητα αυξάνει, μιας και τα λεπτότερα σωματίδια κινούνται ανάμεσα στα διάκενα των μεγαλύτερων, καλύπτοντάς τα. Στην περίπτωση που εφαρμοσθεί συνεχής δόνηση για κάποιο εύλογο χρονικό διάστημα, η κλίνη αποκτά πυκνότητα που προσεγγίζει τη θεωρητικά προβλεπόμενη ως μέγιστη.

Στην επόμενη εικόνα φαίνεται η σχηματική αναπαράσταση των τριών περιπτώσεων.



*Εικόνα 9: Διάταξη σφαιρών σε διάφορα επίπεδα ανακίνησης  
 a. Αρχική κατάσταση δείγματος  
 b. Κατάσταση μετά από ανακίνηση στην κατακόρυφη διεύθυνση  
 c. Κατάσταση μετά από ανακίνηση στην οριζόντια διεύθυνση*

Αρκετοί ήταν οι επιστήμονες που ασχολήθηκαν σε θεωρητικό αλλά και πειραματικό επίπεδο προς το στόχο της εύρεσης μιας μεθόδου ώστε να αυξηθεί η πυκνότητα πλήρωσης για σωματίδια άνισα κατανεμημένων μεγεθών και σχημάτων. Η σύγχρονη τάση αυτής της ερευνητικής περιοχής είναι η χρήση υπολογιστών και αριθμητικών προσομοιώσεων.

Στον ακόλουθο πίνακα εμφανίζεται περιληπτικά το παρελθόν της έρευνας σε αυτό το αντικείμενο.

Πίνακας 10: Εργασίες στο πεδίο της πυκνότητας πλήρωσης.

Επιστημονικές Εργασίες		
Πρωταρχικές εργασίες		
Fuller και Thomson	1907	Καμπύλη διαβάθμισης με προσδιορισμό ελαχίστου κενών, βασισμένη σε πειράματα
Andreasen και Andersen	1930	Packing density σε κεραμικά υλικά
Furnas	1931	Θεωρία packing σε σφαιρικά σωματίδια
Manegold	1955	Packing density σε γεωτεχνικές εφαρμογές
Εργασίες της περιόδου προ υπολογιστή		
Hummel	1959	Πειραματικός προσδιορισμός του πορώδους αδρανών με παραμέτρους το εκθετικό του Fuller και τον παράγοντα σχήματος
Schwanda	1959	Σχήμα υπολογισμού λαμβάνοντας υπόψη τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των σωματιδίων
Peronius και Sweeting	1985	Εμπειρική εξίσωση του πορώδους συναρτήσει του εκθετικού του Fuller, του παράγοντα σχήματος και της συμπύκνωσης
Aberg	1992	Εμπειρική εξίσωση του πορώδους συναρτήσει του σχήματος για κάθε κατανομή μεγεθών
Yu, Standish, Zou	1993 1997	Θεωρητικό μοντέλο του πορώδους για συνεχείς ή ενός μεγέθους κατανομές διαφορετικού σχήματος. Απαραίτητη η πειραματική επαλήθευση
Tsirel	1997	Εμπειρική εξίσωση του πορώδους σε κατανομές σύμφωνα με τον Fuller σα συνάρτηση του σχήματος των σωματιδίων
Εργασίες της περιόδου των υπολογιστών		
Glavind et.al.	1999	Μοντέλο βασισμένο στα δυαδικά μίγματα με γενίκευση στα μίγματα με ποικιλία μεγεθών.
De Larrard	1999	Πειραματικός προσδιορισμός πυκνοτήτων. Μοντέλο πλήρωσης θραυστών υλικών πολλών μεγεθών λαμβάνοντας υπόψη αλληλεπιδράσεις μεταξύ σωματιδίων καθώς και επιδράσεις των τοιχωμάτων
Stroeven	1999	Προσομοίωση DEM πυκνών τυχαίων κλινών με διαφορετικές κατανομές μεγεθών
Stoyan	2001	Στατιστική ανάλυση προσομοιωμένων τυχαίων κλινών σφαιρών με τυχαίες διαμέτρους
Latham	2001	Μοντέλο σχηματισμού χωροπληρωμένου τετραέδρου και μοντέλο δυναμικής αλληλεπίδρασης για σωματίδια πραγματικού μεγέθους

Η εργασία του Fuller το 1907, έδωσε το πρώτο ερευνητικό αποτέλεσμα σε αυτή την περιοχή. Η εξίσωση που πρότεινε είναι η

$$Q = \left( \frac{x}{x_{\max}} \right)^m, m = 0,5.$$

Η εκθετική αυτή εξίσωση αποτέλεσε τη βάση πολλών από τις μεταγενέστερες εργασίες μέχρι και το 1997 στην εργασία του Tsiler.

### 1.2.11. Σημαντικές Ιδιότητες Νωπού ΑΣΣ

Οι χαρακτηριστικές ιδιότητες του ΑΣΣ είναι:

- **Ρευστότητα ή ικανότητα πλήρωσης (filling ability)** – Είναι η ικανότητα του σκυροδέματος να ρέει υπό την επίδραση της βαρύτητας ή της πίεσης (π.χ. άντληση) και να γεμίζει πλήρως τον ξυλότυπο και τον εσωκλειώμενο οπλισμό.
- **Ικανότητα διέλευσης (passing ability)** – Η ικανότητα του σκυροδέματος να διέρχεται μέσα από αρκετά στενές περιοχές του ξυλότυπου και από πολύ πυκνό οπλισμό, χωρίς την έμφραξη των χονδρόκοκκων αδρανών.
- **Αντίσταση στην απόμιξη** – Η ικανότητα του φρέσκου σκυροδέματος να διατηρεί την ομοιογένειά του κατά τη διάρκεια της διάστρωσης και ωρίμανσης.

Είναι απαραίτητο να εκτιμώνται και οι τρεις ιδιότητες για κάθε σύνθεση αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος. Από την πλευρά της συσχέτισης των αποτελεσμάτων των δοκιμών με την απόδοση του αυτοσυμπυκνούμενου στην κατασκευή, δεν υπάρχουν σαφείς σχέσεις, παρά μόνο όρια συμμόρφωσης, τα οποία δεν είναι σαφώς καθορισμένα λόγω έλλειψης ακριβών δεδομένων.

Ακόμη, αυτά τα όρια συμμόρφωσης είναι διαφορετικά για οριζόντια διάστρωση και για κατακόρυφη χύτευση. Ο οπλισμός και η πυκνότητά του διαδραματίζουν πρωτεύοντα ρόλο στη θέσπιση των ορίων. Επίσης, υπάρχουν περιορισμοί σχετικά με το μέγεθος των αδρανών και την εκάστοτε πειραματική διάταξη.

### 1.2.12. Δοκιμές για το νωπό ΑΣΣ

Από την εμφάνιση του αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος, υπήρξε η ανάγκη προσδιορισμού κυρίως των ρεολογικών ιδιοτήτων του, μιας και αυτές είναι το σημείο σημαντικής διαφοροποίησής του από τα συμβατικά σκυροδέματα. Έτσι, αναπτύχθηκαν διάφορες μέθοδοι οι οποίες βρίσκονται συνεχώς σε εξέλιξη, γι' αυτό και καμία δεν έχει προτυποποιηθεί. Ο σκοπός τους είναι να παρέχουν μία άμεση εκτίμηση της εργασιμότητας του σκυροδέματος, είτε στον τόπο της κατασκευής είτε στο εργαστήριο. Άρα, πρέπει να εκτιμηθούν τρεις διαφορετικές ιδιότητες για το νωπό αυτοσυμπυκνούμενο σκυροδέμα που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο εδάφιο και είναι περιληπτικά οι εξής:

- *Η ικανότητα πλήρωσης ή ρευστότητα*
- *Η ικανότητα διέλευσης ή διελευσιμότητα*
- *Η αντίσταση στην απόμιξη ή σταθερότητα*

Είναι πρόδηλο ότι δεν είναι δυνατό να μετρηθούν και οι τρεις αυτές ιδιότητες με μία δοκιμή. Επίσης είναι απαραίτητο να εκτιμώνται και οι τρεις ιδιότητες για κάθε σύνθεση αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος. Από την πλευρά της συσχέτισης των αποτελεσμάτων των δοκιμών με την απόδοση του αυτοσυμπυκνούμενου στην κατασκευή, δεν υπάρχουν σαφείς σχέσεις, παρά μόνο όρια ανοχής ή συμμόρφωσης, τα οποία δεν είναι σαφώς καθορισμένα λόγω έλλειψης ακριβών δεδομένων. Ακόμη, αυτά τα όρια

συμμόρφωσης είναι διαφορετικά για οριζόντια διάστρωση και για κατακόρυφη χύτευση. Προς αποφυγήν τυχαίων σφαλμάτων, συνιστάται η διπλή εκτέλεση της κάθε δοκιμής. Ο σπλισμός και η πυκνότητά του διαδραματίζουν πρωτεύοντα ρόλο στη θέσπιση των ορίων. Επίσης, υπάρχουν περιορισμοί σχετικά με το μέγεθος των αδρανών και την εκάστοτε πειραματική διάταξη.

Στον Πίνακα 11, γίνεται μια σύνδεση των δοκιμών και των αντίστοιχων μετρούμενων ή προσδιοριζόμενων ιδιοτήτων:

*Πίνακας 11: Ιδιότητες νωπού ΑΣΣ και αντίστοιχες δοκιμές.*

Εξεταζόμενη ιδιότητα	Δοκιμή Ελέγχου	Μετρούμενο μέγεθος
Ικανότητα πλήρωσης	Εξάπλωση (slump test) Κώνος σχήματος V (V-Funnel test)	Συνολική εξάπλωση Χρόνος εκροής Ποσοστό διέλευσης
Ικανότητα διέλευσης	Δοκιμή δοχείου L (L-Box) Δοκιμή δοχείου U (U-Box) Δοκιμή με δακτύλιο J (J-Ring)	Διαφορά στάθμης Διαφορά ύψους εντός και εκτός του δακτυλίου
Αντίσταση στην απόμζξη	Δοκιμή με κόσκινα (sieve test)	Ποσοστό κατακράτησης

### *a. Δοκιμή εξάπλωσης*

Μία από τις συνηθέστερες δοκιμές για την εκτίμηση της ελεύθερης οριζόντιας ροής χωρίς εμπόδια είναι η δοκιμή εξάπλωσης (slump cone test), κατά την οποία μετρείται η διάμετρος οριζόντιας εξάπλωσης του νωπού σκυροδέματος.



*Εικόνα 10: Εξοπλισμός για τη δοκιμή εξάπλωσης.*

Η πειραματική διάταξη αποτελείται από το μεταλλικό δοχείο με σχήμα κώνου, το οποίο φαίνεται στην εικόνα. Η μεγάλη περιφέρεια του κώνου εφαρμόζει καλά σε λεία επιφάνεια. Κατόπιν, από την μικρή περιφέρεια, που βρίσκεται στο πάνω μέρος, ο κώνος πληρώνεται με το προς μέτρηση σκυρόδεμα. Η πλήρωση γίνεται σε τρία στρώματα, χωρίς να επιβάλλεται συμπίκνωση. Συνολικά χρησιμοποιούνται περί τα 6L σκυροδέματος. Όταν το σκυρόδεμα φτάσει το πάνω χείλος, αποξύνεται ώστε να αποκτήσει επίπεδη επιφάνεια. Ακολούθως, ο μεταλλικός κώνος απομακρύνεται κατακόρυφα προς τα πάνω, και το σκυρόδεμα, μένοντας ελεύθερο, αρχίζει να εξαπλώνεται. Μετράται η διάμετρος του εξαπλωμένου σκυροδέματος, τιμή η οποία αποτελεί την τιμή της εξάπλωσης. Για μεγαλύτερη ακρίβεια, μετρώνται οι διάμετροι σε δυο κάθετες διευθύνσεις και λαμβάνεται ο μέσος όρος. Συγχρόνως, μετράται ο χρόνος που απαιτείται για να φτάσει το σκυρόδεμα τον κύκλο με διάμετρο 500mm.

#### ***b. Δοκιμή με δακτύλιο J***

Η μέθοδος αυτή είναι κατάλληλη για την εκτίμηση της ικανότητας διέλευσης μέσα από τα διάκενα του οπλισμού. Η πειραματική διάταξη αποτελείται από ράβδους οπλισμού τοποθετημένες κατακόρυφα σε μεταλλική πλάκα υπό τη διάταξη δακτυλίου. Τα διάκενα μεταξύ των οπλισμών καθορίζονται ανάλογα με το μέγιστο μέγεθος των χονδροκόκκων αδρανών κάθε μίγματος. Και πάλι με χρήση ενός δοχείου σε σχήμα κολουρου κώνου (όπως και στη δοκιμή εξάπλωσης), το σκυρόδεμα αφήνεται να εξαπλωθεί περνώντας μέσα από τα διάκενα του οπλισμού.



Εικόνα 11: Εξοπλισμός δοκιμής J-Ring.

Τελικά μετράται η διαφορά ύψους του σκυροδέματος μέσα και έξω από το δακτύλιο οπλισμού (μέσος όρος υψομετρικής διαφοράς σε τέσσερα σημεία) και η διάμετρος εξάπλωσης (μέση τιμή δύο κάθετων διαμέτρων).

$$B_J = \frac{(\Delta h_{x1} + \Delta h_{x2} + \Delta h_{y1} + \Delta h_{y2})}{4} - \Delta h_0 \quad 1$$

Το κύριο μειονέκτημά της είναι ότι εκτελείται δίχως περιορισμούς χώρου και γεωμετρίας και έτσι αποτυγχάνει να προσομοιώσει τη ροή του σκυροδέματος μέσα στον ξυλότυπο.

Όσον αφορά τα αποτελέσματα, μπορούν να ερμηνευθούν απλά. Έτσι, η ικανότητα διέλευσης του σκυροδέματος μικραίνει όταν μεγαλώνει η υψομετρική διαφορά. Τυχόν έμφραξη (ή μπλοκάρισμα) και απόμιξη μπορούν πολύ εύκολα να παρατηρηθούν.

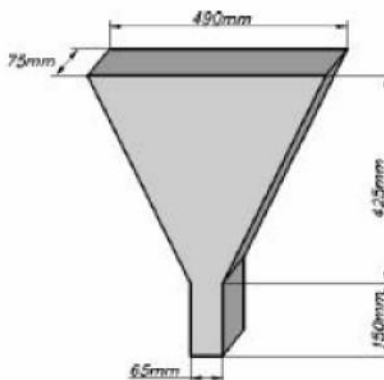
### *c. Δοκιμή με χοάνη V*

Με τη δοκιμή αυτή εκτιμάται η ρευστότητα του αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος. Για την εκτέλεση της δοκιμής απαιτείται μια μεταλλική χοάνη

<sup>1</sup> Η σχέση αυτή προέρχεται από την εργασία Test Methods for SCC του Claus Pade.



σχήματος V ορθογωνικής διατομής. Η χοάνη γεμίζεται με περίπου 12L σκυροδέματος και αφήνεται να εκρεύσει όλο το υλικό, μετρώντας τον απαιτούμενο χρόνο. Η δεύτερη δοκιμή περιλαμβάνει και την εκτίμηση της απόμιξης. Το σκυρόδεμα αφήνεται μέσα στη χοάνη για 5min σε ηρεμία, ώστε να παρατηρηθεί οποιοσδήποτε διαχωρισμός. Στην περίπτωση που παρουσιαστεί απόμιξη, ο χρόνος εκροής αυξάνεται σημαντικά.



Εικόνα 12: Χοάνη σχήματος V.

Οι μικροί χρόνοι εκροής σηματοδοτούν αυξημένη ικανότητα ροής. Για το αυτοσυμπυκνούμενο, χρόνοι εκροής της τάξεως των 10s είναι ικανοποιητικοί. Αν οι χρόνοι εκροής είναι αυξημένοι, σημαίνει ότι εμφανίζονται τάσεις έμφραξης και άρα μειωμένη ικανότητα ροής.

Και αυτή η δοκιμή έχει κάποια μειονεκτήματα τα οποίο στηρίζονται κυρίως σε παράπλευρες επιδράσεις. Συγκεκριμένα, τα αποτελέσματα της δοκιμής μπορούν να επηρεασθούν και από ιδιότητες πέραν της ρευστότητας. Λόγω του σχήματος της χοάνης μπορούν να παρατηρηθούν εμφράξεις ανάλογα με το μέγεθος των χονδρόκοκκων αδρανών, ενώ η κλίση των τοιχωμάτων δεν έχει σαφώς ορισμένη επίδραση στα αποτελέσματα των δοκιμών.

#### *d. Δοκιμή με δοχείο σχήματος L*

Η δοκιμή αυτή πραγματοποιείται για την εκτίμηση της ικανότητας ροής του αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος και για το βαθμό που αυτό δημιουργεί εμφράξεις στον οπλισμό.

Η διάταξη περιλαμβάνει έναν αγωγό σε σχήμα L με ορθογωνική διατομή. Το οριζόντιο και το κατακόρυφο τμήμα του χωρίζονται από μια συστοιχία κατακόρυφα τοποθετημένων ράβδων οπλισμού. Τα διάκενα μεταξύ των ράβδων προτείνεται να είναι τρεις φορές όσο η μέγιστη διάμετρος αδρανούς στο μίγμα. Επίσης, παράλληλα με τον οπλισμό υπάρχει και μια θυρίδα η οποία ανοίγει και κλείνει συρταρωτά κατά την κατακόρυφη διεύθυνση.



*Εικόνα 13: Δοκιμή L-Box.*

Η διαδικασία ξεκινά με την πλήρωση του κατακόρυφου θαλάμου με το προς μέτρηση σκυρόδεμα. Ακολούθως ανασηκώνεται η θυρίδα, αφήνοντας το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα να εκρεύσει προς τον οριζόντιο θάλαμο περνώντας από τα διάκενα του οπλισμού. Όταν σταματήσει η ροή, λαμβάνονται μετρήσεις για το λόγο του ύψους στον κατακόρυφο θάλαμο προς το ύψος στον οριζόντιο θάλαμο ( $H_2/H_1$ ). Ο λόγος αυτός αποτελεί ένδειξη της διεισσιμότητας του αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος και ονομάζεται λόγος έμφραξης. Επίσης, μπορούν στον οριζόντιο θάλαμο να σημειωθούν οι

θέσεις των 20 και 40 cm από τη θυρίδα, και να μετρηθούν και οι χρόνοι που απαιτούνται ώστε να φτάσει σε αυτές τις θέσεις το σκυρόδεμα. Οι χρόνοι αυτοί συμβολίζονται  $T_{20}$  και  $T_{40}$  αντίστοιχα, και αποτελούν μέτρο της ικανότητας πλήρωσης.

Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων βασίζεται στη σύγκριση της μελετώμενης κατάστασης με την ιδανική, που θα ήταν αν το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα έρεε σα νερό, οπότε και η υψομετρική διαφορά θα ήταν μηδενική, και ο λόγος  $H_2/H_1$  ίσος με τη μονάδα. Συνεπώς, όσο πιο πολύ προσεγγίζει τη μονάδα αυτός ο λόγος, τόσο καλύτερη είναι η ικανότητα ροής του σκυροδέματος. Ανάλογες συσχετίσεις ισχύουν και για τους χρόνους  $T_{20}$  και  $T_{40}$ . Όσο μικρότεροι είναι αυτοί οι χρόνοι, τόσο πιο εύκολα ρέει το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα. Οι εμφράξεις στην περιοχή του οπλισμού μπορούν να παρατηρηθούν οπτικά.

#### ***e. Δοκιμή σταθερότητας με κοσκίνιση (GTM)***

Η αντίσταση στην απόμιξη, ή αλλιώς σταθερότητα του αυτοσυμπυκνούμενο σκυροδέματος, μετρείται με αυτή την μέθοδο, η οποία στηρίζεται στη χρήση κόσκινων κατάλληλου ανοίγματος 5mm και διαμέτρου 350mm.

Λαμβάνονται περίπου 10L σκυροδέματος και αφήνονται για 15min σε ηρεμία μέσα στο δοχείο δειγματοληψίας. Προς αποφυγήν της εξάτμισης, το δοχείο σκεπάζεται. Πρώτη ποιοτική εκτίμηση είναι να παρατηρηθεί η επιφάνεια του σκυροδέματος για τυχόν εξίδρωση. Έπειτα, 2L από την επιφάνειά του μεταφέρονται σε άλλο δοχείο και από εκεί αδειάζονται στο κόσκινο από ύψος 0,5m με ομαλή και συνεχή ροή. Υπολογίζεται η μάζα του σκυροδέματος που αδειάστηκε πάνω στο κόσκινο από τη διαφορά της μάζας του δοχείου όταν αυτό ήταν γεμάτο και άδειο. Από τη ζύγιση του δοχείου συλλογής μετά από 2min υπολογίζεται η μάζα του αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος που διήλθε μέσα από το κόσκινο, και κατόπιν υπολογίζεται το ποσοστό του διερχόμενου υλικού και ο λόγος απόμιξης.



Εικόνα 14: Δοκιμή σταθερότητας με κοσκίνιση.

Εμπειρικά δεδομένα προσδιορίζουν τον ικανοποιητικό λόγο απόμιξης για το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα μεταξύ 5% και 15%. Χαμηλότερες τιμές, προκαλούν προβλήματα εγκλεισμού φυσαλίδων αέρα, ενώ μεγαλύτερες τιμές οδηγούν σε σημαντική πιθανότητα απόμιξης κατά την κατασκευή.

### 1.2.13. Ιδιότητες Σκληρυμένης Φάσης

#### *Αντοχή σε θλίψη (compressive strength)*

Οι αντοχές σε θλίψη των ΑΣΣ είναι συγκρίσιμες με εκείνες των συμβατικών δονούμενων σκυροδεμάτων τα οποία παρασκευάζονται με παρόμοιες αναλογίες και λόγο νερού/τσιμέντο. Δεν υπάρχει ιδιαίτερη δυσκολία στο να παρασκευαστεί ΑΣΣ με αντοχή σε θλίψη μέχρι και 60MPa.

#### *Αντοχή σε κάμψη (tensile strength)*

Οι αντοχές αυτού του τύπου βασίζονται στην δοκιμή έμμεσης κατάτμησης σε κυλινδρικά δοκίμια. Για το ΑΣΣ οι καμπτικές αντοχές και ο λόγος της αντοχής σε κάμψη και σε θλίψη είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με το συμβατικό σκυρόδεμα.

### ***Αντοχές πρόσφυσης (adhesion strength)***

Προκειμένου να προσδιοριστεί η ισχύς της σύνδεσης του σκυροδέματος με τον οπλισμό, πραγματοποιούνται δοκιμές αποκόλλησης με έλξη. Οι τιμές για το ΑΣΣ είναι αρκετά υψηλότερες από εκείνες του συμβατικού σκυροδέματος.

### ***Μέτρο ελαστικότητας (modulus of elasticity)***

Το ΑΣΣ και το συμβατικό σκυρόδεμα εμφανίζουν παρόμοια σχέση μεταξύ του μέτρου ελαστικότητας και της αντοχής σε θλίψη που εκφράζεται από τη σχέση  $E/f_c = 0,5$  όπου  $E$  είναι το μέτρο ελαστικότητας,  $f_c$  η αντοχή σε θλίψη. Οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας για το ΑΣΣ είναι στα επίπεδα που συστήνονται από το ACI για το συμβατικό σκυρόδεμα.

## **1.2.14. Παρατηρήσεις που προκύπτουν από εφαρμογές<sup>1</sup>**

### **I. Παρασκευή ΑΣΣ**

- *Η παραγωγή του ΑΣΣ απαιτεί περισσότερη εμπειρία και φροντίδα από ότι το συμβατικό δονούμενο σκυρόδεμα. Το προσωπικό της εγκατάστασης απαιτείται να είναι εκπαιδευμένο κατάλληλα ώστε να παράγει και να διαχειρίζεται ικανοποιητικά το ΑΣΣ. Φυσικά, στην αρχή, ίσως χρειάζονται περισσότερες δοκιμές από το συνηθισμένο, ώστε να αποκτηθεί η απαραίτητη εμπειρία.*
- *Προτού παρασκευαστεί οποιαδήποτε ποσότητα ΑΣΣ στις εγκαταστάσεις και να χρησιμοποιηθεί στην κατασκευή, το μίγμα πρέπει να σχεδιάζεται*

---

<sup>1</sup> Σύμφωνα με την επιστημονική εργασία “Applications of SCC in Japan, Europe and the U.S.” των Ouchi, Nakamura et al.

κατάλληλα και να δοκιμάζεται ώστε να καλύπτει τις προδιαγραφές του έργου. Τα συστατικά και ο εξοπλισμός που χρησιμοποιούνται για το δοκιμαστικό μίγμα πρέπει να είναι τα ίδια με αυτά που θα χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή της απαιτούμενης ποσότητας για το έργο.

- Οι περισσότεροι κοινοί αναμικτήρες σκυροδέματος (*concrete mixers*) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ΑΣΣ. Όμως, ο χρόνος παραγωγής μπορεί να είναι μεγαλύτερος από εκείνον του συμβατικού. Το ΑΣΣ είναι περισσότερο ευαίσθητο στη συνολική ποσότητα νερού που περιέχει το μίγμα. Είναι αναγκαίο να λαμβάνεται υπόψη και το περιεχόμενο νερό ή η υγρασία που περιέχεται στα αδρανή και τα πρόσμικτα πριν προστεθεί το υπόλοιπο νερό. Ο αναμικτήρας πρέπει να είναι καθαρός και υγρός, όχι όμως να περιέχει ελεύθερο νερό.
- Τα πρόσθετα για το ΑΣΣ μπορούν να προστεθούν είτε στο εργοστάσιο είτε επί τόπου στο έργο. Εμφανίζεται οικονομικό όφελος με την επί τόπου προσθήκη.

## **II. Μεταφορά**

- Οι οδηγοί των οχημάτων πρέπει να λαμβάνουν γραπτές και προφορικές οδηγίες αναφορικά με το χειρισμό του ΑΣΣ. Πρέπει να ελέγχουν το δοχείο (βαρέλα) για ακαθαρσίες και νερό πριν την εισαγωγή του ΑΣΣ. Μεγάλη προσοχή πρέπει να δίνεται όταν η μεταφορά περιλαμβάνει μεγάλο δρομολόγιο. Το δελτίο αποστολής πρέπει να αναγράφει και τις ακόλουθες πληροφορίες:

Τιμή εξάπλωσης (τιμή στόχος και όρια ανοχής)

Χρόνος παραγωγής

Οδηγίες για την προσθήκη των χημικών προσθέτων επί τόπου, αν αυτό επιτρέπεται

- Πρέπει να απαγορεύεται στους οδηγούς να προσθέτουν νερό ή χημικά κατά τη διάρκεια της διακομιδής.

### **III. Σύστημα τύπων (καλούπια)**

- Όλα τα υλικά που χρησιμοποιούνται ευρέως για το συμβατικό σκυρόδεμα, είναι κατάλληλα και για το ΑΣΣ. Για καλύτερη ποιότητα επιφανειών του ΑΣΣ, το ξύλο είναι καλύτερο από το πεπιεσμένο ξύλο, το οποίο με τη σειρά του είναι καλύτερο του χάλυβα. Όταν η επιφάνεια που έρχεται σε επαφή με το ΑΣΣ είναι πιο ψυχρή από αυτό, εμφανίζονται περισσότεροι πόροι στην επιφάνεια. Αν η σκυροδέτηση γίνεται υπό χαμηλές θερμοκρασίες, ίσως κριθεί αναγκαίο να μονωθούν τα καλούπια. Το ΑΣΣ είναι πιο ευαίσθητο στην επικρατούσα θερμοκρασία κατά τη σκλήρυνση από ότι το συμβατικό.
- Εξαιτίας της υψηλής συνεκτικότητας του ΑΣΣ, δε χρειάζεται πιο σφιχτό δέσιμο των τύπων από ότι στο συμβατικό.
- Δεν παρατηρήθηκαν πιέσεις μεγαλύτερες των συνηθισμένων, ακόμα και σε υψηλούς ρυθμούς σκυροδέτησης. Όμως προτείνεται να σχεδιάζονται οι τύποι έτσι ώστε να αντέχουν στην υδροστατική πίεση, εκτός και οι δοκιμές δείξουν άλλη κατεύθυνση.

### **IV. Επί τόπου διάστρωση (casting)**

- Μια συνάντηση όλων των συμμετεχόντων, εργαζομένων και μηχανικών πριν το έργο, είναι απαραίτητη ώστε να αποδοθούν οι ακριβείς αρμοδιότητες.
- Επιπρόσθετα στους συμβατικούς ελέγχους, πρέπει να γίνονται οι δοκιμές της εξάπλωσης, του  $T_{50}$  και του L-Box.
- Το ΑΣΣ μπορεί να ρεύσει οριζόντια για μια απόσταση 15 με 20m χωρίς να υποστεί διαχωρισμό. Ένα καλοσχεδιασμένο μίγμα ΑΣΣ μπορεί να

εκτελέσει ελεύθερη πτώση 8m χωρίς διαχωρισμό. Όμως προτείνεται για λόγους ασφαλείας, οι οριζόντιες αποστάσεις να περιορίζονται στα 10m και οι κάθετες στα 5m.

- Αν η σκυροδέτηση του ΑΣΣ διακοπεί για κάποιο λόγο, μπορεί να συνεχιστεί αφού πρώτα γίνει ανατάραξη του ήδη τοποθετημένου όγκου σκυροδέματος.
- Το ΑΣΣ χρειάζεται κάποιον χρόνο μέχρι να αρχίσει τη διεργασία της σκλήρυνσης, ιδιαίτερα κάτω από συνθήκες χαμηλής θερμοκρασίας. Όταν όμως ξεκινήσει η διεργασία, εξελίσσεται αρκετά γρήγορα, γεγονός που μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στην επιπέδωση μεγάλων επιφανειών.

## **V. Συμπύκνωση και Συντήρηση**

- Οι δύο αυτές ενέργειες για το ΑΣΣ μπορούν να ακολουθήσουν τις γενικές οδηγίες που ισχύουν για τα σκυροδέματα υψηλής επιτελεστικότητας. Οι επιφάνειες του ΑΣΣ μπορούν να επιπεδωθούν στις καθορισμένες διαστάσεις, ενώ το τελείωμα της επιφάνειας γίνεται πριν τη σκλήρυνσή του.
- Το ΑΣΣ τείνει να στεγνώνει ταχύτερα από το συμβατικό σκυρόδεμα, επειδή υπάρχει ελάχιστη έως καθόλου εξίδρωση (bleeding water) στην επιφάνεια. Το ΑΣΣ πρέπει να συντηρείται το συντομότερο δυνατό, όσο είναι αυτό εφικτό, για να αποφευχθούν οι ρωγμές στις επιφάνειες λόγω συρρίκνωσης.

## **VI. Ψυχρή σύνδεση (cold joint)**

- Όταν ένα νέο στρώμα ΑΣΣ τοποθετείται πάνω από ένα παλαιό, η σύνδεση των δύο στρωμάτων είναι ισοδύναμη ή και καλύτερη από την αντίστοιχη του συμβατικού σκυροδέματος. Κανονικά επίπεδα δόνησης δε θα καταστρέψουν το σκυρόδεμα, όπως στην περίπτωση της τοποθέτησης συμβατικού σκυροδέματος πάνω σε ΑΣΣ. Αυτή η πρακτική ενδέχεται να



*είναι αναγκαία, όταν η κλίση της επιφάνειας είναι αποτρεπτική για τη χρήση ΑΣΣ.*

### **1.2.15. Τοποθέτηση Προβλήματος**

Στην πορεία μελέτης του αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος, των ιδιοτήτων του, του τρόπου παραγωγής και του σχεδιασμού μιγμάτων, παρατηρείται ότι σημαντικό ρόλο διαδραματίζει η νωπή του φάση και ιδιαίτερα η ρεολογική του συμπεριφορά.

Συνεπώς, ένας τομέας έρευνας και μελέτης αποτελείται από όλα τα πειράματα που μπορούν να προσδιορίσουν παράγοντες της ρεολογικής συμπεριφοράς. Μια πρώτη προσέγγιση μπορεί να γίνει με την μελέτη της ρεολογίας της τσιμεντόπαστας, η οποία είναι και η ρευστή φάση στο πολυφασικό μίγμα του σκυροδέματος.

Η μελέτη που διεξάγεται στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας, στρέφεται στον πειραματικό προσδιορισμό των ρεολογικών παραμέτρων της τσιμεντόπαστας, καθώς και στον καθορισμό της σχέσης της ρεολογίας με τα διάφορα λεπτόκοκκα υλικά που προστίθενται στην κονία κατά περίπτωση.

Ουσιαστικά πρόκειται για προσπάθεια μέτρησης της εργασιμότητας μέσω μέτρησης θεμελιωδών μεγεθών (ιξώδες, διατμητική τάση κατωφλίου).

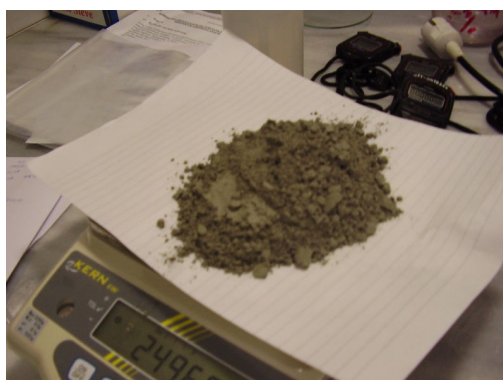
## 2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

### 2.1. ΣΚΟΠΟΣ

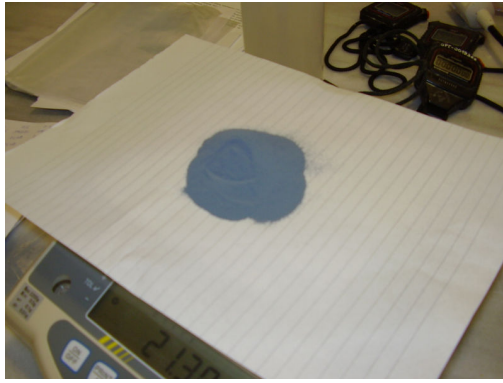
Σκοπός των πειραμάτων που διεξήχθησαν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, ήταν να προσδιοριστεί η επίδραση κάποιων εξαιρετικά λεπτόκοκκων υλικών στη ρεολογική συμπεριφορά της τσιμεντόπαστας. Επίσης, επιχειρείται μια παρατήρηση των σκληρυμένων δειγμάτων με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης.

### 2.2. ΥΛΙΚΑ

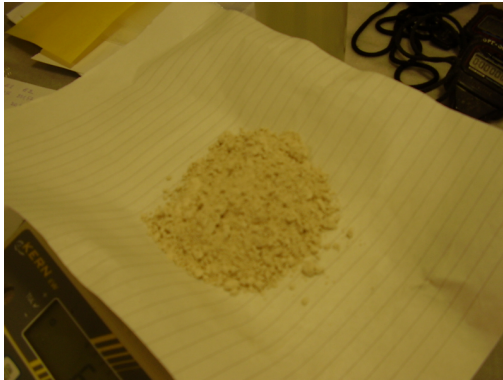
Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για τις δοκιμές προσφέρθηκαν από την ΑΓΕΤ Ηρακλής και οι αναλύσεις τους έγιναν στο ΕΚΕΤ. Συγκεκριμένα, τα υλικά είναι: τσιμέντο τύπου CEM I 42,5 , πυριτική παιπάλη, ασβεστόλιθος, ποζολάνη, ιπτάμενη τέφρα. Φωτογραφίες των υλικών φαίνονται παρακάτω.



*Φωτογραφία 1: Τσιμέντο*



*Φωτογραφία 2: Πυριτική παιπάλη*



*Φωτογραφία 3: Ασβεστόλιθος*



*Φωτογραφία 4: Ποζολάνη Μήλου*



Φωτογραφία 5: Ιπτάμενη τέφρα Μεγαλόπολης

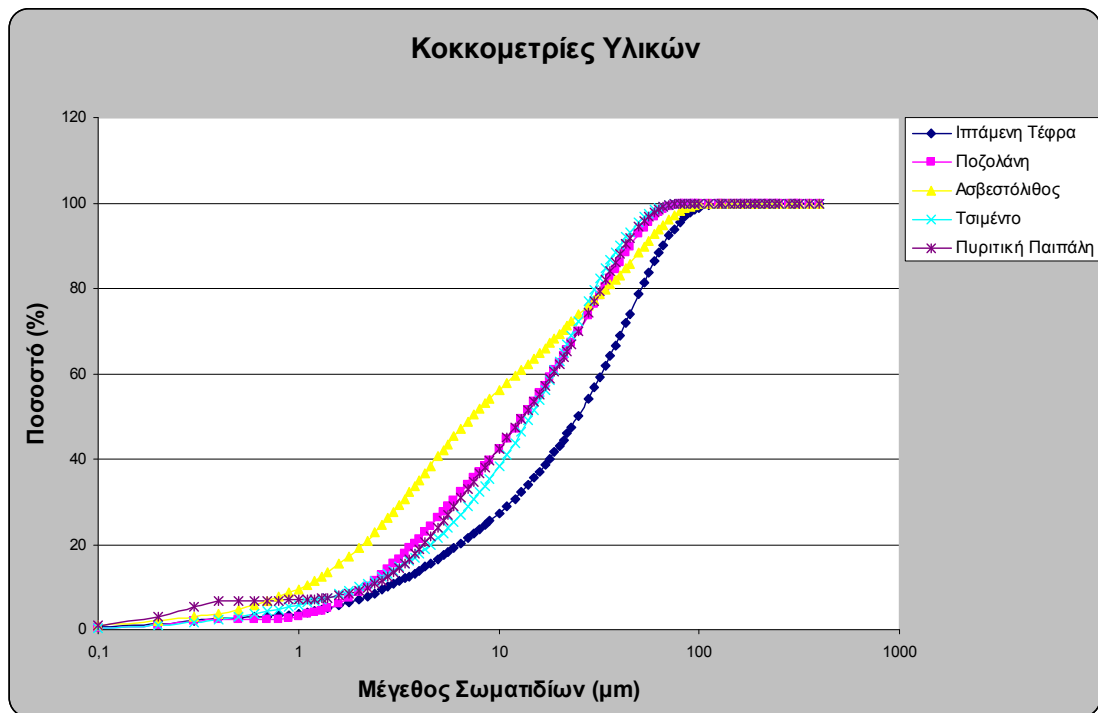
Η λεπτότητα των υλικών ρυθμίστηκε σε πολύ χαμηλά επίπεδα, μέσω άλεσης σε σφαιρόμυλο, στα εργαστήρια του ΕΚΕΤ. Για τον προσδιορισμό της ειδικής επιφάνειας και της κοκκομετρίας των υλικών διεξήχθησαν δοκιμές Blaine και CILAS αντίστοιχα.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών Blaine για την ειδική επιφάνεια φαίνονται στον επόμενο Πίνακα:

Πίνακας 12: Ειδικές επιφάνειες υλικών κατά Blaine.

Υλικό	Ειδική επιφάνεια (cm <sup>2</sup> /g)
Τσιμέντο	3828
Πυριτική παιπάλη	8030
Ασβεστόλιθος	6009
Ποζολάνη	6050
Ιπτάμενη Τέφρα	6088

Οι μετρήσεις με την μέθοδο της κοκκομετρίας με περίθλαση laser (laser granulometry) CILAS έδωσαν τα επόμενα αποτελέσματα, τα οποία παρουσιάζονται στο επόμενο διάγραμμα, σε μορφή αθροιστικών κατανομών:



Διάγραμμα 8: Κοκκομετρίες υλικών.

Χρήσιμα πρώτα συμπεράσματα που προκύπτουν από τα προηγούμενα και θα χρειαστούν στην ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων είναι τα εξής:

Ο ασβεστόλιθος αποδεικνύεται ως το πιο λεπτόκοκκο υλικό, μιας και το 50% των σωματιδίων του έχουν μέγεθος μικρότερο των 7,5 μm.

Αντίθετα, η ιπτάμενη τέφρα με αντίστοιχο μέγεθος κόκκου στα 25 μm, είναι το πιο χονδρόκοκκο από τα υλικά.

Σε όρους ειδικής επιφάνειας η πυριτική παιπάλη εμφανίζει την μεγαλύτερη τιμή, 8030 cm<sup>2</sup>/g, ενώ το τσιμέντο την μικρότερη 3828 cm<sup>2</sup>/g.

### 2.3. ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟ ΣΑΡΩΣΗΣ (SEM)

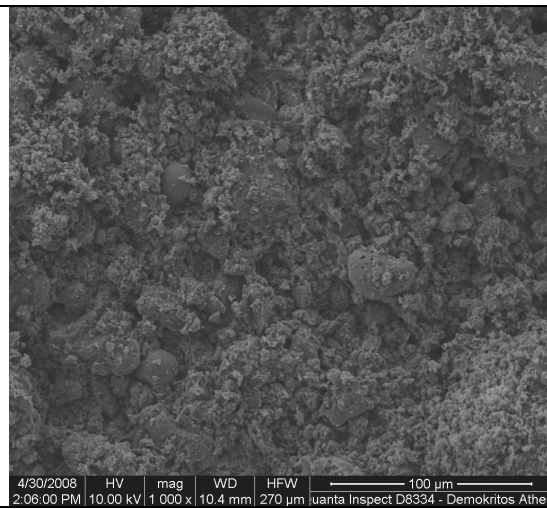
Η ανάλυση με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης στηρίζεται στην αρχή της σκέδασης μιας προσπίπτουσας δέσμης ηλεκτρονίων πάνω στην

επιφάνεια του δείγματος. Η λειτουργία του οργάνου δίνει μια τρισδιάστατη εικόνα από την επιφάνεια του δείγματος που εισάγεται για ανάλυση. Από την ανάλυση με SEM λαμβάνονται πολύ σημαντικά συμπεράσματα για τη μορφολογία της επιφάνειας, την πορεία των χημικών δράσεων που συμβαίνουν στο δείγμα. Επίσης, μπορεί να γίνει και ταυτοποίηση των ενώσεων που συγκροτούν το δείγμα.

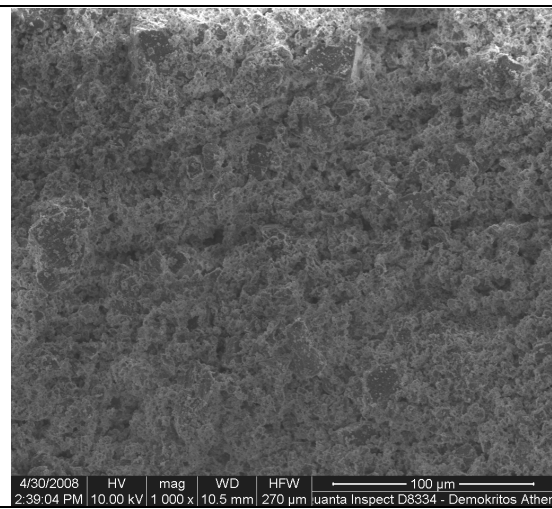
Τα δείγματα που επεξεργάστηκαν και αναλύθηκαν με την τεχνική SEM αποτελούν τμήματα των πρωτογενών υλικών, που χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή των μιγμάτων τσιμεντόπαστας.

Στον επόμενο πίνακα φαίνονται συνολικά και σε αντιπαραβολή, οι εικόνες από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης, που ελήφθησαν από την επιφάνεια ενός δείγματος από κάθε υλικό. Παρουσιάζονται στη μεγέθυνση x1000, όπου μπορούν να διακριθούν οι κόκκοι του κάθε υλικού, χωρίς να χάνεται η αίσθηση της επιφάνειας.

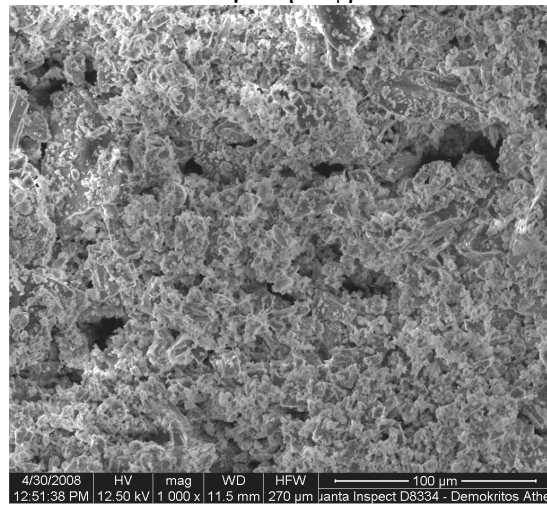
Πίνακας 13: Εικόνες των υλικών από SEM, σε μεγέθυνση x1000.



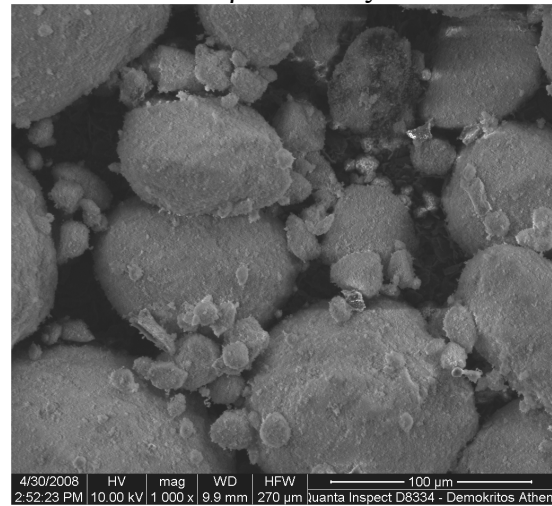
Ιπτάμενη τέφρα



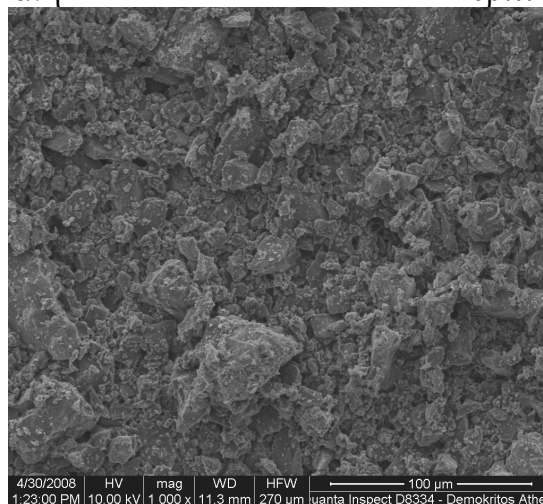
Ασβεστόλιθος



Ποζολάνη



Πυριτική παιπάλη



Τσιμέντο

Από τις εικόνες αυτές, με προσεκτική παρατήρηση, μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα για το σχήμα και το μέγεθος των σωματιδίων του κάθε υλικού.

Έτσι, σαν πρώτο αποτέλεσμα μπορεί να λεχθεί ότι το πιο χονδρόκοκκο υλικό είναι η πυριτική παιπάλη, η οποία ναι μεν έχει κόκκους με πολύ ομαλό σχήμα που προσεγγίζουν τη σφαίρα, όμως το μέγεθός τους είναι εξαιρετικά μεγάλο. Από την άλλη, ο ασβεστόλιθος δίνει την εικόνα μιας πολύ ομοιογενούς επιφάνειας, όπου τα σωματίδια είναι μικρού μεγέθους και όχι τόσο γωνιώδους σχήματος.

Η ιπτάμενη τέφρα αποτελείται από μικρά σωματίδια σφαιρικού μεγέθους και άλλα μεγαλύτερα, των οποίων την επιφάνεια είναι προσκολλημένα μικρότερα σωματίδια. Κάτι τέτοιο είναι αναμενόμενο και από τα θεωρητικά δεδομένα (κενόσφαιρες και πλευρόσφαιρες).

Το τσιμέντο αποτελείται από γωνιώδη σωματίδια διαφόρων μεγεθών, ενώ η ποζολάνη αποτελείται από γωνιώδη σωματίδια μικρότερης διασποράς όσον αφορά το μέγεθος. Παρόλα αυτά η επιφάνειά της δεν έχει αρκετή ομοιογένεια.

## **2.4. ΜΕΛΕΤΗ ΡΕΟΛΟΓΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ**

### **2.4.1. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΙΓΜΑΤΩΝ (mix design)**

Ο σχεδιασμός των μιγμάτων έγινε με τέτοιον τρόπο ώστε να εντοπιστεί η όποια επίδραση του κάθε υλικού στη ρεολογία της πάστας. Η λογική του σχεδιασμού, στηρίχθηκε στη δημιουργία δύο μιγμάτων τσιμέντου με κάθε λεπτόκοκκο υλικό, ένα μίγμα χαμηλής περιεκτικότητας στο λεπτόκοκκο πρόσμικτο υλικό και ένα υψηλής. Αρχικά, σχεδιάστηκαν διμερή μίγματα, τα οποία περιείχαν τσιμέντο και ποσοστό ενός από τα λεπτόκοκκα υλικά. Ακολούθως, ένα 5% του λεπτόκοκκου υλικού στο κάθε μίγμα αντικαταστάθηκε με πυριτική παιπάλη, σχηματίζοντας τη δεύτερη σειρά μιγμάτων. Τελικά,



σχηματίστηκαν τριμερή μίγματα που περιείχαν τσιμέντο και δύο από τα λεπτόκοκκα υλικά, εκτός της πυριτικής παιπάλης.

Συνεπώς, τα μίγματα ανήκουν στην κατηγορία Συνδυασμένου Τύπου (combined type), ακολουθώντας την ορολογία των Domone και Ouchi.

Ο αναλυτικός πίνακας με τα μίγματα δίνεται παρακάτω.

*Πίνακας 14: Σχεδιασμός μιγμάτων – Αναλογίες υλικών στα μίγματα.*

Μίγμα	Τσιμέντο	Πυριτική Παιπάλη	Ασβεστόλιθος	Ποζολάνη	Ιπτάμενη Τέφρα
A1	80			20	
A2	60			40	
B1	80				20
B2	60				40
Γ1	80		20		
Γ2	60		40		
Δ1	80	5		15	
Δ2	60	5		35	
E1	80	5			15
E2	60	5			35
Z1	80	5	15		
Z2	60	5	35		
H	60		20	20	
Θ	60			20	20
I	60		20		20

Τα ποσοστά των υλικών αναφέρονται σε ποσοστά επί του συνόλου της κονιάς στο μίγμα (σύνολο στερεών υλικών).

Άλλος ένας σημαντικός παράγοντας για τα πειράματα είναι η σχέση των ποσοτήτων του νερού και των στερεών υλικών στο κάθε μίγμα. Αυτή η σχέση ποσοτικοποιείται μέσω του λόγου νερού/κονία. Ο λόγος νερού/κονία αποτελεί μια πολύ σημαντική μεταβλητή σχεδιασμού, μιας και επηρεάζεται αλλά και ασκεί επιρροή σε ένα πλήθος άλλων παραμέτρων.

Η λογική με την οποία εκλέχθηκε η τιμή 0,6 για το λόγο νερού/κονία, στηρίχθηκε στις προσπάθειες συγκερασμού των τιμών που ισχύουν σε μια κατασκευή από σκυρόδεμα και των περιορισμών που έθετε ο εξοπλισμός μέτρησης. Πιο συγκεκριμένα, η αρχική τιμή ήταν 0,4 , τιμή που είναι

εφαρμόσιμη στις κατασκευές. Όμως τα παρασκευαζόμενα μίγματα ήταν πολύ πυκνά για να μετρηθούν από το συγκεκριμένο όργανο. Έτσι, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές με διαδοχικές αραιώσεις μέχρι που βρέθηκε ο λόγος νερού/κονία που ήταν ο μικρότερος δυνατός και παράλληλα εφικτός προς μέτρηση στο όργανο.

Για τις δοκιμές αυτές, χρησιμοποιήθηκε το μίγμα Γ1, το οποίο περιέχει 20% ασβεστόλιθο. Η συγκεκριμένη επιλογή έγινε, γιατί ο ασβεστόλιθος δεν προωθεί έντονα την αντίδραση της ενυδάτωσης κι έτσι θα αποφεύγονταν φαινόμενα πρόωρης απώλειας των υψηλών ρεολογικών ιδιοτήτων του.

#### **2.4.2. ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ**

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε προκειμένου να διεξαχθούν τα πειράματα ανήκει στην κατηγορία των ιξωδόμετρων ομοαξονικών κυλίνδρων. Ο κατασκευαστής του οργάνου είναι ο οίκος Fann και το μοντέλο της συσκευής είναι FANN Model 35 S/A Viscometer.



*Εικόνα 15: Χρησιμοποιηθέν ιξωδόμετρο του οίκου fann.*

Ο εξωτερικός κύλινδρος παραμένει ακίνητος, ενώ ο εσωτερικός περιστρέφεται με ταχύτητα ρυθμιζόμενη από τον πειραματιστή. Το ρευστό, τοποθετείται σε ένα κυλινδρικό δοχείο καθορισμένου όγκου όπου μέσα σε αυτό εμβαπτίζεται το σύστημα των κυλίνδρων. Η περιστροφή του εσωτερικού κυλίνδρου προκαλεί διάτμηση στο ρευστό. Η αντίσταση που το ρευστό προβάλλει μεταφέρεται μέσω ενός συστήματος δίσκου – ελατηρίου, στο δίσκο ανάγνωσης της μέτρησης.

Οι μετρήσεις έγιναν στο Εργαστήριο Σκυροδέματος στο Κέντρο Ερευνών Δοκιμών και Προτύπων της ΔΕΗ.

### 2.4.3. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Οι ταχύτητες στις οποίες λειτουργεί το ιξωδομέτρο και δίνει μετρήσεις, είναι εκείνες που φαίνονται στον επόμενο πίνακα.

*Πίνακας 15: Ταχύτητες περιστροφής ιξωδομέτρου.*

Ταχύτητα Περιστροφής (rpm)
600
300
200
100
6
3

Για τον προσδιορισμό όμως του φαινομένου ιξώδους και της τιμής κατωφλίου για τη διατμητική τάση, είναι απαραίτητες οι μετρήσεις στις 600 και 300 rpm.

Ο επόμενος πίνακας, δείχνει τις πειραματικές μετρήσεις για όλα τα μίγματα. Οι τιμές αποτελούν τις ενδείξεις του οργάνου.

*Πίνακας 16: Ενδείξεις ιξωδομέτρου για τις 600 και 300 rpm.*

Μίγμα	600 rpm	300 rpm
A1	127	80
A2	173	122
B1	145	88
B2	258	160
Γ1	90	56
Γ2	70	46
Δ1	92	57
Δ2	183	129
E1	143	90
E2	256	166
Z1	86	54
Z2	77,5	50,5
H	112,5	76,5
Θ	197	132
I	123	81

#### 2.4.4. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Με μια απλή μαθηματική επεξεργασία<sup>1</sup> αυτών των αναγνώσεων, απορρέουν τα αξιοποιήσιμα αποτελέσματα του πλαστικού ιξώδους και του κατωφλίου διάτμησης.

##### *Πλαστικό Ιξώδες*

Η τιμή του πλαστικού ιξώδους (plastic viscosity) για το ρευστό, δίνεται από τον επόμενο τύπο:

$$PV = \theta_{600} - \theta_{300}$$

όπου  $\theta_{600}$  είναι η ένδειξη του οργάνου στις 600 στροφές και  $\theta_{300}$  η ένδειξη στις 300 στροφές.

Στον επόμενο πίνακα φαίνονται οι υπολογισμένες τιμές του πλαστικού ιξώδους.

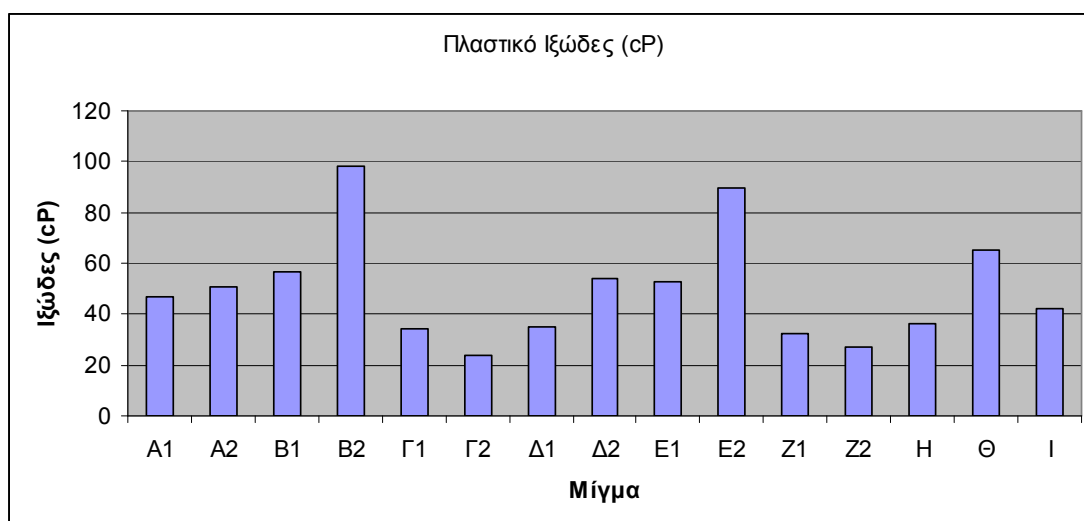
---

<sup>1</sup> Οι απαιτούμενοι τύποι για την μαθηματική επεξεργασία λαμβάνονται από το εγχειρίδιο χρήσης του οργάνου (σελ. 14).

Πίνακας 17: Πλαστικό ιξώδες (σε cP) μιγμάτων όπως προκύπτει από τους υπολογισμούς.

Μίγμα	$\eta$ (πλαστικό ιξώδες)
A1	47
A2	51
B1	57
B2	98
Γ1	34
Γ2	24
Δ1	35
Δ2	54
E1	53
E2	90
Z1	32
Z2	27
H	36
Θ	65
I	42

Για καλύτερη εποπτεία των σχέσεων μεταξύ του ιξώδους στα διάφορα μίγματα, κατασκευάζεται το επόμενο διάγραμμα ράβδων:



Διάγραμμα 9: Τιμή πλαστικού ιξώδους για κάθε μίγμα.

Εδώ φαίνεται καλύτερα, ότι τα μίγματα με το χαμηλότερο πλαστικό ιξώδες και άρα την υψηλότερη ικανότητα ροής, είναι τα μίγματα Γ1, Γ2, Z1, Z2, τα οποία περιέχουν ασβεστόλιθο. Η πρόταση αυτή ενισχύεται και από την παρατήρηση των τριών τριαδικών μιγμάτων (H, Θ, I), στα οποία οι

χαμηλότερες τιμές ιξώδους εμφανίζονται στα Η και Ι, τα οποία αποτελούνται κατά 20% από ασβεστόλιθο.

### **Τιμή Κατωφλίου Διάτμησης**

Για τον υπολογισμό της τιμής κατωφλίου διάτμησης (yield point), απαιτούνται η ένδειξη του οργάνου στις 300 στροφές,  $\theta_{300}$ , και το υπολογισμένο πλαστικό ιξώδες,  $PV$ .

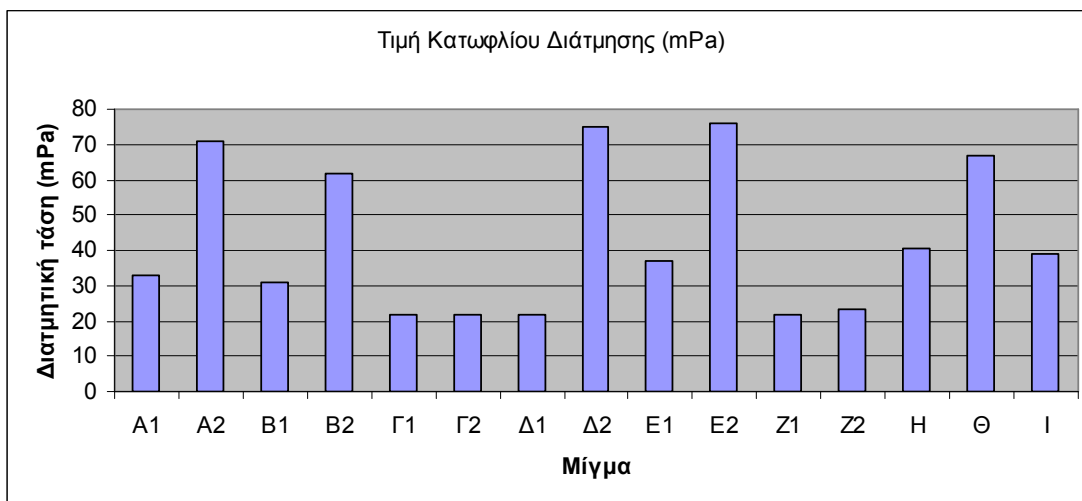
$$YP = \theta_{300} - PV$$

Οι τιμές που προκύπτουν μετά από την εφαρμογή του τύπου, παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα:

*Πίνακας 18: Τιμή κατωφλίου (σε mPa) διάτμησης σύμφωνα με τους υπολογισμούς.*

Μίγμα	$\tau_0$ (κατώφλι διάτμησης)
A1	33
A2	71
B1	31
B2	62
Γ1	22
Γ2	22
Δ1	22
Δ2	75
E1	37
E2	76
Z1	22
Z2	23,5
H	40,5
Θ	67
I	39

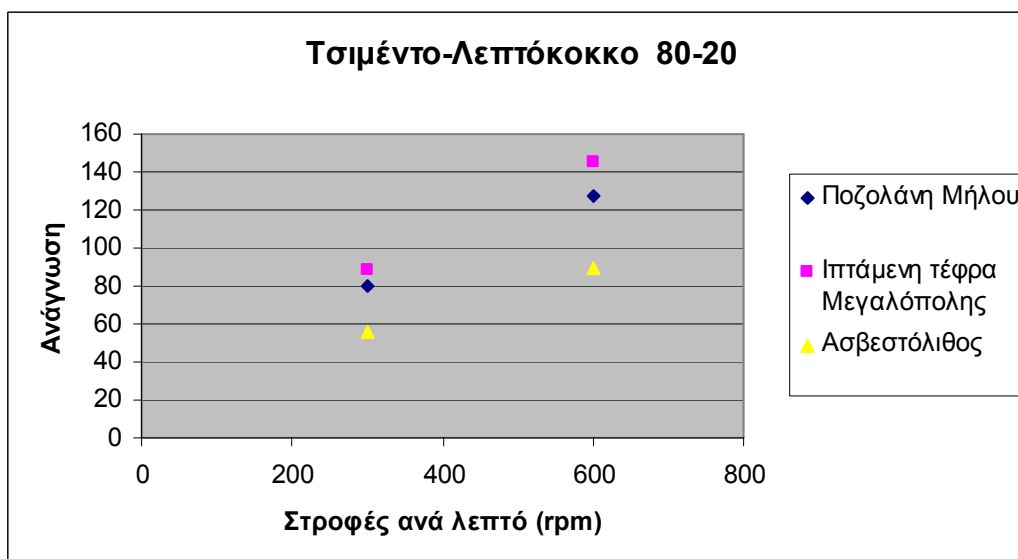
Το παρακάτω διάγραμμα, παρουσιάζει καλύτερα τις σχέσεις μεταξύ των μιγμάτων όσον αφορά την τιμή κατωφλίου διάτμησης.



Διάγραμμα 10: Τιμή κατωφλίου διάτμησης για κάθε μίγμα.

Εύκολα συμπεραίνεται ότι και πάλι ο ασβεστόλιθος βοηθά στη ρεολογική συμπεριφορά της ρευστής τσιμεντόπαστας, μιας και τα μίγματα που περιέχουν ασβεστόλιθο (Γ1, Γ2, Z1, Z2) παρουσιάζουν τις χαμηλότερες τιμές κατωφλίου, έναντι των άλλων μιγμάτων.

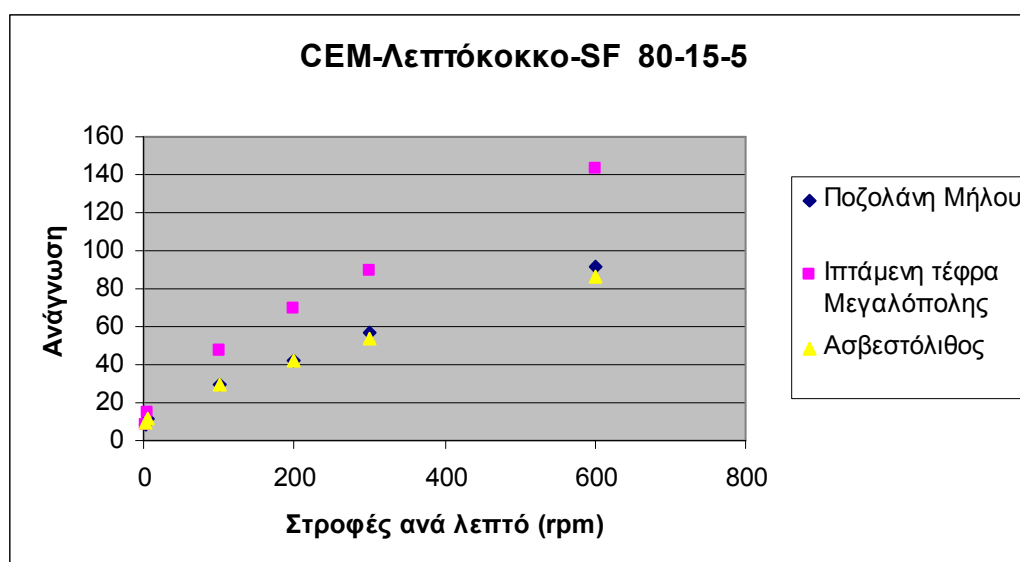
Από την επεξεργασία των μετρήσεων, παρατίθενται τα επόμενα διαγράμματα:



Διάγραμμα 11: Πειραματικά σημεία για τα μίγματα με τσιμέντο και ένα λεπτόκοκκο σε χαμηλή αναλογία (20%).

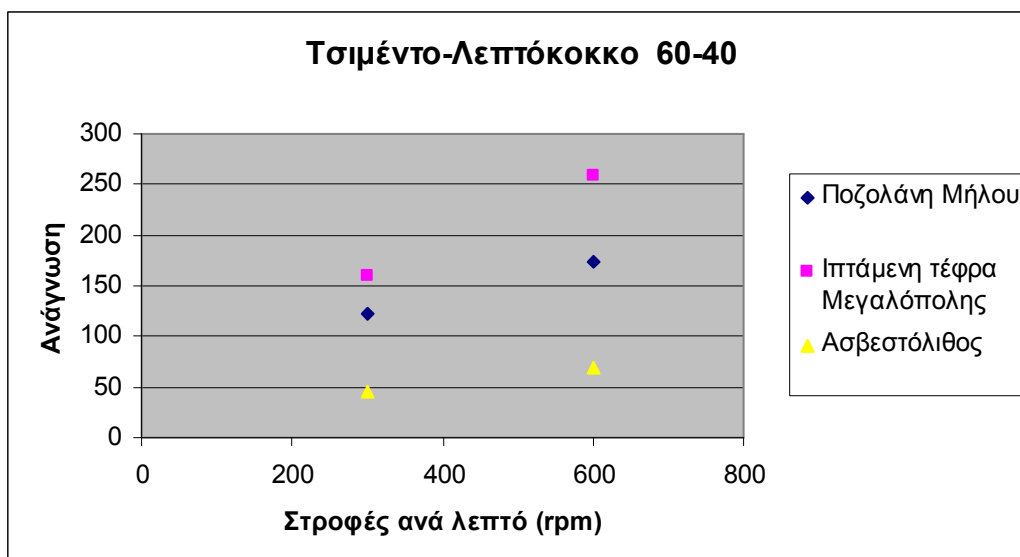


Με την ύπαρξη ενός ποσοστού 20% λεπτόκοκκου υλικού στο μίγμα, φαίνεται η τάση τους όσον αφορά την επίδρασή τους στα ρεολογικά χαρακτηριστικά. Ο ασβεστόλιθος κινείται σε τιμές πολύ χαμηλότερες των άλλων δύο υλικών, ενώ η ποζολάνη και η τέφρα εμφανίζουν μικρή διαφορά στους μεγάλους ρυθμούς διάτμησης.



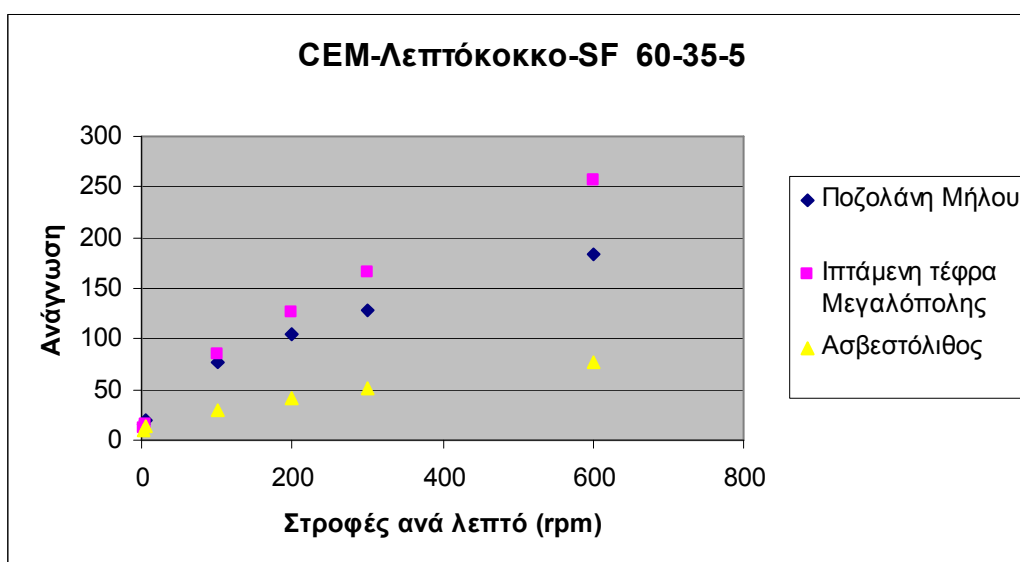
Διάγραμμα 12: Πειραματικά σημεία για τα μίγματα με τσιμέντο, ένα λεπτόκοκκο σε χαμηλή αναλογία (15%), και 5% πυριτική παιπάλη.

Η αντικατάσταση ενός 5% του λεπτόκοκκου υλικού με πυριτική παιπάλη ανατρέπει τα δεδομένα όσον αφορά την ποζολάνη. Οι τιμές της προσεγγίζουν με αμελητέες διαφορές εκείνες του ασβεστόλιθου. Ο ασβεστόλιθος και η τέφρα μένουν ανεπηρέαστα από την προσθήκη της πυριτικής παιπάλης. Αξίζει λοιπόν να σημειωθεί ότι η αντικατάσταση του 5% της ποζολάνης από πυριτική παιπάλη, σε μίγματα υψηλής περιεκτικότητας σε τσιμέντο, προκαλεί βελτίωση των ιδιοτήτων του μίγματος.



Διάγραμμα 13: Πειραματικά σημεία για τα μίγματα με τσιμέντο και ένα λεπτόκοκκο σε υψηλή αναλογία (40%).

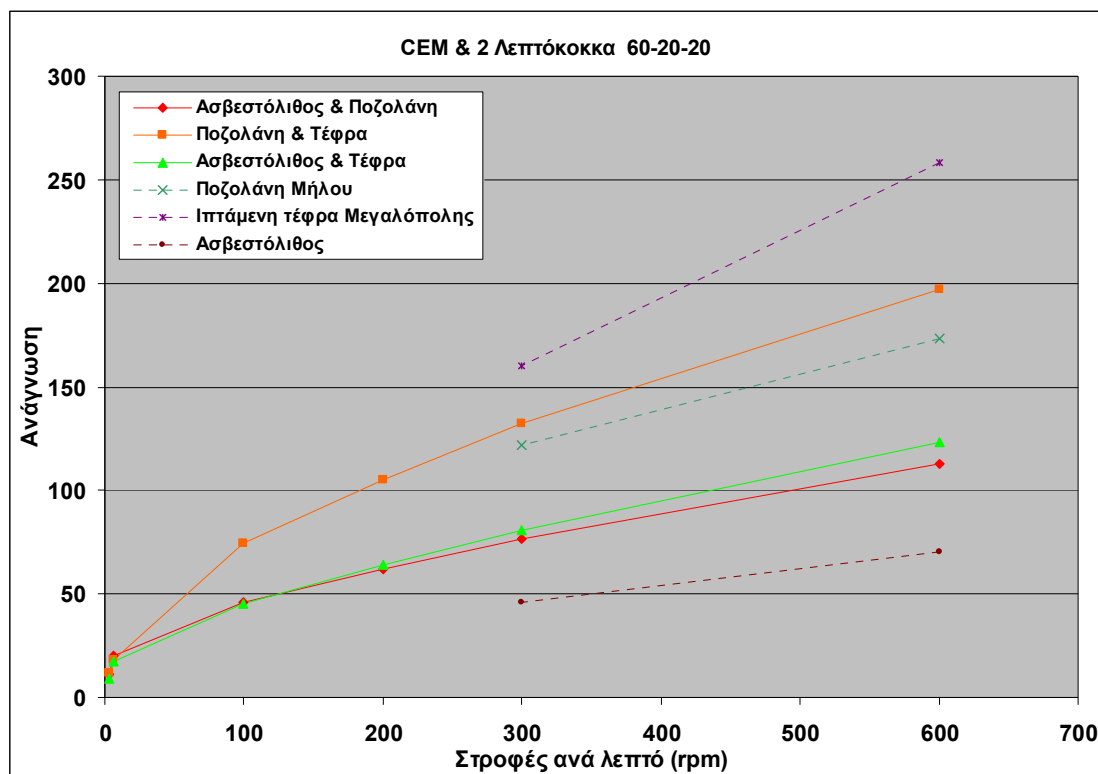
Και στην περίπτωση υψηλότερης περιεκτικότητας σε λεπτόκοκκο υλικό (40%), ισχύει η παρατηρούμενη κατάσταση. Δηλαδή, την καλύτερη συμπεριφορά παρουσιάζει ο ασβεστόλιθος, τη χειρότερη η τέφρα, με την ποζολάνη να κινείται σε ενδιάμεσες τιμές.



Διάγραμμα 14: Πειραματικά σημεία για τα μίγματα με τσιμέντο, ένα λεπτόκοκκο σε υψηλή αναλογία (35%), και 5% πυριτική παιπάλη.

Παρατηρείται ότι οι μετρήσεις για τα τρία υλικά, ξεκινούν από το ίδιο σημείο και όσο αυξάνει ο αριθμός των στροφών, οι μετρήσεις

απομακρύνονται μεταξύ τους, με τον ασβεστόλιθο να κυμαίνεται στα χαμηλότερα επίπεδα. Η ιπτάμενη τέφρα παρουσιάζει και πάλι μια σημαντικά χειρότερη απόδοση από την ποζολάνη.



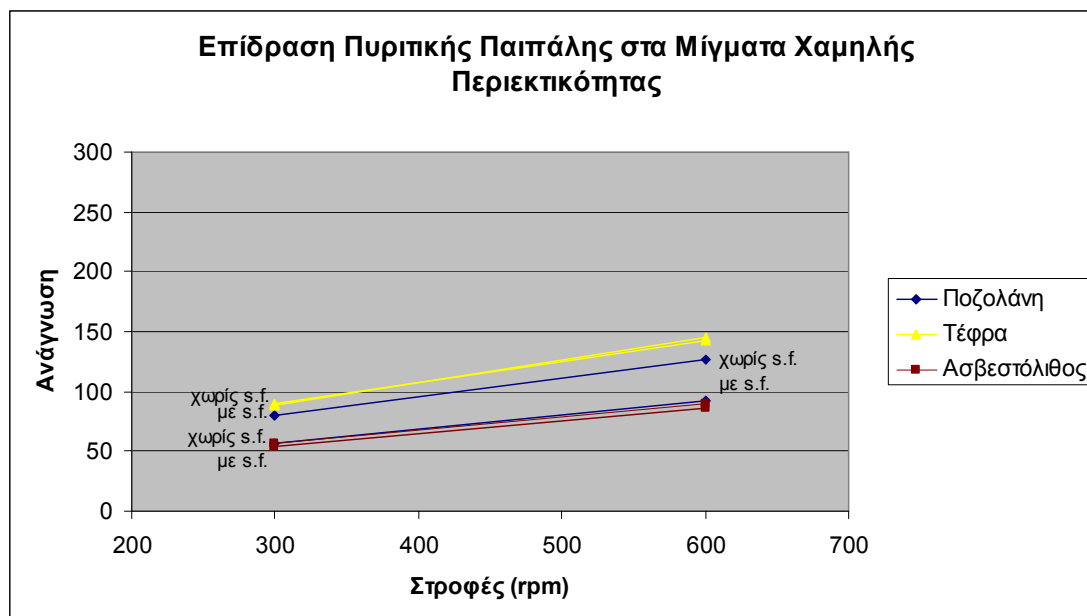
Διάγραμμα 15: Πειραματικά σημεία για τα μίγματα με τσιμέντο και δύο λεπτόκοκκα σε ίσες αναλογίες, 20% έκαστο.

Στο προηγούμενο διάγραμμα, φαίνεται ότι τα μίγματα που περιέχουν ασβεστόλιθο, ως το ένα από τα δύο λεπτόκοκκα, παρουσιάζουν σχεδόν ίδιες τιμές και χαμηλότερες από το μίγμα που περιέχει ποζολάνη και ασβεστόλιθο. Σκοπίμως στο διάγραμμα παρουσιάζονται με διακεκομμένες γραμμές οι αντίστοιχες τιμές για κάθε λεπτόκοκκο μόνο του. Παρατηρείται ότι τα τριμερή μίγματα εμφανίζουν τιμές ενδιάμεσες των αντίστοιχων διμερών. Δηλαδή το τριμερές **τσιμέντο – ποζολάνη – τέφρα**, εμφανίζεται μεταξύ των διμερών **τσιμέντο – ποζολάνη** και **τσιμέντο – τέφρα**.

Η πυριτική παιπάλη χρησιμοποιήθηκε σε ποσοστό 5% στα αντίστοιχα μίγματα, υποκαθιστώντας το αντίστοιχο ποσοστό από το λεπτόκοκκο υλικό που τα μίγματα περιείχαν. Αυτή η ενέργεια έγινε σε μια προσπάθεια να φανεί

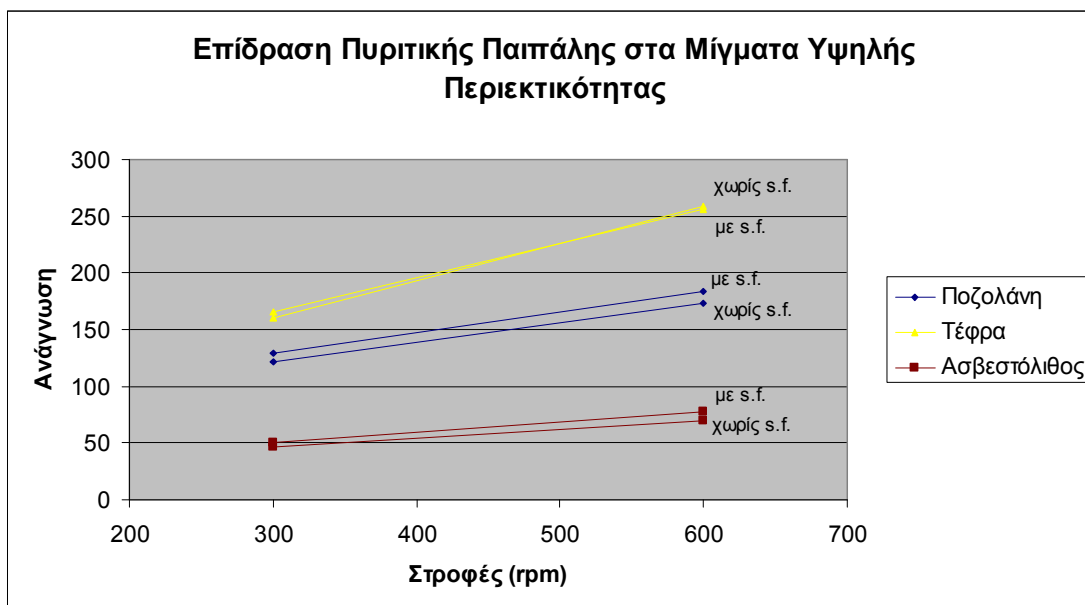
η επίδραση της πυριτικής παιπάλης στο ιξώδες, όταν αυτή αντικαθιστά το λεπτόκοκκο υλικό σε μικρό ποσοστό.

Στα επόμενα διαγράμματα, μπορεί να γίνει εύκολα σύγκριση ως προς τα αντίστοιχα διμερή μίγματα.



Διάγραμμα 16: Μετρήσεις μιγμάτων χαμηλής περιεκτικότητας σε λεπτόκοκκο υλικό (15% & 20%) με και χωρίς την προσθήκη πυριτικής παιπάλης.

Το Διάγραμμα 15 δείχνει με σαφήνεια ότι διαφορές στις μετρήσεις των μιγμάτων, άρα και στο ιξώδες και τη διατμητική τάση κατωφλίου, με τη χρήση ή όχι πυριτικής παιπάλης, εμφανίζονται μόνο στην περίπτωση των μιγμάτων με ποζολάνη, όπου η πυριτική παιπάλη μειώνει σημαντικά τις τιμές.



Διάγραμμα 17: Μετρήσεις μιγμάτων υψηλής περιεκτικότητας σε λεπτόκοκκο υλικό (35% & 40%) με και χωρίς την προσθήκη πυριτικής παιπάλης (s.f.).

Εδώ φαίνεται πως η προσθήκη πυριτικής παιπάλης σε ένα μικρό ποσοστό, υποκαθιστώντας το εκάστοτε λεπτόκοκκο υλικό, δεν αποφέρει αποτελέσματα σε κανένα από τα τρία υλικά. Συγκρίνοντας όμως έστω και τις αμελητέες αυτές επιδράσεις, τα ποζολανικά μίγματα είναι και πάλι εκείνα που ωφελούνται περισσότερο.

## 2.5. ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

### Επίδραση της πυριτικής παιπάλης στα μίγματα με ποζολάνη

Στα χαμηλής περιεκτικότητας σε ποζολάνη δείγματα A1 και Δ1, η ύπαρξη της πυριτικής παιπάλης έχει θετική επίδραση, μειώνοντας το ιξώδες. Αντίθετα, στα δείγματα υψηλής περιεκτικότητας σε ποζολάνη A2 και Δ2 παρατηρείται ότι η ύπαρξη της πυριτικής παιπάλης επιδρά αρνητικά στο ρευστό, αυξάνοντας την τιμή του ιξώδους.

### **Επίδραση της πυριτικής παιπάλης στα μίγματα με ιπτάμενη τέφρα**

Παρατηρείται ότι η προσθήκη πυριτικής παιπάλης στα μίγματα που περιέχουν ιπτάμενη τέφρα, δεν επιδρά στο ιξώδες.

### **Επίδραση της πυριτικής παιπάλης στα μίγματα με ασβεστόλιθο**

Στα μίγματα με χαμηλή περιεκτικότητα 20% σε ασβεστόλιθο (Γ1,Z1), η προσθήκη πυριτικής παιπάλης προκαλεί αμελητέα μείωση του ιξώδους.

Στα υψηλής περιεκτικότητας σε ασβεστόλιθο 40% (Γ2,Z2), η προσθήκη πυριτικής παιπάλης προκαλεί αύξηση του ιξώδους κατά 10%.

### **Για το μίγμα Τσιμέντο-Ασβεστόλιθος-Ποζολάνη (Η)**

Το ιξώδες του μίγματος λαμβάνει τιμή ενδιάμεση των τιμών ιξώδους των μιγμάτων που έχουν μόνο το ένα από τα δύο λεπτόκοκκα αδρανή, είτε πρόκειται για υψηλή είτε για χαμηλής περιεκτικότητα σε αυτά (Α1,Γ1,Α2,Γ2).

### **Για το μίγμα Τσιμέντο-Ποζολάνη-Τέφρα (Θ)**

Συγκριτικά με τα μίγματα που περιέχουν μόνο ποζολάνη από τα λεπτόκοκκα αδρανή (Α1,Α2), το ιξώδες αυτού του μίγματος είναι αρκετά μεγαλύτερο. Όσον αφορά τη συσχέτισή του με τα μίγματα που περιέχουν μόνο ιπτάμενη τέφρα, αξίζει να σημειωθεί ότι το ιξώδες του Θ είναι υψηλότερο από το Β1 (20% τέφρα) και χαμηλότερο από το Β2 (40% τέφρα).

### **Για το μίγμα Τσιμέντο-Ασβεστόλιθος-Τέφρα (I)**

Το ιξώδες του βρίσκεται μικρότερο σε σχέση με τα μίγματα που περιέχουν μόνο τέφρα (B1,B2) και μεγαλύτερο συγκριτικά με τα μίγματα του ασβεστόλιθου (Γ1,Γ2).

### **Σύνδεση κοκκομετρίας και σχήματος με τις ρεολογικές ιδιότητες**

Συμπερασματικά, μπορούν να συσχετισθούν τα αποτελέσματα του SEM με τα αποτελέσματα από τις κοκκομετρικές αναλύσεις και από τις ρεολογικού περιεχομένου μετρήσεις. Συγκεκριμένα, ο ασβεστόλιθος, φαίνεται να είναι το υλικό που έχει το μικρότερο μέγεθος βάσει κοκκομετρίας και SEM, την ομαλότερη κατανομή παράγοντα σχήματος σύμφωνα με το SEM και που, λογικά, θα οδηγούσε σε καλύτερη σωματιδιακή πλήρωση μεταξύ των κενών των σωματιδίων του τσιμέντου. Αυτό το θεωρητικό πόρισμα, έρχεται να συνδεθεί και να επαληθευθεί από τα αποτελέσματα των μετρήσεων ιξώδους, με τα δείγματα του ασβεστόλιθου να είναι τα πιο λεπτόρρευστα (χαμηλότερο ιξώδες).

## 2.6. Συμπεράσματα

- Ο ασβεστόλιθος αποτελεί το καλύτερο λεπτόκοκκο πρόσμικτο, από τα δοκιμαζόμενα σε αυτή τη μελέτη, ώστε να παρασκευασθεί μια πάστα τσιμέντου η οποία θα έχει βελτιωμένες ρεολογικές ιδιότητες σε σχέση με άλλες. Αυτό οδηγεί σε ένα πιο λεπτόρρευστο συνδετικό μέσο για το σκυροδέμα, το οποίο με κατάλληλες –εντός ορίων- κοκκομετρίες χονδροκόκκων αδρανών, μπορεί άριστα να αποτελέσει μίγμα αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος.
- Ακόμα, με κατάλληλο συνδυασμό υλικών και ποσοτήτων, μπορούν να επιτευχθούν μίγματα τα οποία θα καλύπτουν τις ιδιαίτερες ανάγκες μεμονωμένων εφαρμογών, όπου χρειάζονται συγκεκριμένα επίπεδα εργασιμότητας.
- Η προσθήκη λεπτόκοκκων αδρανών στο μίγμα είναι μια τεχνική που μπορεί να γίνεται πολύ πιο εύκολα και με λιγότερο κίνδυνο από ότι η εφαρμογή χημικών προσθέτων.
- Το ΑΣΣ είναι ένας τύπος σκυροδέματος, όπου μικρή απόκλιση της σύνθεσης του μίγματος προκαλεί απώλεια της ικανότητας της αυτοσυμπύκνωσης.
- Στο ΑΣΣ απαιτείται περισσότερη πάστα τσιμέντου και υψηλότερο ποσοστό λεπτόκοκκων υλικών στη πάστα. Το ΑΣΣ είναι ένας αποδέκτης υλικών σε μορφή σκόνης. Η προσθήκη εξαιρετικά λεπτόκοκκων αδρανών στο τσιμέντο επιδρά στο ιξώδες της πάστας. Ο ρόλος του ασβεστόλιθου λόγω κοκκομετρίας και σχήματος κόκκου παρουσιάζει βελτίωση του ιξώδους και είναι το καλύτερο λεπτόκοκκο υλικό.



## 2.7. Προτάσεις για το μέλλον

Η μελέτη του συγκεκριμένου θέματος, της προσθήκης λεπτόκοκκων αδρανών στην κονία με σκοπό τη βελτίωση των ρεολογικών ιδιοτήτων της πάστας τσιμέντου, δεν πρέπει να σταματήσει εδώ. Τα αποτελέσματα κρίνονται ενθαρρυντικά και έτσι γίνεται μια σειρά από προτάσεις για την ερευνητική δραστηριότητα στο μέλλον, άμεσο και απώτερο.

- Προτείνεται η αναβάθμιση του ιξωδομέτρου, με αλλαγή του ελατηρίου και του δίσκου του, ώστε να αυξηθεί το εύρος τιμών. Με αυτόν τον τρόπο, θα μπορέσουν να μετρηθούν μίγματα με μικρότερους λόγους νερού/κονία, έτσι ώστε να γίνει καλύτερη προσέγγιση των μιγμάτων που χρησιμοποιούνται σε κατασκευές.
- Ακόμα, σε συνεργασία με κάποια βιομηχανία παραγωγής σκυροδέματος, θα ήταν καλό να επιχειρηθεί η παρασκευή ΑΣΣ, με βάση τις πάστες αυτές και χονδρόκοκκα αδρανή γνωστής και καθορισμένης κοκκομετρίας, και να επακολουθήσουν δοκιμές εργασιμότητας στα παρασκευασθέντα μίγματα σκυροδέματος. Κατ' αυτόν τον τρόπο, θα επιχειρηθεί σύνδεση των θεμελιωδών ρεολογικών μεγεθών της πάστας (ιξώδες, τάση ροής) με τα εμπειρικά μεγέθη εργασιμότητας του σκυροδέματος (εξάπλωση, διειλευσιμότητα, κλπ).
- Μία ακόμα πρόταση, είναι η ανάπτυξη μαθηματικού μοντέλου, ώστε να γίνεται πρόρρηση των ιδιοτήτων του ΑΣΣ, μέσω μετρήσεων επί της τσιμεντόπαστας. Ακόμη πιο πέρα, η προσπάθεια εξαγωγής σταθερών για κάθε υλικό και η ενσωμάτωσή τους σε συναρτήσεις με μεταβλητές το ποσοστό του υλικού στο μίγμα και την κοκκομετρία των χονδρόκοκκων αδρανών για διαφορετικούς τύπους τσιμέντου, θα ήταν ένα βήμα προς τη διευκόλυνση του σχεδιασμού των μιγμάτων και την ελαχιστοποίηση του χρόνου που δαπανάται σε δοκιμές από τις βιομηχανίες παρασκευής σκυροδέματος.

### 3. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Με τα αποτελέσματα των πειραμάτων, επιχειρήθηκε η ανάπτυξη ενός μαθηματικού μοντέλου, σαν πρώτο βήμα προς μια υπολογιστική προσομοίωση.

Τα μαθηματικά μοντέλα που δοκιμάστηκαν είναι το μοντέλο του Bingham και το εκθετικό (power law). Από ρη σύγκριση των συντελεστών προσαρμογής  $R^2$ , για κάθε μοντέλο, αποφασίστηκε ότι καλύτερη προσαρμογή επιτυγχάνεται στο εκθετικό.

Το εκθετικό μαθηματικό μοντέλο εκφράζεται με την εξής σχέση:

$$\tau = k \cdot \gamma^n$$

Οι συντελεστές της εξίσωσης, όπως υπολογίζονται από τις αναγνώσεις φαίνονται στον επόμενο πίνακα:

*Πίνακας 19: Τιμές συντελεστών εκθετικού μοντέλου.*

Μίγμα	k	n
A1	1,144	1,667
A2	3,019	1,504
B1	0,991	1,720
B2	1,584	1,689
Γ1	0,866	1,684
Γ2	1,033	1,606
Δ1	2,774	1,415
Δ2	3,677	1,472
E1	2,516	1,500
E2	2,455	1,590
Z1	2,887	1,402
Z2	3,212	1,374
H	3,832	1,397
Θ	2,971	1,519
I	3,023	1,449

Το τμήμα αυτό της μελέτης βρίσκεται σε πρώιμο στάδιο ακόμη και τα αποτελέσματα δεν μπορούν να σχολιαστούν.

## 4. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Domone P.L., “Self-compacting concrete: An analysis of 11 years of case studies”, *Cement and Concrete Composites* 28 (2006): 198-208.
2. NMRCA, “CIP-15 Chemical Admixtures for Concrete”, NMRCA Technical Information Bulletin.
3. Neville A. “Properties of Concrete”, Fourth Edition, England 2000.
4. Kordts S. and Grube H., “Controlling the workability properties of self-compacting concrete used as ready-mixed concrete”, *RILEM Proceedings Pro 33*: 103-112.
5. Kordts S. and Grube H., “Assessment of the fresh concrete properties of self-compacting concrete”, *RILEM Proceedings Pro 33*: 113-124.
6. Roelfster E.P., “A Numerical Approach to Investigate the Properties of Concrete”, Thesis, Ecole Polytechnique de Lausanne, 1989.
7. Kordts S. and Breit W., “A simple test method for assessing the workability of self-compacting concrete”, Schleibinger Testing Systems, Workshop 2004.
8. Sebaibi Y. et al., “A study of the viscosity of lime-cement paste: influence of the physicochemical characteristics of lime”, *Construction and Building Materials* 18 (2004): 653-660.
9. Roussel N., “A thixotropy model for fresh fluid concretes: Theory, validation and applications”, *Cement and Concrete Research* 36 (2006): 1797-1806.
10. Ouchi, Nakamura et al., “Applications of self-compacting concrete in Europe, Japan and the United States”, ISHPC 2003.
11. Ferraris F.C., “Simulation of SCC Flow”, 1st North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete Proceedings, Chicago, IL, November 2002, pp. 27-30.
12. “BTRHEOM Fresh Concrete Flowmeter”, Brochure, LPC Equipment.
13. Greenwald J. et al., “Masonry construction...Self-consolidating Grout”, *Structures Magazine* (May 2005): 20-21.
14. “Glossary of some terms used in cement, concrete and scanning electron microscopy”, WHD Microanalysis Consultants.
15. NMRCA, “CIP-37 Self Consolidating Concrete”, NMRCA Technical Information Bulletin.
16. Roussel N. et al., “Computational Modelling of concrete flow: General Overview”, *Cement and Concrete Research* 37 (2007): 1298-1307.
17. McGovern M., “Going with the flow”, *Concrete technology today* 2002, PCA.
18. Zhu W. and Gibbs C.J., “Use of different limestone and chalk powders in self-compacting concrete”, *Cement and Concrete Research* 35 (2005): 1457-1462.
19. EFNARC, “Specifications for Self-Compacting Concrete”, February 2002 UK.

20. FANN INSTRUMENT COMPANY, Viscometer Manual, Texas USA, 1996.
21. Ozyildirim C. and Lane S., "Final Report: Evaluation of self-consolidating concrete", Virginia transportation research council, June 2003.
22. "Self-Compacting Concrete", Fact Sheet 5, British Cement Association.
23. "Feasibility of slip-form paving with self-consolidating concrete", National Concrete Pavement Technology Center, tech transfer summary, May 2006.
24. Bartos P., "Final Report of Task 8.5 – Environment and ergonomics", University of Paisley, July 2000.
25. Groth P., "Final Report of Task 6 – Steel fibre reinforced SCC", Self Compacting Concrete, June 2000.
26. Petersson O., "Final Report of Task 1 – Preliminary Mix Design", Self Compacting Concrete, October 1997.
27. Petersson O., "Final Report of Task 2 – Workability", Self Compacting Concrete, September 1999.
28. Sedran T., "Final Report of Task 3 – Rheology", Self Compacting Concrete, February 2000.
29. Shethji A. and Vipulanandan C., "Flow Properties of Self Consolidating Concrete with time", CIGMAT 2004 Proceedings, Vol. II pp. 14-16.
30. Kasthurirangan Gopalakrishnan and Naga Shashidhar, "Structural Characteristics of Three-Dimensional Random Packing of Aggregates with Wide Size Distribution", International Journal Of Information Technology Volume 3 Number 3 2006 ISSN 1305-2403
31. Felekoglu B. et al., "The effect of fly ash and limestone fillers on the viscosity and compressive strength of self-compacting repair mortars", Cement and Concrete Research 36 (2006): 1719-1726.
32. Wustholz T., "Fresh Properties of Self-Compacting Concrete", Otto-Graf-Journal 14 (2003): 179-188.
33. "Self Consolidating Concrete: A history, application, testing and admixture guide", EUCO, 2003.
34. Skodras G. et al., "Quality Characteristics of Greek fly ashes and potential uses", Fuel Processing Technology (2006).
35. De Schutter G., "Guidelines for testing self-compacting concrete", European Research Project: Measurement of properties of fresh self-compacting concrete, September 2005.
36. Sahmaran M. and Yaman I.O., "Hybrid fiber reinforced self-compacting concrete with a high-volume coarse fly ash", Construction and Building Materials 21 (2007): 150-156.
37. Chatzimina M. et al., "Cessation of annular Poiseuille flows of Bingham plastics", Non Newtonian Fluid Mechanics 142 (2007): 135-142.
38. Ferraris C., "Measurement of the Rheological Properties of High Performance Concrete: State of the Art Report", NIST Journal of Research 104 (1999): 461-478.

39. Feys D. et al., "Fundamental study of the rheology of self-compacting concrete, composed with Belgian materials".
40. Geiker R.M. et al., "The effect of measuring procedure on the apparent rheological properties of self-compacting concrete", *Cement and Concrete Research* 32 (2002): 1791-1795.
41. Domone P.L., "A review of the hardened mechanical properties of
42. Self-compacting concrete", *Cement & Concrete Composites* 29 (2007): 1-12.
43. Dufour F. and Pijaudier-Cabot G., "Numerical modelling of concrete flow: homogeneous approach", *International Journal for Numerical and analytical Methods in Geomechanics* 29 (2005): 395-416.
44. Oh G.S., Noguchi T. and Tomosawa F., "Towards Mix Design for Rheology of Self-Compacting Concrete", 1st International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Proceedings 361-372.
45. Smeplass S. and Mortsell E., "The applicability of the particle matrix model to self-compacting concrete (SCC)", *Nordic Concrete Research*, Article 26-6.
46. Zhu W. and Bartos P., "Permeation properties of self-compacting concrete", *Cement and Concrete Research* 33 (2003): 921-926
47. Laure P. et al., "Numerical modelling of concrete flow with rigid Fibers", *AIP Conference Proceedings* 2007, Vol. 907, p. 1390-1395.
48. Billington C., "Self-compacting Concrete", *Practically speaking – Trent concrete*, 10-11.
49. Roshavelov T., "Prediction of fresh concrete flow behavior based on analytical model for mixture proportioning", *Cement and Concrete Research* 35 (2005): 831-835.
50. "Rheodynamic Self-consolidating Concrete", *Products in Practice*, BASF The Chemical Company.
51. Reza Mahmoodi Baram, Hans J. Herrmann, "Self-similar space-filling packings in three dimensions" December 11, 2003.
52. "Technical Memorandum ME 03 – 10", *Maine Department of Transportation*, October 2003.
53. Schwartzenruber L. et al., "Rheological behaviour of fresh cement pastes formulated from a Self Compacting Concrete (SCC)", *Cement and Concrete Research* 36 (2006): 1203-1213.
54. EFNARC, "The European Guidelines for Self Compacting Concrete", May 2005.
55. Pierce E.C., Blackwell C.M., "Potential of scrap tire rubber as lightweight aggregate in flowable fill", *Waste Management* 23 (2003): 197-208.
56. Su N. et al., "A simple mix design method for self-compacting concrete", *Cement and Concrete Research* 31 (2001): 1799-1807.
57. Billberg B., "Influence of Superplasticizers and slag blended cement on the rheology of fine mortar part of concrete" *Nordic Concrete Research*, Article 24-2.

58. Martinola G. et al., "Self Compacting Concrete (SCC): Sustainability", CemSuisse, 2006.
59. "An Introduction to Self-Consolidating Concrete (SCC)", Technical Bulletin TB-1500, Grace Construction Products.
60. "Definitions of Terms Relating to Self-Consolidating Concrete (SCC)", Technical Bulletin TB-1501, Grace Construction Products.
61. "Materials for Self-Consolidating Concrete (SCC)", Technical Bulletin TB-1502, Grace Construction Products.
62. Grunewald S. et al., "Summary report of workpackage 3.1 Test methods for filling ability of SCC", Testing SCC Growth Project, October 2004.
63. Brouwers H.J.H., "Self-Compacting Concrete: Theoretical and experimental study", Cement and Concrete Research 35 (2005): 2116-2136.
64. Wallevik E.J., "Self-Compacting Concrete: Theoretical and experimental study", Non-Newtonian Fluid Mechanics 132 (2005): 86-99.
65. Bignozzi M. and Sandrolini F., "Tyre rubber waste recycling in self-compacting concrete", Cement and Concrete Research 36 (2006): 735-739.
66. Bullard W.J. and Obla K., "Virtual Testing of Ready Mixed Concrete", Concrete in FOCUS, NRMCA Spring 2004, Vol. 3, p. 38-41.
67. Khayat H.K., "Viscosity enhancing admixtures for cement based materials: an overview", Cement and Concrete Composites 20 (1998): 171-178.
68. Ozyildirim C. and Lane S., "Evaluation of Self-Consolidating Concrete", VTRC 03-R13RB, August 2004.
69. Ferraris F.C. et al., "Workability of Self-Compacting Concrete", International Symposium on High Performance Concrete Orlando, Florida 2000, Proceedings 398-407.
70. Sahmaran M. et al., "Workability of hybrid fiber reinforced self-compacting concrete", Building and Environment 40 (2005): 1672-1677.
71. Petit J.Y. et al., "Yield stress and viscosity equations for mortars and self-consolidating concrete", Cement and Concrete Research 37 (2007): 655-670.
72. Claus Pade, "Material Models in SCC Mix Design", SCC Seminar in Copenhagen, June 2006.
73. Claus Pade, "Environmental Impact of Self-Compacting Concrete, ECOserve Meeting in Warsaw, May 2006.
74. Zhang X. and Han J., "The effect of ultra-fine admixture on the rheological property of cement paste"
75. "Προσωρινές Εθνικές Τεχνικές Προδιαγραφές", Υπουργείο ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ., Ινστιτούτο Οικονομίας Κατασκευών, Έκδοση 1<sup>η</sup>.
76. Γσίμας Σ., Τσιβιλής Σ., "Επιστήμη και τεχνολογία τσιμέντου", Ε.Μ.Π., Αθήνα 2003.
77. Μπεάζη – Κατσιώτη Μ., "Ειδικά κεφάλαια ανόργανης χημείας", Ε.Μ.Π., Αθήνα 2004.

78. Γεωργιάδης Α. κ.ά., “Μία βελτιωμένη μέθοδος σχεδιασμού και ποιοτικού ελέγχου μειγμάτων αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος (ΑΣΣ)”, 15<sup>ο</sup> Συνέδριο Σκυροδέματος, Αλεξανδρούπολη 2006, Πρακτικά – Εργασία 40.
79. Παπανικολάου Κ.Γ. κ.ά., “Εφαρμογή αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος στην ελληνική προκατασκευή”, 15<sup>ο</sup> Συνέδριο Σκυροδέματος, Αλεξανδρούπολη 2006, Πρακτικά – Εργασία 209.
80. Παπανικολάου Κ.Γ. κ.ά., “Εργαστηριακός έλεγχος αυτοσυμπυκνούμενου χαμηλού κόστους”, 15<sup>ο</sup> Συνέδριο Σκυροδέματος, Αλεξανδρούπολη 2006, Πρακτικά.
81. Σίδερης Κ.Κ. κ.ά., “Μηχανικά χαρακτηριστικά και ανθεκτικότητα αυτοσυμπυκνούμενων σκυροδεμάτων παρασκευασθέντων με ελληνικά υλικά”, Πρακτικά 14<sup>ο</sup> Συνεδρίου Σκυροδέματος, Κως 2003.
82. Παπανικολάου Κ.Γ. και Τριανταφύλλου Αθ.Χ., “Αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα: Ανασκόπηση, Ιδιότητες και Προοπτικές στην Ελλάδα”, Πρακτικά 14<sup>ο</sup> Συνεδρίου Σκυροδέματος, Κως 2003.
83. Κοροπούλης Ι., “Αυτο-Συμπυκνούμενο Σκυρόδεμα SCC (Self Compacting Concrete)”, Πρακτικά 14<sup>ο</sup> Συνεδρίου Σκυροδέματος, Κως 2003.
84. Καλεντζώτης Α., “Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυρόδεμα”, 13<sup>ο</sup> Φοιτητικό Συνέδριο: Επισκευές Κατασκευών, Πάτρα, Φεβρουάριος 2007.
85. Κτένας Αθ., “Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυρόδεμα (Self-Compacting Concrete)”, 12<sup>ο</sup> Φοιτητικό Συνέδριο: Επισκευές Κατασκευών, Πάτρα, Φεβρουάριος 2006.
86. Μόσχος Σ., “Αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα”, 10<sup>ο</sup> Φοιτητικό Συνέδριο: Επισκευές Κατασκευών, Πάτρα, Μάρτιος 2004.
87. Τζίμας Α., Χατζάκης Π., “Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυρόδεμα”, Φοιτητικό Συνέδριο: Επισκευές Κατασκευών, Πάτρα, Φεβρουάριος 2007.
88. Γαρατζιώτης Γ. κ.ά., “Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυρόδεμα Χαμηλών Λεπτόκοκκων”, Πρακτικά 1<sup>ο</sup> Πανελλήνιου Συνεδρίου Δομικών Υλικών και Στοιχείων, Σελ. 934 – 949.