

## ΑΔΡΑΝΗ

### 1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

#### 1.1 ΟΡΙΣΜΟΣ

Σύμφωνα με το Πρότυπο ΕΛΟΤ EN12620 **αδρανή υλικά είναι κοκκώδη υλικά που χρησιμοποιούνται στις κατασκευές**. Στον όρο κατασκευές περιλαμβάνονται πάσης φύσεως έργα πχ οδοποιίας, φραγμάτων, γεφυρών, κτιρίων κλπ αλλά και κατασκευαστικών υλικών όπως πχ τσιμεντοσκυρόδεμα, ασφαλτοσκυρόδεμα, κονιάματα τοιχοποιίας κ.α. Για την περίπτωση του σκυροδέματος κατά το Πρότυπο ΕΛΟΤ EN 206-1 αδρανές είναι **κοκκώδες υλικό ορυκτής προέλευσης κατάλληλο για χρήση σε σκυρόδεμα**

#### 1.2 ΕΙΔΗ ΑΔΡΑΝΩΝ

Από απόψεως προέλευσης διακρίνονται σε:

- **Φυσικά αδρανή** τα οποία είναι ορυκτής προέλευσης και δεν έχουν υποστεί καμία επεξεργασία πλην μηχανικής (διαλογή και θραύση). Είναι τα φυσικά-συλλεκτά αδρανή χωρίς θραύση και τα θραυστά αδρανή που προέρχονται από λατομεία ή από θραύση συλλεκτών αδρανών.
- **Τεχνητά αδρανή** τα οποία έχουν ορυκτή προέλευση αλλά έχουν υποστεί κάποια βιομηχανική επεξεργασία θερμική ή άλλου είδους. Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται διάφορα τεχνητά ελαφρά αδρανή, σκωρίες κ.α.
- **Ανακυκλωμένα αδρανή** τα οποία προέρχονται από επεξεργασία άλλων ανόργανων υλικών που είχαν αρχικά χρησιμοποιηθεί σε κατασκευές

Από απόψεως πυκνότητας διακρίνονται σε:

- **Αδρανή συνήθους/κανονικού βάρους** είναι τα αδρανή που μετά από ξήρανση σε κλίβανο έχουν πυκνότητα κόκκων, προσδιοριζόμενη σύμφωνα με EN 1097-6, μεταξύ 2000 kg/m<sup>3</sup> και 3000 kg/m<sup>3</sup>
- **Ελαφρά αδρανή**<sup>1</sup> είναι τα αδρανή που μετά από ξήρανση σε κλίβανο έχουν πυκνότητα κόκκων προσδιοριζόμενη σύμφωνα με EN1097-6 μικρότερη ή ίση με 2000 kg/m<sup>3</sup> ή φαινόμενη πυκνότητα "χύδην" προσδιοριζόμενη σύμφωνα με EN 1097-3 μικρότερη ή ίση με 1200 kg/m<sup>3</sup>.
- **Βαριά αδρανή** είναι τα αδρανή που μετά από ξήρανση σε κλίβανο έχουν πυκνότητα προσδιοριζόμενη σύμφωνα με EN 1097-6 μεγαλύτερη ή ίση προς 3000 kg/m<sup>3</sup>.

#### 1.3 Ο ΡΟΛΟΣ ΤΩΝ ΑΔΡΑΝΩΝ ΣΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

Τα αδρανή αποτελούν περίπου το 70-80% κατόγκο (κ.ο) του συνήθους σκυροδέματος και επομένως είναι φυσικό να αναμένεται ότι η επιρροή τους στις ιδιότητες του σκυροδέματος να είναι σημαντική. Πράγματι τα αδρανή επηρεάζουν άμεσα:

- Την εργασιμότητα

<sup>1</sup> Επισημαίνεται ότι πρέπει να μην χρησιμοποιείται η ατυχής μετάφραση του αγγλικού όρου lightweight aggregate "ελαφροβαρές αδρανές γιατί συνιστά "βαρβαρισμό" στην ελληνική γλώσσα.

- Την ανθεκτικότητα
- Τον ερπυσμό
- Την συστολή ξήρανσης και τη θερμική συστολοδιαστολή
- Τη σταθερότητα του νωπού σκυροδέματος (πχ απόμιξη, εξίδρωση)
- Το κόστος
- Την κατανομή των τάσεων μέσα στη μάζα του σκυροδέματος και την συμπεριφορά του σε φόρτιση (μικρο-ρηγμάτωση, ψαθυρή ή μη ψαθυρή αστοχία)

Η αντοχή του σκυροδέματος, στις συνήθεις περιπτώσεις, επηρεάζεται έμμεσα μέσω της επίδρασης των αδρανών στην εργασιμότητα του μίγματος και στον καθορισμό της ποσότητας του απαιτούμενου νερού για δεδομένη εργασιμότητα. Έτσι πχ αν αυξηθεί το ποσοστό της άμμου σε ένα μίγμα και ελαττωθεί ανάλογα το ποσοστό των χονδρών αδρανών η απαίτηση σε νερό του μίγματος στις συνήθεις περιπτώσεις θα αυξηθεί για να διατηρηθεί ή ίδια εργασιμότητα. Αν πρέπει ταυτόχρονα να μην ελαττωθεί η αντοχή θα πρέπει να αυξηθεί και το τσιμέντο ώστε να μην ελαττωθεί ο λόγος Ν/Τ. Στις συνήθεις περιπτώσεις μικρή μεταβολή στην διαβάθμιση των αδρανών ή στο είδος των αδρανών με σταθερό λόγο Ν/Τ επιφέρει μεταβολές στην αντοχή που θα μπορούσαν σε πολλές συνήθεις περιπτώσεις να θεωρηθούν μικρές. Αυτό όμως δεν ισχύει σε ακραίες περιπτώσεις όπως πχ

- σε περίπτωση σκυροδέματος υψηλής ή πολύ υψηλής αντοχής όπου η αντοχή των αδρανών είναι πολύ σημαντικός παράγοντας, όπως άλλωστε φαίνεται και από την αύξηση του ποσοστού των επιφανειών θραύσης αδρανών που παρατηρείται όταν η αντοχή αυξάνει.
- Σε περίπτωση ελαφροσκυροδέματος όπου η αντοχή των αδρανών είναι σχετικώς μικρή και επιβάλλει στην πράξη ένα άνω όριο αντοχής σκυροδέματος

Η ονομασία "αδρανές" προέκυψε από την κυριαρχούσα άποψη στην αρχική περίοδο χρησιμοποίησής του σκυροδέματος ότι είναι ένα υλικό που ανακατεύεται με τον τσιμεντοπολτό για να αυξήσει τον όγκο του και να μειώσει το κόστος αφού τα αδρανή αποτελούν το σημαντικά φθηνότερο συστατικό του σκυροδέματος. Η άποψη αυτή φυσικά δεν είναι ορθή πλην του θέματος του κόστους, όπως ήδη αναφέρθηκε και τα επόμενα κεφάλαια θα καταδείξουν.

Σκυρόδεμα αποτελούμενο μόνο από σκληρυμένο τσιμεντοπολτό (χωρίς αδρανή) δεν μπορεί να νοηθεί στην πράξη γιατί :

- Το υλικό θα είναι πολύ αντισυμβατό δεδομένου ότι το τσιμέντο αποτελεί ένα από τα ακριβότερα συστατικά του σκυροδέματος ενώ τα αδρανή είναι το φθηνότερο.
- Το σκληρυμένο υλικό που θα παραχθεί χωρίς αδρανή θα χαρακτηρίζεται από υψηλές τιμές συστολής ξήρανσης και ερπυσμού που θα καθιστούσαν τη χρήση του προβληματική (βλ Κεφ Συστολή, Ερπυσμός)
- Ο συντελεστής συστολο-διαστολής δεν θα είναι συμβατός με εκείνον του χάλυβα οπλισμού
- Το υλικό θα είναι πολύ ψαθυρό αφού τα αδρανή συμβάλλουν στη μικρο-ρηγμάτωση του σκυροδέματος πριν από τη θραύση και στην καμπύλωση του διαγράμματος σ-ε και επομένως στην αύξηση της παραμόρφωσης θραύσης (βλ Σχ7 Κεφ "Συμπεριφορά Σκυροδέματος σε Φόρτιση")

- Εκτός εξαιρέσεων το σκυρόδεμα με αδρανή έχει μεγαλύτερη ανθεκτικότητα έναντι περιβαλλοντικών και χημικών δράσεων σε σύγκριση με τον τσιμεντοπολλτό.

Τα αδρανή συνιστούν μέσα στη μάζα του σκυροδέματος ένα σκελετό τα κενά του οποίου (κενά μεταξύ των κόκκων των δρανών και μεταξύ των κόκκων και της εσωτερικής επιφάνειας των καλουπιών) πρέπει να γεμίσουν πλήρως (και σε ειδικές περιπτώσεις εν μέρει<sup>2</sup>) με τσιμεντοπολλτό και με άλλα στερεά πρόσμικτα που περιέχει ενδεχομένως το σκυρόδεμα.

Το τσιμέντο είναι το κυριότερο<sup>3</sup> συνδετικό υλικό του σκυροδέματος δηλ είναι το υλικό εκείνο που εξασφαλίζει την σύνδεση των κόκκων των αδρανών μεταξύ τους ώστε να διαμορφωθεί ένα τεχνητό στερεό υλικό. Πρέπει επομένως μαζί με τυχόν άλλα λεπτόκοκκα πρόσμικτα υλικά (με συνδετική ή χωρίς συνδετική δράση) υπό μορφή πολτού να γεμίζει όχι μόνο τα κενά των αδρανών αλλά και να τα περιβάλλει με ένα υμένα ικανού πάχους ώστε να εξασφαλίζεται

- η μέγιστη δυνατή συνεργασία των αδρανών και του σκληρυμένου τσιμεντοπολλτού στο διαμορφούμενο νέο στερεό υλικό
- το αναγκαίο πάχος υμένα, ο οποίος σε νωπή κατάσταση μέσω της "λιπαντικής" του δράσης, διευκολύνει την μετακίνηση των κόκκων και εξασφαλίζει την απαιτούμενη εργασιμότητα στο σκυρόδεμα. Τονίζεται ότι η δράση αυτή έχει πολύ μεγάλη σημασία γιατί ένα σκυρόδεμα χωρίς την απαιτούμενη εργασιμότητα είναι άχρηστο.

## 2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΑΔΡΑΝΩΝ (ΕΛΟΤ EN 12620)

### 2.1 ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ

Όλες οι δοκιμές που γίνονται στα αδρανή για την μέτρηση των χαρακτηριστικών τους γίνονται σε δείγματα αντιπροσωπευτικά που λαμβάνονται από τις αποθέσεις ή τις πηγές παραγωγής των αδρανών. Βασική προϋπόθεση της δειγματοληψίας είναι η λήψη αντιπροσωπευτικού δείγματος

Ο χαρακτηρισμός αντιπροσωπευτικό δείγμα δεν είναι απλώς ευχή αλλά πρέπει να καταβάλλεται κάθε προσπάθεια για επίτευξή του, αν επιδιώκεται να έχουμε πραγματικά και επαναλήψιμα αποτελέσματα, διότι τα κοκκώδη υλικά, όπως είναι τα αδρανή, εύκολα υπόκεινται σε διαχωρισμό, οπότε η αντιπροσωπευτικότητα παύει να έχει ουσιαστικό νόημα. Η δειγματοληψία αφορά συνήθως δύο στάδια : Το πρώτο είναι η δειγματοληψία από την πηγή παραγωγής των αδρανών που στις περισσότερες περιπτώσεις αφορά δειγματοληψία από τον σωρό απόθεσης των αδρανών στο λατομείο και η δεύτερη αφορά την μείωση της μάζας του δείγματος στην ακριβή ποσότητα δείγματος που απαιτείται για την εκτέλεση των δοκιμών σύμφωνα με από τα πρότυπα (EN 933, ASTM D 75) ανάλογα με την διάσταση του μέγιστου κόκκου του δείγματος.

Στο πρώτο στάδιο η δειγματοληψία είναι πολύ δύσκολη, ιδιαίτερα όταν γίνεται από σωρό εναπόθεσης και είναι αμφίβολο αν στην πράξη ακολουθούνται όλοι οι κανόνες δειγματοληψίας. Η δυσκολία οφείλεται στο γεγονός ότι τα αδρανή όταν εναποτίθενται σε σωρούς υφίστανται πολύ εύκολα διαχωρισμό γιατί οι μεγαλύτεροι κόκκοι τείνουν να συγκεντρώνονται στον πόδα του σωρού δημιουργώντας έτσι έντονη απόμιξη. Η απόμιξη είναι

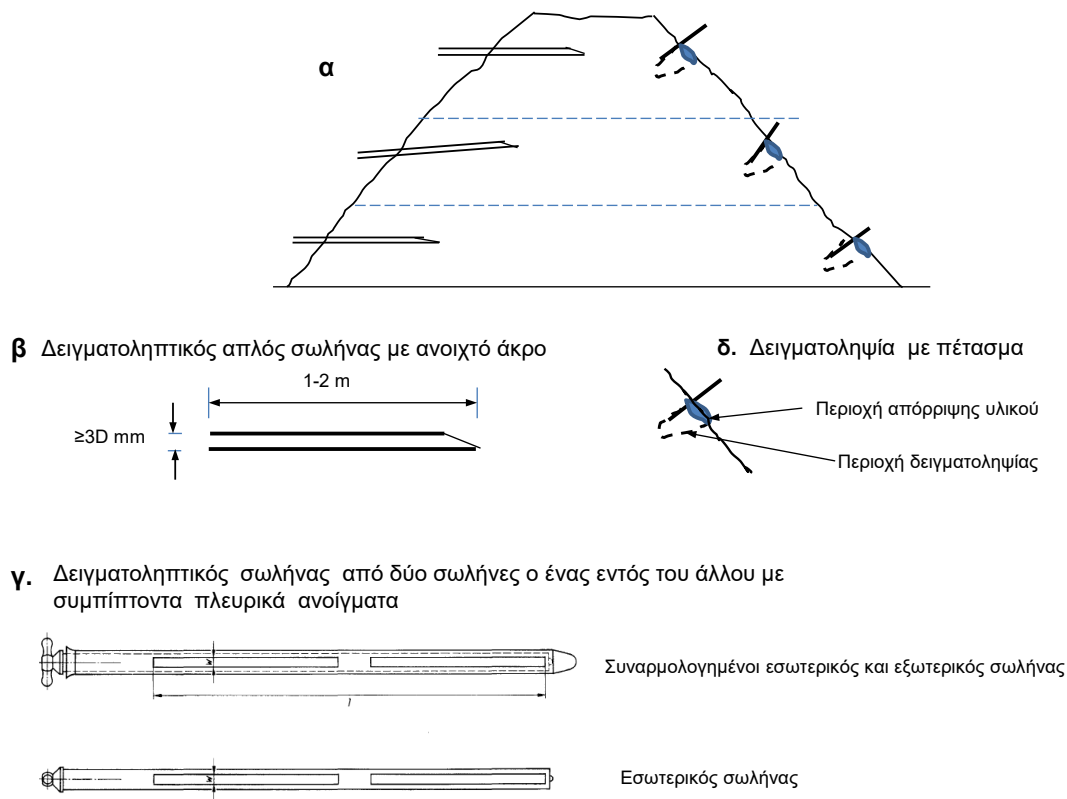
<sup>2</sup> Μερική πλήρωση γίνεται σκόπιμα σε περιπτώσεις διαπερατού (πορώδους) σκυροδέματος

<sup>3</sup> Άλλα συνδετικά υλικά είναι ορισμένα στερεά πρόσμικτα, όπως κονιοποιημένος ασβεστόλιθος ή άλλα κατάλληλα ορυκτά, διάφορα είδη ποζολανών, ιπτάμενες τέφρες, πυριτική πιαπάλη κ.α, τα οποία σε συνδυασμό με το τσιμέντο βελτιώνουν την εργασιμότητα, την σταθερότητα, την αντοχή και την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος

μεγαλύτερη όσο ο σωρός είναι υψηλότερος και όσο η απόθεση γίνεται από μεγαλύτερο ύψος. Στο Σχ 2.1 συνοψίζονται σχηματικά δύο από τις οδηγίες του Πρότυπου ASTM D-75 για την δειγματοληψία από σωρούς. Σε κάθε περίπτωση πρέπει να λαμβάνονται πολλά δείγματα από το άνω, μέσο και κάτω τρίτο του ύψους του σωρού από διάφορα σημεία περιφερειακά.

Στην περίπτωση της δειγματοληψίας με δειγματοληπτικό σωλήνα που εμπήγεται βαθιά μέσα στο σωρό, η δειγματοληψία είναι ακριβέστερη αλλά υπάρχει η δυσκολία της έμπηξης των σωλήνων<sup>4</sup>.

Στην περίπτωση δειγματοληψίας με πέτασμα, εμπήγεται κάποιο μεταλλικό ή ξύλινο πέτασμα στην επιφάνεια του σωρού πάνω από την περιοχή δειγματοληψίας για να παρεμποδίσει τους επιφανειακούς κόκκους των αδρανών να κυλήσουν στην περιοχή αυτή και να αλλοιώσουν την αντιπροσωπευτικότητα του δείγματος. Σημειώνεται ότι η επιφάνεια του πρανούς του σωρού λόγω του τρόπου που κυλίνουν οι μεγαλύτεροι κόκκοι στο πρανές δεν αποτελούν αντιπροσωπευτικό δείγμα. Για τον ίδιο λόγο απορρίπτεται και το υλικό που βρίσκεται στην επιφάνεια του σωρού στην περιοχή της δειγματοληψίας, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1



Σχ 2.1: Σχηματική παρουσίαση δειγματοληψίας από σωρό αδρανών

Στο δεύτερο στάδιο δειγματοληψίας πρέπει από το αρχικό δείγμα να ληφθεί πάλι αντιπροσωπευτικό δείγμα βάρους που δεν πρέπει να είναι μικρότερο από ορισμένα όρια, για να γίνουν οι δοκιμές που προβλέπονται για τις διάφορες ιδιότητες των αδρανών (γεωμετρικά, φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά). Έτσι πχ για την

<sup>4</sup> Η διάμετρος του σωλήνα πρέπει να επιτρέπει την απρόσκοπτη εισδοχή κόκκων μεγέθους D και γιατί η διάμετρος πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση με 3D Στο ASTM d-75 δίνεται ως ελάχιστη διάμετρος 30 mm αλλά αυτό πρέπει να αφορά λεπτόκοκκα αδρανή

κοκκομετρική ανάλυση των αδρανών απαιτούνται τα βάρη που δίνονται στον Πίνακα 2.1 σύμφωνα με το Πρότυπο ΕΛΟΤ EN 933-1:

Από το αρχικό δείγμα που ληφθηκε στην πηγή παραγωγής λαμβάνονται τα μικρότερα δείγματα που χρειάζονται για τις διάφορες δοκιμές με την μέθοδο του **τετραμερισμού** ή με τη βοήθεια των **δοχείων διαχωρισμού** ανάλογα με την μέγιστη διάσταση του αδρανούς. Κατά τις εργασίες αυτές θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ότι η άμμος θα πρέπει να είναι ελαφρώς υγρή για να αποφεύγεται ο διαχωρισμός (απόμιξη) που δεν διακρίνεται εύκολα στα μεγέθη αυτά των κόκκων.

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.1: Ελάχιστα απαιτούμενα βάρη για τη δοκιμή κοκκομετρικής ανάλυσης

| Μέγιστος κόκκος<br>D [mm] | Μάζα<br>kg |
|---------------------------|------------|
| 63                        | 40         |
| 32                        | 10         |
| 16                        | 2.6        |
| 8                         | 0.6        |
| ≤4                        | 0.2        |

## 2.2 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

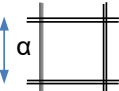
Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό την επιρροή των αδρανών στις ιδιότητες του νωπού και του σκληρυμένου σκυροδέματος διότι επηρεάζουν άμεσα την εργασιμότητα και την διαμόρφωση του "σκελετού" του σκυροδέματος.

### 2.2.1 Μέγεθος

Τα αδρανή σπανίως υπάρχουν υπό μορφή κόκκων του ίδιου μεγέθους. Συνήθως υπάρχουν με ποικιλία μεγεθών κόκκων που προσδιορίζονται με κοσκίνισμα από κόσκινα με διάφορα ανοίγματα οπών, βλ Σχ. 2.2. Τα αδρανή χαρακτηρίζονται από απόψεως μεγέθους με τον συμβολισμό  $d/D$ , όπου:

- $d$  είναι το μικρότερο άνοιγμα κόσκινου τετραγωνικής οπής στο οποίο το διερχόμενο ποσοστό δεν υπερβαίνει ένα όριο  $p_1$  ( $p_1=20\%$  και σε ορισμένες περιπτώσεις  $p_1=15\%$ )
- $D$  το μεγαλύτερο άνοιγμα κόσκινου στο οποίο το διερχόμενο ποσοστό δεν είναι μικρότερο από  $p_2\%$  ( $p_2=85\%$  και σε ορισμένες περιπτώσεις  $p_2=90\%$ ).

**ΚΟΣΚΙΝΑ**



Στο Πρότυπο ΕΛΟΤ EN 12620 «Αδρανή για Σκυρόδεμα» υιοθετούνται τα κόσκινα **ISO 565**. Είναι κόσκινα τετραγωνικής οπής με συρμάτινο μεταλλικό πλέγμα για άνοιγμα  $\alpha < 4$  mm και διάτρητη μεταλλική πλάκα για  $\alpha \geq 4$  mm σύμφωνα με ISO 1330-1 και 2.

Για τον προσδιορισμό της κοκκοδιαβάθμισης των αδρανών χρησιμοποιούνται τα ακόλουθα κόσκινα καθώς και όποιο πρόσθετο άλλο κόσκινο κρίνεται αναγκαίο:

| Άνοιγμα τετραγωνικής οπής σε mm |       |       |       |   |   |   |   |    |      |    |  |
|---------------------------------|-------|-------|-------|---|---|---|---|----|------|----|--|
| 0.063                           | 0.125 | 0.250 | 0.500 | 1 | 2 | 4 | 8 | 16 | 31.5 | 63 |  |

Αμερικανικά πρότυπα κόσκινα **ASTM E-1 & E-11**

| άνοιγμα τετραγωνικής οπής σε ιντσες |    |     |      |     | No =αριθμός οπών ανά ίντσα |      |      |      |      |       |       |  |
|-------------------------------------|----|-----|------|-----|----------------------------|------|------|------|------|-------|-------|--|
| 1 1/2                               | 1  | 3/4 | 1/2  | 3/8 | No4                        | No8  | No16 | No30 | No50 | no100 | No200 |  |
| άνοιγμα τετραγωνικής οπής σε mm     |    |     |      |     |                            |      |      |      |      |       |       |  |
| 37.5                                | 25 | 19  | 12.5 | 9.5 | 4.75                       | 2.36 | 1.18 | 0.6  | 0.3  | 0.15  | 0.075 |  |

Σχ 2:2 Βασικά χαρακτηριστικά κοσκίνων

Σε αντίθεση με την επικρατούσα στη χώρα μας πρακτική κατά την οποία τα αδρανή διακρίνονται από απόψεως μεγέθους σε τρία κλάσματα : άμμος 0/5, γαρμπίλι 5/16 ή 18 και χαλίκι/σκύρα 16/31.5 ή 16/42, στο Πρότυπο ΕΛΟΤ EN 12620 τα αδρανή χαρακτηρίζονται σε δύο κατηγορίες λεπτόκοκκα και χονδρόκοκκα :

- Λεπτόκοκκα όταν το  $D \leq 4$  mm Συμβολίζονται με  $G_F$
- Χονδρόκοκκα όταν  $D \geq 4$  mm  $d \geq 2$  mm Συμβολίζονται με  $G_c$

Άλλες κατηγορίες αδρανών που προβλέπονται στο Πρότυπο EN 12620 (αλλά δεν είναι σε χρήση ακόμη στη χώρα μας) είναι:

- Πλήρους διαβάθμισης Συμβολίζεται με  $G_A$   
(όταν αποτελούνται από μίγμα χονδρόκοκκων και λεπτόκοκκων αδρανών)
- 1. Φυσικό/ συλλεκτό αδρανές 0/8 Συμβολίζεται με  $G_{NG}$

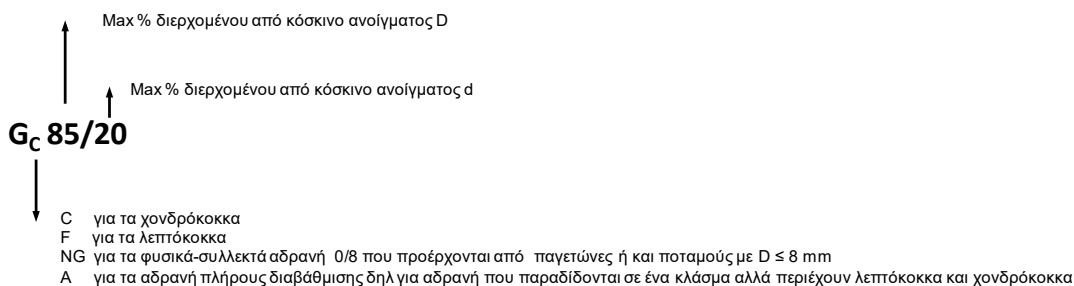
Περισσότερες λεπτομέρειες παρέχονται στον Πίνακα 2.2 οι δε αρχές κατάταξης σε κατηγορία (συμβολισμό) δίνονται στο Σχ 2.3

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.2: Χαρακτηρισμός αδρανών από απόψεως μεγέθους και σχετικές απαιτήσεις (Επεξεργασία μέρους του Πίνακα 2 ΕΛΟΤ EN 12620)

| Μέγεθος αδρανούς        | Χονδρόκοκκο                                 |                             | Λεπτόκοκκο              |
|-------------------------|---|-----------------------------|-------------------------|
|                         | $D/d \leq 2$ ή $D \leq 11.2$ mm             | $D/d > 2$ και $D > 11.2$ mm | $D \leq 4$ mm και $d=0$ |
| Άνοιγμα κοσκίνου        | διερχόμενο ποσοστό κατά μάζα                |                             |                         |
| 2D*                     | 100   | 100                         | 100                     |
| 1.4D*                   | 98 έως 100                                  | 98 έως 100                  | 95 έως 100              |
| D                       | 85 έως 99**<br>ή 80 έως 99**                | 90 έως 99**                 | 85 'εως 99              |
| d                       | 0 έως 20                                    | 0 έως 15                    |                         |
| d/2*                    | 0 έως 5                                     | 0 έως 5                     |                         |
| Κατηγορία (συμβολισμός) | G <sub>C</sub> 85/20 ή G <sub>C</sub> 80/20 | G <sub>C</sub> 90/15        | G <sub>F</sub> 85       |

\* Αν με τον υπολογισμό προκύπτει άνοιγμα κοσκίνου που δεν αντιστοιχεί με τη σειρά ISO 565.1990 R 20 τότε χρησιμοποιείται το αμέσως εγγύτερο μέγεθος κοσκίνου ISO

\*\*Το διερχόμενο ποσοστό μπορεί να είναι μεγαλύτερο από 99% υπό ορισμένες προϋποθέσεις, βλ EN 12620.



Σχ 2.3 : Βασικές αρχές κατάταξης αδρανών σε Κατηγορίες (συμβολισμός)

Ο "ονομαστικός" ελάχιστος και "ονομαστικός" μέγιστος κόκκος αδρανούς δεν ισούται επομένως με το άνοιγμα του κοσκίνου στο οποίο συγκρατείται (ελάχιστος κόκκος) ή διέρχεται (μέγιστος κόκκος) το 100% του υλικού αλλά επιτρέπεται για πρακτικούς λόγους ένα σχετικά μικρό ποσοστό να είναι μικρότερο από το d (υποδιάστατο<sup>5</sup> ποσοστό) και αντίστοιχα να είναι μεγαλύτερο από D<sup>6</sup> (υπερδιάστατο ποσοστό). Ένα αδρανές που χαρακτηρίζεται από απόψεως μεγέθους πχ 8/11.2 περιέχει κόκκους μικρότερους από 8mm σε ποσοστό μέχρι 20% και κόκκους μεγαλύτερους των 11.2mm σε ποσοστό που δεν υπερβαίνει το 15% ή 20% (85% διερχόμενο) και συμβολίζεται G<sub>C</sub> 85/20 ή G<sub>C</sub> 80/20

<sup>5</sup> Όρος προτάθηκε από Π.Κουφόπουλο και υιοθετήθηκε στον ΚΤΣ 2016

<sup>6</sup> Εφιστάται η προσοχή ότι δεν συμπίπτει ο ορισμός του μέγιστου κόκκου σε όλα τα Πρότυπα . Στο ASTM C125 ορίζεται ως μέγιστος κόκκος το άνοιγμα του κοσκίνου από το οποίο το διερχόμενο ποσοστό είναι 100% ενώ αυτό δεν υιοθετείται από το Ευρωπαϊκό Πρότυπο ούτε από τα αντίστοιχα Πρότυπα του Καναδά και της Ν. Αφρικής και τις οδηγίες ACI

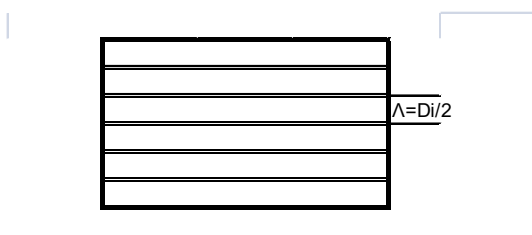
Σημειώνεται ότι η ελάχιστη διάσταση δοκιμίου για τον προσδιορισμό των μηχανικών χαρακτηριστικών του σκυροδέματος πρέπει να είναι μεγαλύτερη από τη μέγιστη ονομαστική διάσταση αδρανούς του εξεταζόμενου σκυροδέματος κατά 3.5 φορές σύμφωνα με το Πρότυπο ΕΛΟΤ EN12390-1 2000 (§ 4.1) και 3 φορές σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C 192- 90 (§5.4).

## 2.2.2 Μορφή

Αν **a**, **b**, **c** είναι η μέγιστη, η ενδιάμεση και η μικρότερη διάσταση ενός κόκκου αντίστοιχα, τότε ο λόγος της μικρότερης διάστασης **c** προς την ενδιάμεση **c/b** δείχνει πόσο πεπλατυσμένος-πλακοειδής είναι ο κόκκος και ο λόγος της ελάχιστης διάστασης προς την μέγιστη **c/a** δείχνει πόσο επιμήκης (λυγερός) είναι ο κόκκος. Επειδή δεν είναι πρακτικά δυνατόν να γίνουν μετρήσεις τέτοιου είδους που να περιλαμβάνουν κάθε ένα κόκκο σε όλο το εύρος των διαστάσεων των χονδρόκοκκων υλικών για τον λόγο αυτό στα Πρότυπα ΕΛΟΤ EN 933-3 και 933-4 προδιαγράφονται δύο δοκιμές με τις οποίες προσδιορίζονται από ένα δείγμα χονδρόκοκκων αδρανών(80/4) με αρκετό εύρος διαστάσεων δύο δείκτες ανάλογοι προς τα προαναφερθέντα μεγέθη ο **δείκτης πλακοειδούς (FI)** και ο **δείκτης μορφής (SI)**.

Στη μέτρηση του δείκτη πλακοειδούς γίνονται δύο ειδών κοσκινίσματα. Στο πρώτο χωρίζεται το δείγμα του υλικού σε κλάσματα με άνοιγμα οπής μέγιστου κοσκίνου και ελάχιστου κοσκίνου που διαφέρει πολύ λίγο δηλ χρησιμοποιούνται τα ακόλουθα ζεύγη κόσκινων: 63/80, 50/63, 40/50, 31.5/40, 25/31.5, 20/25, 16/20 1.5/16, 10/12.5, 8/10, 6.3/8 5/6.3 4/5. Τα κλάσματα του αδρανούς που προκύπτουν είναι πρακτικά σχεδόν ισόκοκκα.

Στο δεύτερο κοσκίνισμα κάθε κλάσμα κοσκινίζεται από ειδικά κόσκινα τα οποία έχουν αντί τετραγωνικών οπών ορθογώνια επιμήκη ανοίγματα βλ Σχ. 2. 4 όπου η μικρή διάσταση του ορθογωνίου ανοίγματος  $\Lambda$  καθορίζεται για κάθε κλάσμα στο μισό του μεγαλύτερου ανοίγματος πχ για το κλάσμα 40/50  $\Lambda=25\text{mm}$



Σχ. 2.4: Ειδικά κόσκινα για τη μέτρηση του δείκτη πλακοειδούς

Ο επιμέρους δείκτης πλακοειδούς ενός κλάσματος είναι το ποσοστό κ.μ του διερχομένου από το κόσκινο με τα επιμήκη ανοίγματα που αντιστοιχεί στο κλάσμα αυτό και ο συνολικός δείκτης πλακοειδούς του μίγματος των αδρανών είναι το άθροισμα των ποσοστών των διερχομένων από τα αντίστοιχα ειδικά κόσκινα δηλ είναι η συνολική ξηρή μάζα που διήλθε από τα ειδικά κόσκινα ανηγμένη ως ποσοστό % της συνολικής ξηρής μάζας του δείγματος. Επομένως ο δείκτης πλακοειδούς παρέχει μία ένδειξη του ποσοστού των κόκκων με πλακοειδές σχήμα στο σύνολο των αδρανών



Ο δείκτης μορφής (SI) δείχνει το ποσοστό των κόκκων που έχουν επίμηκες σχήμα με λόγο  $\frac{\max \text{διάσταση (μήκος)}}{\min \text{διάσταση (πάχος)}} > 3$

Τα δύο αυτά μεγέθη, που χαρακτηρίζουν το σχήμα των κόκκων των αδρανών, επηρεάζουν την εργασιμότητα των μιγμάτων του σκυροδέματος και γι'αυτό στις προδιαγραφές τίθενται συνήθως όρια για να διευκολύνουν την σύνθεση του σκυροδέματος Στον ΚΤΣ2016 ο δείκτης πλακοειδούς (FI) δεν πρέπει να υπερβαίνει το 35%.

### 2.2.3 Ειδική επιφάνεια – Δείκτης σφαιρικότητας - Δείκτης γωνιώδους

Τα αδρανή συμμετέχουν στη διαμόρφωση της μάζας του σκυροδέματος με τον όγκο τους ( τις διαστάσεις των) που επηρεάζει τον σχηματισμό του σκελετού των αδρανών μέσα στο σκυρόδεμα αλλά και με την επιφάνειά τους δεδομένου ότι η επιφάνεια καθορίζει την ποσότητα του τσιμεντοπολτού που θα τα περιβάλει. Η σχέση επομένως της συνολικής επιφάνειας των κόκκων ανά μονάδα όγκου ή πρακτικότερα ανά μονάδα μάζας είναι ένα σημαντικό μέγεθος και ονομάζεται **ειδική επιφάνεια** και εκφράζεται συνήθως σε  $m^{-1}$  (ειδική επιφάνεια κατ'όγκο  $m^2/m^3$ ) ή σε  $cm^2/gr$   $m^2/kg$  (ειδική επιφάνεια κατά μάζα)

Στο Σχ. 2.5 παρουσιάζεται με απλά γεωμετρικά σχήματα η επίδραση του μεγέθους και της μορφής των κόκκων των αδρανών στην ειδική επιφάνειά τους. Συγκρίνεται ο όγκος, η επιφάνεια και η ειδική επιφάνεια αδρανούς μορφής κύβου ακμής 2 cm με 8 κυβικά αδρανή ακμής 1cm που συνολικά έχουν τον ίδιο όγκο με τον κύβο ακμής 2 cm και με ένα αδρανές μορφής επιμήκους πλακοειδούς ορθογώνιου παραλληλεπίπεδου που και αυτό έχει τον ίδιο όγκο. Παρατηρείται ότι διατηρώντας το ίδιο σχήμα κόκκου (κυβικό) και μειώνοντας την διάσταση του κόκκου στο  $\frac{1}{2}$  του αρχικού η ειδική επιφάνεια διπλασιάζεται, ενώ μεταβάλλοντας την μορφή του κόκκου η ειδική επιφάνεια είναι λίγο μικρότερη από διπλάσια.

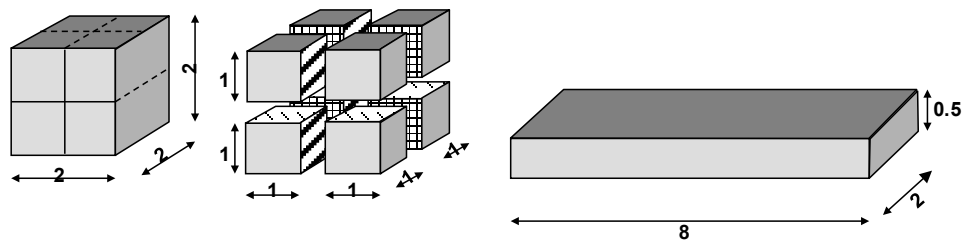
Θεωρώντας σαν μία πρώτη προσέγγιση ότι οι κόκκοι έχουν σφαιρικό ή κυβικό σχήμα με ακτίνα ή ακμή d ή οι κόκκοι έχουν τη μορφή ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου με ακμές d 2d και 3d τότε η ειδική επιφάνεια (κατ'όγκο) υπολογίζεται για

$$\text{Τη σφαίρα} \quad S = E/V = \pi d^2 / \pi d^3 / 6 = 6/d$$

$$\text{Τον κύβο} \quad S = E/V = 6d^2 / d^3 = 6/d$$

$$\text{Παραλληλεπίπεδο} \quad S = E/V = 22d^2 / 6d^3 = 3.667 / d \quad (\text{διαστάσεις πρίσματος } d, 2d, 3d)$$

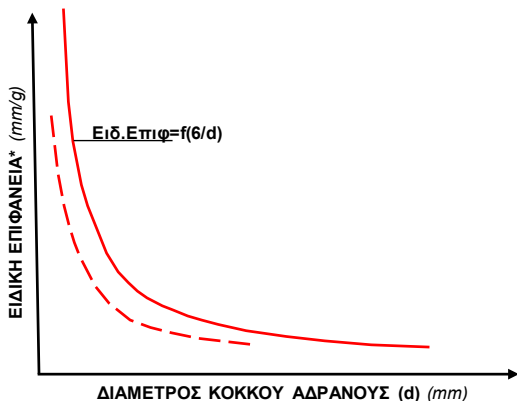
ΕΠΙΡΡΟΗ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΚΑΙ ΜΟΡΦΗΣ ΑΔΡΑΝΩΝ



|            | 1 ΚΥΒΟΣ  | 8 ΚΥΒΟΙ  | 1 ΕΠΙΜΗΚΕΣ - ΠΛΑΟΕΙΔΕΣ ΟΡΘΟΓΩΝΙΟ                              |
|------------|--|--|---|
| V          | 2 cm x 2 cm x 2 cm = 8 cm <sup>3</sup>                       | 1 cm x 1 cm x 1 cm x 8 = 8 cm <sup>3</sup>                 | 8 cm x 2 cm x 0,5 cm x 8 = 8 cm <sup>3</sup>                  |
| E          | 2 cm x 2 cm x 6 = 24 cm <sup>2</sup>                         | 1 cm x 1 cm x 6 x 8 x = 48 cm <sup>2</sup>                 | [2cmx0.5cm+ 8 cm x 2 cm + 0.5 x 2] x 2 = 42 cm <sup>2</sup>   |
| E/V<br>κ.ο | 24 cm <sup>2</sup> /cm <sup>3</sup> x 8 = 3 cm <sup>-1</sup> | 48 cm <sup>2</sup> /8 cm <sup>3</sup> = 6 cm <sup>-1</sup> | 42 cm <sup>2</sup> / 8cm <sup>3</sup> = 5.25 cm <sup>-1</sup> |

Σχ. 2.5: Επίδραση του μεγέθους των κόκκων των αδρανών και της μορφής των αδρανών στην ειδική επιφάνειά τους

Γενικά η ειδική επιφάνεια είναι συνάρτηση του k/d όπου k είναι ένας συντελεστής που εξαρτάται από το σχήμα και d είναι η ονομαστική διάσταση του κόκκου. Για τον λόγο αυτό αυξάνει σημαντικά με τη μείωση του μεγέθους του κόκκου βλ Σχ 6 αλλά και με την μεταβολή του σχήματος/μορφής του κόκκου



Σχ. 2.6: Μεταβολή της ειδικής επιφάνειας με τη μεταβολή του μεγέθους του κόκκου

Η μέτρηση της ειδικής επιφάνειας είναι ιδιαίτερα δύσκολη διότι προσκρούει στις δυσκολίες μέτρησης της επιφάνειας των κόκκων που α) έχουν μεγάλο αριθμό και ποικιλία μεγεθών και β) δεν έχουν κανονική γεωμετρική μορφή με μη επίπεδες και συχνά ανώμαλες γωνιώδεις επιφάνειες. Για τους λόγους αυτούς η μέτρηση της επιφάνειας γίνεται έμμεσα με μέτρηση της **διαπερατότητας** σε ένα δοκίμιο αδρανών που έχει συμπυκνωθεί κατά τυποποιημένο τρόπο (με την προϋπόθεση ότι τα αδρανή έχουν σφαιρικό σχήμα) ή με μέτρηση **προσρόφησης αερίων**. Οι μετρήσεις γενικά

της ειδικής επιφάνειας δίνουν στην πραγματικότητα μία κατά προσέγγιση τιμή της πραγματικής και εξαρτώνται σε πολύ μεγάλο βαθμό από την μέθοδο μέτρησης. Για τον λόγο αυτό είναι απαραίτητο να αναφέρεται πάντοτε η μέθοδος μέτρησης (πχ Blaine, Wagner, BET).

Η μέτρηση της ειδικής επιφάνειας χρησιμοποιείται σαν κανονική μέτρηση ρουτίνας για τον έλεγχο της λεπτότητας του τσιμέντου (βλ Κεφ 2), των λεπτόκοκκων πληρωτικών υλικών (φίλερς) , των λεπτοτόκοκκων υλικών με συγκολλητική δράση (πχ ποζολάνες, πυριπική παιπάλη).

Το θέμα της μορφής των κόκκων των αδρανών αντιμετωπίζεται θεωρητικά με δύο δείκτες τον δείκτη σφαιρικότητας και τον δείκτη γωνιώδους ως ακολούθως:

Αν θεωρηθεί η διάμετρος "ισοδύναμης σφαίρας" η οποία έχει:

- Την ίδια επιφάνεια  $E$  με τον κόκκο  $d_E = (E/\pi)^{0.5}$  ή
- Τον ίδιο όγκο  $V$  με τον κόκκο  $d_V = (6V/\pi)^{1/3}$

τότε,

ο λόγος  $\psi = \frac{d_V}{d_E}$  ονομάζεται **δείκτης σφαιρικότητας** και

ο λόγος  $\frac{1}{\psi} = \frac{d_E}{d_V}$  ονομάζεται **δείκτης γωνιώδους**

Για σφαιρική μορφή κόκκου  $\psi = 1/\psi = 1$

Για τετραγωνική μορφή κόκκου ακμής  $a$

$$\frac{1}{\psi} = \frac{d_E}{d_V} = \frac{\sqrt{\frac{6a^2}{\pi}}}{\sqrt[3]{\frac{6a^3}{\pi}}} = 1.11 \quad \text{και}$$

Για πρισματική μορφή κόκκου διαστάσεων  $a, 2a, 3a$

$$E = 2*[2a*3a+a*2a+a*3a]=22a^2 \quad d_E = (22a^2/\pi)^{0.5}$$

$$V = a*2a*3a=6a^3 \quad d_V = (6*6a^3 / \pi)^{1/3}$$

οπότε

$$\frac{1}{\psi} = \frac{d_E}{d_V} = \frac{\sqrt{\frac{22a^2}{\pi}}}{\sqrt[3]{\frac{36a^3}{\pi}}} = 1.175$$

Επομένως ο δείκτης γωνιώδους αυξάνει όσο η μορφή του κόκκου απομακρύνεται από την συμμετρική μορφή της σφαίρας .

Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι ενώ θεωρητικές προσεγγίσεις μπορούν να αναπτυχθούν για την εκτίμηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των κόκκων εντούτοις, προσκρούουν στις πραγματικές δυσκολίες που υπάρχουν στην μέτρηση της επιφάνειας των . Τις δυσκολίες αυτές μπορούν να παρακάμψουν μέθοδοι

φωτογραφικής απεικόνισης και ανάλυσης μέσω κατάλληλων λογισμικών που αναπτύσσονται πρόσφατα.

Η γενική αρχή που ακολουθείται από τις μεθόδους αυτές είναι ότι τα χαρακτηριστικά τα οποία μπορούν να περιγράψουν γεωμετρικά ένα κόκκο αδρανούς είναι τρία : η **μορφή** , το **γωνιώδες** και η **τραχύτητα** της επιφάνειας βλ Σχ. 2. 7.



Σχ. 2.7: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά κόκκου αδρανών

Η μορφή εξαρτάται από τις διαστάσεις του κόκκου και τις μεταξύ τους σχέσεις (βλ παρ 4.1.2), το γωνιώδες αφορά μικρότερη κλίμακα και έχει σχέση με τις μεταβολές από την ομαλότητα του σχήματος με τις ανωμαλίες αυτές να μπορούν να θεωρηθούν ότι συμπληρώνουν σε λεπτομέρειες το βασικό σχήμα του κόκκου, ενώ η τραχύτητα αφορά ακόμη μικρότερη κλίμακα και έχει σχέση με τις μικροανωμαλίες που παρουσιάζει η επιφάνεια που δεν επηρεάζουν τα άλλα δύο χαρακτηριστικά. Τα τρία αυτά χαρακτηριστικά είναι ανεξάρτητα το ένα από το άλλο. Με βάση αυτή την κατάταξη έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι φωτογραφικής απεικόνισης και ανάλυσης που κατηγοριοποιούν τους κόκκους αλλά ακόμη δεν έχουν γίνει επίσημα πρότυπα. Προς το παρόν οι τυποποιημένες μέθοδοι αφορούν τη μέτρηση του δείκτη πλακοειδούς EN 933-3, τη μέτρηση του δείκτη μορφής EN 933-4 και τη μέτρηση του γωνιώδους ( ASTM C1252, AASHTO T 304 & TP56). Η μέτρηση του γωνιώδους γίνεται έμμεσα και προσεγγιστικά με τη μέτρηση των κενών σε ένα γνωστού όγκου σωρό αδρανών που έχει συμπυκνωθεί κατά τυποποιημένο τρόπο. Όσο μεγαλύτερα είναι τα κενά τόσο των γωνιώδους είναι μεγαλύτερο. Είναι φανερό ότι η μέθοδος αυτή δεν είναι ακριβής.

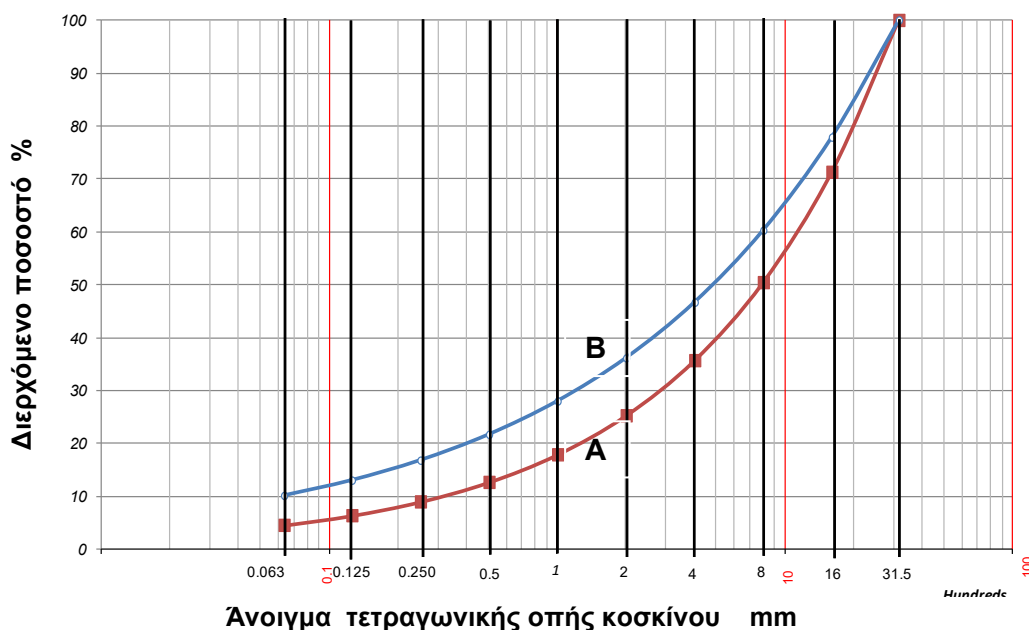
#### 2.2.4 Κοκκοδιαβάθμιση - Κοκκομετρική διαβάθμιση

Κοκκοδιαβάθμιση είναι ο ποσοτικός διαχωρισμός ενός δείγματος αδρανούς σε επιμέρους κλάσματα διαφορετικού μεγέθους κόκκων μέσω κοσκίνισματος με κόσκινα διαφορετικού ανοίγματος οπής. Τα κόσκινα τοποθετούνται το ένα πάνω στο άλλο κατά σειρά αυξανόμενου ανοίγματος ενώ στον πυθμένα της σειράς των κοσκίνων τοποθετείται κατάλληλο δοχείο για τη συλλογή του διερχόμενου υλικού από το λεπτότερο κόσκινο. Αντιπροσωπευτικό δείγμα του αδρανούς τοποθετείται στο κορυφαίο κόσκινο με το μεγαλύτερο άνοιγμα οπής και όλη σειρά των κοσκίνων τίθεται σε δόνηση που ενίοτε συνοδεύεται με ελαφρές κρούσεις και αργή περιστροφική κίνηση με ελαφρώς κεκλιμένα κόσκινα. Μετά το πέρας του κοσκινίσματος ζυγίζονται τα υλικά που έχουν συγκρατηθεί στα διάφορα κόσκινα (Πίνακας 2.2, στήλη 2) και στο δοχείο του πυθμένα και ανάγονται σε % συγκρατούμενο ή διερχόμενο κλάσμα επί του συνολικού βάρους /μάζας του δείγματος αθροιστικά, βλ Πίνακα 2.2, στήλη 4) .

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.2: Αποτελέσματα κοκκομετρικής ανάλυσης.

| Άνοιγμα κοσκίνου mm | Συγκρατούμενο g | Διερχόμενο g | Διερχόμενο % |
|---------------------|-----------------|--------------|--------------|
| 1                   | 2               | 3            | 4            |
| 31.5                | 0               | 10000        | 100          |
| 16                  | 2873            | 7127         | 71           |
| 8                   | 2088            | 5039         | 50           |
| 4                   | 1476            | 3563         | 36           |
| 2                   | 1043            | 2520         | 25           |
| 1                   | 738             | 1782         | 18           |
| 0.5                 | 522             | 1260         | 13           |
| 0.25                | 369             | 891          | 9            |
| 0.125               | 261             | 630          | 6            |
| 0.063               | 183             | 447          | 4            |
| Δοχείο              | 447             |              |              |
| Σύνολο              | 10000           |              |              |

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται υπό μορφή πίνακος (Πίνακας 2.2) ή διαγράμματος (βλ Σχ 2.8) στο οποίο στον οριζόντιο άξονα παρουσιάζονται τα ανοίγματα των τετραγωνικών οπών των κοσκίνων σε λογαριθμική κλίμακα (συνήθως) και στον κατακόρυφο άξονα τα αθροιστικά ποσοστά των διερχομένων σε αριθμητική κλίμακα .



Σχ. 2.8 : Παρουσίαση κοκκομετρικής διαβάθμισης αδρανών. Καμπύλη A (κάτω) σημεία της στήλης 4 του Πίνακα 2.2 ,ακολουθείται η σχέση Fuller  $p=(d/D)^{0.5}$  . Καμπύλη B (άνω) ακολουθείται η σχέση Fuller με εκθέτη 0.37  $p=(d/D)^{0.37}$

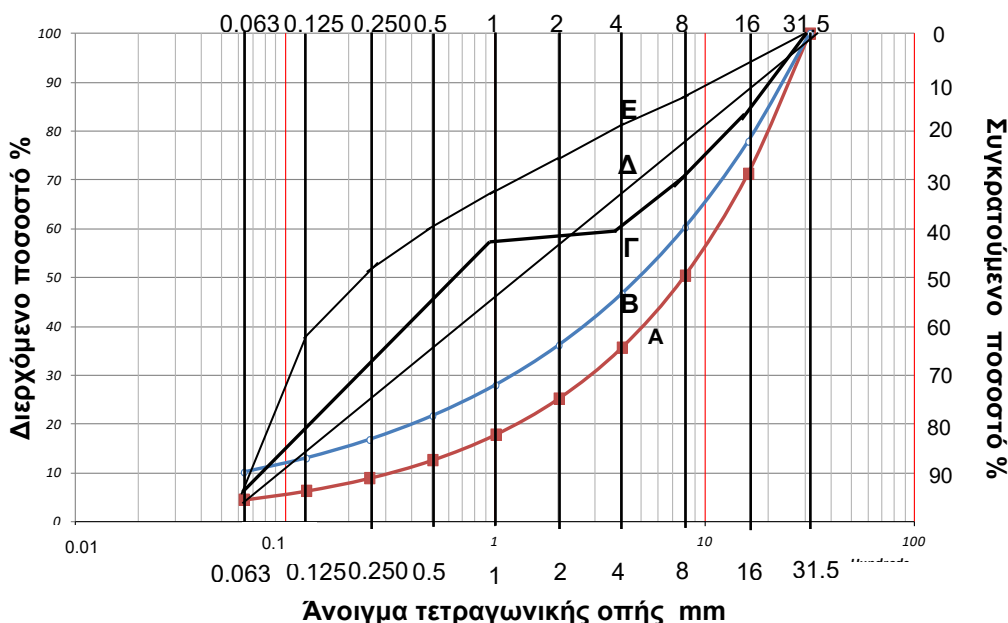
Επειδή η πρότυπη σειρά κοσκίνων ΕΛΟΤ EN12620 έχει διαδοχικά ανοίγματα  $d_i, d_{i-1}$  (βλ Σχ. 2.1) με λόγο  $d_i / d_{i-1} = 2$  τα κόσκινα παρουσιάζονται στην λογαριθμική κλίμακα σε ισαπέχοντα σημεία.

Επειδή οι πολύ λεπτοί κόκκοι (πχ <math><0.075\text{ m}</math> ή <math>0.063\text{m}</math>) συχνά δημιουργούν συσσωματώματα τα οποία δρουν κατά το κοσκίνισμα σαν ξεχωριστοί κόκκοι και επίσης επειδή μπορεί να φράξουν τα ανοίγματα του κόσκινου είναι απαραίτητο σε πολλές περιπτώσεις το κοσκίνισμα να γίνεται αρχικά με παρουσία νερού δηλ με πλύσιμο και στη συνέχεια με κοσκίνισμα με ξηρό υλικό, όπως προβλέπεται από το Πρότυπο ΕΛΟΤ EN 933-1.

Το κλάσμα που διέρχεται από το κόσκίνο <math>0.063\text{mm}</math> (Αμερικανική πρακτική <math><0.075\text{ #200}</math>) ονομάζεται **παιπάλη** και λόγω της δραστικότητάς του, που οφείλεται πρωτίστως στο πολύ μικρό μέγεθός του, υπόκειται σε ορισμένους περιορισμούς

Στο Σχ. 2.9 παρουσιάζονται διάφορα είδη κοκκομετρικών καμπυλών. Είναι φανερό ότι μεγάλη κλίση κλάδο κοκκομετρικής καμπύλης σημαίνει μεγάλη περιεκτικότητα σε κόκκους που οριοθετούν το τμήμα αυτό (Από <math>31.5\text{mm}</math> σε <math>16\text{mm}</math>: Καμπύλη Α μεγάλη κλίση συγκρατούμενο 30%. Καμπύλη Ε μικρή κλίση συγκρατούμενο 5%). Μικρή κλίση σημαίνει μικρή περιεκτικότητα σε κόκκους που οριοθετούν το τμήμα (Καμπύλη Γ <math>4\text{mm}</math> έως <math>1\text{mm}</math> συγκρατούμενο ~1%). Η καμπύλη Γ με σχεδόν οριζόντιο τμήμα λέγεται **ασυνεχής** γιατί λείπουν οι κόκκοι που οριοθετούν το οριζόντιο τμήμα από <math>1\text{ mm}</math> έως <math>4\text{mm}</math>. Οι καμπύλες Α,Β,Δ Ε λέγονται **συνεχείς** διότι σε κάθε τμήμα τους δεν έχουν ασήμαντο ποσοστό κόκκων. Στις καμπύλες Α και Β το ποσοστό σε κάθε κλάσμα βαίνει ελαττούμενο από τα χονδρότερα στα λεπτότερα κλάσματα (κοίλα προς τα άνω). Στην Καμπύλη Δ το ποσοστό από το ένα στο άλλο κλάσμα είναι σταθερά το ίδιο (ευθεία γραμμή), ενώ στη Δ το ποσοστό βαίνει αυξανόμενο από τα χοντρά στα λεπτά κλάσματα (κοίλα προς τα κάτω).

Η θέση της καμπύλης προσδιορίζει και το αν το υλικό είναι χονδρόκοκκο (θέση χαμηλά) ή είναι λεπτόκοκκο (θέση υψηλότερα) .



Σχ. 2.9: Διάφορα είδη κοκκομετρικών καμπυλών

Σημειώνεται ότι κανονικά η κοκκομετρική διαβάθμιση πρέπει να αναφέρεται σε **ποσοστά κατ'όγκο** των υλικών και όχι κατά μάζα/βάρους διότι οι κόκκοι μετέχουν στο

μίγμα με τον όγκο τους και όχι με τη μάζα τους. Στις συνήθεις περιπτώσεις τα υλικά έχουν την ίδια πυκνότητα και επομένως δεν υπάρχει διαφορά αλλά αν πρόκειται για μίγμα υλικών με διαφορετική πυκνότητα η διαβάθμιση πρέπει να δίνεται κατ'όγκο.

### Δείκτες αριθμητικού χαρακτηρισμού της διαβάθμισης

Με τον όρο αυτό νοούνται οι διάφοροι δείκτες που έχουν προταθεί σε μία προσπάθεια να χαρακτηριστεί μία διαβάθμιση με έναν αριθμό όπως είναι

- a) η μέση διάσταση,
- b) το μέτρο λεπτότητας και
- c) η ειδική επιφάνεια

Αν θεωρηθεί ότι η **μέση διάσταση κόκκου** ενός υλικού ισούται με εκείνο το άνοιγμα του κόσκινου από το οποίο διέρχεται το 50% του υλικού, τότε η μέση διάσταση κόκκου των υλικών του σχήματος 2.9 είναι:

E: 0.25 mm   Δ: 0.7 mm   Γ: 0.65 mm   Β: 5 mm   Α: 8 mm

Το θέμα της μέσης διάστασης κόκκου ενός κοκκώδους υλικού με μεγάλη ποικιλία διαστάσεων κόκκων αποτελεί ακόμη αντικείμενο μελέτης και συζητήσεων. Έχουν προταθεί διάφορα είδη μέσης διάστασης κόκκων όπως **αριθμητική**  $\bar{d}_a = (1/2(d_i+d_{i+1}))$ , **γεωμετρική**  $\bar{d}_g = (d_i \cdot d_{i+1})^{0.5}$ , **αρμονική**<sup>7</sup>  $d_h = 2d_i \cdot d_{i+1} / (d_i + d_{i+1})$ , **λογαριθμική** μέση τιμή  $(0.5 \cdot (\log(d_i + d_{i+1})))$ . Επίσης χρησιμοποιείται και η μέση τιμή με βάση τον όγκο ή την ειδική επιφάνεια με θεώρηση ότι οι κόκκοι μπορούν να θεωρηθούν ότι κατά προσέγγιση έχουν σφαιρικό σχήμα. Η μέση διάσταση αποτελεί ένα ενδιαφέροντα "δείκτη" για το κοκκώδες υλικό έστω και αν δεν δίνει όλες τις πληροφορίες σχετικά με την κατανομή των κόκκων μέσα στο υλικό και ότι την ίδια μέση διάσταση μπορεί να έχουν διάφορες διαβαθμίσεις. Το ενδιαφέρον αφορά το πρόβλημα της βέλτιστης σύνθεσης διαφορετικών υλικών με διαφορετικά μεγέθη (σκύρα, γαρπμίλι, άμμος, τσιμέντο, πρόσμικτα) με μέση διάσταση κάθε επιμέρους υλικού σημαντικά διαφορετική.

Στον Πίνακα 2.3 παρουσιάζεται ο υπολογισμός της Μέσης Αριθμητικής Διάστασης κόκκου της διαβάθμισης Α των σχημάτων 8 & 9 η οποία ακολουθεί την σχέση Fuller με εκθέτη 0.5. Για κάθε κλάσμα αδρανούς  $d_i$ ,  $d_{i+1}$  υπολογίζεται το μέσο αριθμητικό άνοιγμα  $\bar{d}_a = (d_i + d_{i+1})/2$  (στήλη [5]) και η συμβολή του ποσοστού που συγκρατείται σε κάθε κλάσμα στον υπολογισμό της μέσης τιμής (στήλη [7]). Η μέση τιμή είναι το άθροισμα των επιμέρους συμβολών κάθε κλάσματος 10.697 mm. Σημειώνεται ότι θα ήταν σοβαρό λάθος ο υπολογισμός να γίνει με βάση τον μέσο όρο των αριθμητικών μέσων τιμών ανοίγματος κάθε κλάσματος (μέσος όρος των τιμών της στήλης [5], διαγεγραμμένη τιμή 5.295) διότι δεν λαμβάνεται υπόψη η ποσότητα του υλικού που υπάρχει σε κάθε κλάσμα. Η θεωρητική τιμή της μέσης αριθμητικής διάστασης για την περίπτωση διαβάθμισης Fuller με εκθέτη 0.5 είναι κατά τον Poronics ίση με  $D/3 = 10.5$  mm. Σημειώνεται επίσης ότι η Μέση Αριθμητική Διάσταση κόκκου των διαβαθμίσεων Β και Ε είναι αντίστοιχα: 8.709 mm και 2.562 mm.

<sup>7</sup> Υπενθυμίζεται ότι η αρμονική μέση τιμή "n" τιμών  $x_1, x_2, \dots, x_n$  δίνεται από τη σχέση 
$$h = \frac{1}{\frac{1}{n} \left( \frac{1}{x_1} + \frac{1}{x_2} + \dots + \frac{1}{x_n} \right)}$$

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.3: Υπολογισμός μέσης αριθμητικής διάστασης κόκκου της διαβάθμισης A σχ 2.8 & 2.9

| ανοίγμα οπής<br>κοσκίνου mm | Διερχόμενο % κατά<br>Fuller $p_i$<br>(Καμπύλη A) | κλάσμα από |           | Μέσο<br>αριθμητικό<br>άνοιγμα<br>κλάσματος<br>$d_{i,i+1}$<br>mm | %<br>Συγκρατού<br>μενο στο<br>κλάσμα<br>$p_{i+1,i}$ | Σταθμισμένη<br>συμβολή κάθε<br>κλάσματος στο<br>Μέσο<br>αριθμητικό<br>άνοιγμα του<br>συνόλου του<br>υλικού |
|-----------------------------|--|------------|-----------|---|---|--|
|                             |  | $d_i$      | $d_{i+1}$ |   |   |  |
| $d_i$                       | $100 \cdot (d_i/D_{max})^{0.5}$                  | $d_i$      | $d_{i+1}$ | $0.5 \cdot (d_i + d_{i+1})$                                     | $p_{i+1} - p_i$                                     | $d_{i,i+1} \cdot p_{i+1,i}$  |
| [1]                         | [2]  | [3]        | [4]       | [5]   | [6]   | [7]=[5]*[6]/100  |
| 0.0315                      | 0*   | 0.0315     | 0.063     | 0.04725   | 4.47  | 0.002112   |
| 0.063                       | 4.47   | 0.063      | 0.125     | 0.094   | 1.83  | 0.001718   |
| 0.125                       | 6.30   | 0.125      | 0.25      | 0.1875  | 2.61  | 0.004892   |
| 0.25                        | 8.91   | 0.25       | 0.5       | 0.375   | 3.69  | 0.013838   |
| 0.5                         | 12.60  | 0.5        | 1         | 0.75  | 5.22  | 0.039140   |
| 1                           | 17.82  | 1          | 2         | 1.5   | 7.38  | 0.110703   |
| 2                           | 25.20  | 2          | 4         | 3   | 10.44   | 0.313116   |
| 4                           | 35.63  | 4          | 8         | 6   | 14.76   | 0.885626   |
| 8                           | 50.40  | 8          | 16        | 12  | 20.87   | 2.504928   |
| 16                          | 71.27  | 16         | 31.5      | 23.75   | 28.73   | 6.823455   |
| 31.5                        | 100.00   |            |           | 4.77038   | 100.00  | 10.699528  |

\*\*Αριθμητική Μέση Διάσταση κόκκου του υλικού = 10.7 mm \*\*

\* Θεωρήθηκε ότι στο κόσκινο 0.0315 το διερχόμενο ποσοστό είναι 0

\*\*Αριθμητική Μέση Διάσταση κόκκου του υλικού =  $\sum (p_{i+1}-p_i) \cdot 0.5 \cdot (d_i+d_{i+1})$

Στον Πίνακα 4 παρουσιάζεται ο υπολογισμός της μέσης λογαριθμικής διάστασης κόκκου της διαβάθμισης A από όπου φαίνεται ότι η μέση αυτή διάσταση είναι πολύ μικρότερη της αριθμητικής μέσης διάστασης. Της λογαριθμικής μέσης διάστασης γίνεται χρήση σε ορισμένες μεθόδους υπολογισμού της βέλτιστης σύνθεσης για την επίτευξη της βέλτιστης στοιβαξης βλ παρ..4. Dewar).

Σημειώνεται ότι :  $\bar{d}_a > \bar{d}_g > \bar{d}_h > \bar{d}_f$



ΠΙΝΑΚΑΣ 2.4: Υπολογισμός της μέσης λογαριθμικής διάστασης υλικού διαβάθμισης A (Fuller) Σχ 2.8 & 2.9.

| άνοιγμα οπής<br>κοσκίνου<br>mm                             | Διερχόμενο %<br>κατά Fuller ρ <sub>i</sub><br>(Καμπύλη A) | κλάσμα από d <sub>i</sub><br>σε d <sub>i+1</sub><br>[mm] |                  | κλάσμα από<br>μm |                  | **Μέσο log<br>άνοιγμα<br>κλάσματος<br>d <sub>i,i+1</sub> | Μέση<br>Λογαριθμική<br>διάσταση<br>κλάσματος<br>μm | %<br>Συγκρατού<br>μενο στο<br>κλάσμα<br>ρ <sub>i+1,i</sub> | ***Σταθμισμένη<br>συμβολή κάθε<br>κλάσματος στο<br>Μέσο λογαριθμικό<br>άνοιγμα του<br>συνόλου του<br>υλικού |
|--|---|--|------------------|------------------|------------------|--|--|--|---|
|  |   | d <sub>i</sub>   | d <sub>i+1</sub> | d <sub>i</sub>   | d <sub>i+1</sub> |  |  |  |   |
| [1]  | [2]   | [3]  | [4]              | [5]              | [6]              | [7]  | [8]  | [9]  | [10]=[7]*[9]/100  |
| 0.0315   | 0*  | 0.0315   | 0.063            | 31.5             | 63               | 1.6488256  | 44.55  | 4.47   | 0.073703  |
| 0.063  | 4.47  | 0.063  | 0.125            | 63               | 125              | 1.9481253  | 88.74  | 1.83   | 0.035598  |
| 0.125  | 6.30  | 0.125  | 0.25             | 125              | 250              | 2.247425   | 176.78   | 2.61   | 0.058642  |
| 0.25   | 8.91  | 0.25   | 0.5              | 250              | 500              | 2.548455   | 353.55   | 3.69   | 0.094041  |
| 0.5  | 12.60   | 0.5  | 1                | 500              | 1000             | 2.849485   | 707.11   | 5.22   | 0.148703  |
| 1  | 17.82   | 1  | 2                | 1000             | 2000             | 3.150515   | 1414.21  | 7.38   | 0.232515  |
| 2  | 25.20   | 2  | 4                | 2000             | 4000             | 3.451545   | 2828.43  | 10.44  | 0.360245  |
| 4  | 35.63   | 4  | 8                | 4000             | 8000             | 3.752575   | 5656.85  | 14.76  | 0.553896  |
| 8  | 50.40   | 8  | 16               | 8000             | 16000            | 4.053605   | 11313.71   | 20.87  | 0.846166  |
| 16   | 71.27   | 16   | 31.5             | 16000            | 31500            | 4.3512153  | 22449.94   | 28.73  | 1.250119  |
| 31.5   | 100.00  |  |                  |                  |                  |  | Άθροισμα   | 100.00   | 3.653626  |
| <b>Λογαριθμική Μέση Διάσταση κόκκου του υλικού σε μm =</b> |   |  |                  |                  |                  |  |  | dm = [μm]  | 4504.290  |

\*Θεωρήθηκε ότι στο κόσκινο 0.0315 το διερχόμενο ποσοστό είναι 0%.

\*\*log dm<sub>i,i+1</sub> Μέσο λογαριθμικό άνοιγμα κλάσματος = 0.5 \* (log(d<sub>i</sub>)+log(d<sub>i+1</sub>))

\*\*\*Λογαριθμική Μέση Διάσταση κόκκου του υλικού υπολογίζεται ως το άθροισμα των επιμέρους συμβολών κάθε κλάσματος ήτοι Log(dm)= Σlog(dm<sub>i,i+1</sub>)\*ρ<sub>i,i+1</sub>

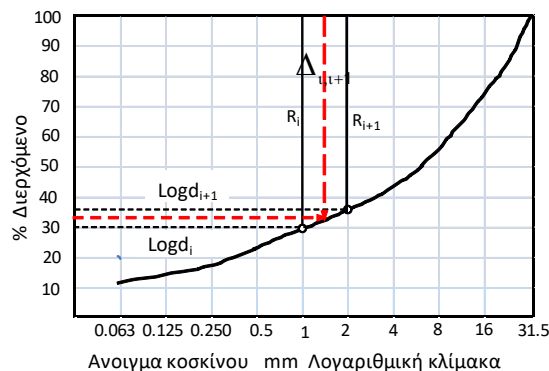
Ως **μέτρο λεπτότητας (ΜΛ)** ορίζεται το άθροισμα των συγκρατούμενων ποσοστών στα κόσκινα [mm] 31.5, 16, 8, 4, 2, 1, 0.5, 0.25, 0.125 διαιρεμένα με 100 (Αμερικανικά Κόσκινα #100 (150 μm), #50 (300μm), #30(600μm), #16 (1.18mm), #8 (2.36mm), #4 (4.75 mm), 3/8" (9.5 mm), ¼ "(19 mm), 1 1/2" (37.5 mm)).

$$FM = \frac{\sum \text{συγκρατούμενα}\%(31.5 - 16 - 8 - 4 - 2 - 1 - 0.5 - 0.25 - 0.125)}{100}$$

Μεγάλες τιμές FM-(ΜΛ) σημαίνουν χονδρότερη διαβάθμιση

Συνήθως χρησιμοποιείται στις Αμερικανικές Προδιαγραφές και κυρίως αφορά κλάσματα άμμου. Στην Ευρώπη συνήθως δεν χρησιμοποιείται εκτός από τις περιπτώσεις που επιδιώκεται ο χαρακτηρισμός των λεπτόκοκκων υλικών (<4mm, άμμος) από άποψη λεπτότητας (EN12620) σε χονδρόκοκκη άμμο 4<ΜΛ<2.4, μεσαίας διαβάθμισης 2.8>ΜΛ>1.5 ή λεπτόκοκκη άμμο 2.1>ΜΛ>0.6. (Στις περιπτώσεις αυτές παραλείπονται τα κόσκινα 8,16,31.5) Το ΜΛ είναι χρήσιμο στην διαπίστωση μεταβολών στη διαβάθμιση σε αδρανή από μια σταθερή πηγή

Το μέτρο λεπτότητας ως το άθροισμα των συγκρατούμενων ποσοστών σε μια πλήρη σειρά κοσκίνων του υλικού, ουσιαστικά είναι ανάλογο με την επιφάνεια πάνω από την καμπύλη διαβάθμισης του υλικού που οριοθετείται από το μεγαλύτερο και το μικρότερο κόσκινο που λήφθηκαν υπόψη και έχει ευθεία σχέση με τη μέση λογαριθμική διάσταση κόκκου του υλικού [Poronics] βλ Σχ. 2.10. Επομένως το ΜΛ έχει κατά προσέγγιση σχέση και με το απαιτούμενο νερό αλλά αυτό αφορά υλικά με την ίδια μορφή κόκκων. Θα πρέπει επίσης να τονιστεί ότι το ίδιο ΜΛ μπορεί να έχουν πολλές διαβαθμίσεις και επομένως ο δείκτης αυτός δεν μπορεί να αντικαταστήσει την διαβάθμιση του υλικού



$$M\Lambda = \sum_0^{D_{\max}} R_i = \sum_{\text{καθεκλ.άσμα}} \frac{R_i + R_{i+1}}{2} = \sum \Delta_{i,i+1}$$

όπου  $\Delta_{i,i+1}$  η διάμεσος του τραπέζιου  $R_i, R_{i+1}$  για τεταγμένη=

$$\frac{1}{2}(\text{Log}d_i + \text{Log}d_{i+1})$$

Σχ. 2.10: Μέτρο Λεπτότητας

Η **ειδική επιφάνεια (εΕ)** αδρανών γνωστής κοκκομετρικής διαβάθμισης μπορεί να υπολογιστεί κατά προσέγγιση θεωρώντας καταρχήν τους κόκκους προσεγγιστικά ως σφαίρες –οπότε η ειδική επιφάνειά τους είναι ίση με  $\delta/d$  (βλ 4.2.3)- και στη συνέχεια χρησιμοποιώντας διορθωτικούς συντελεστές "δ" (βλ Πίνακα 5) για να ληφθεί υπόψη το σχήμα των κόκκων. Ο υπολογισμός γίνεται για κάθε κλάσμα ξεχωριστά το οποίο θεωρείται ότι αντιπροσωπεύεται από τον μέσο γεωμετρικό κόκκο του κλάσματος :

$$d_{gm} = \sqrt{d_i * d_{i-1}}$$

Τελικά η ειδική επιφάνεια όλης της διαβάθμισης των αδρανών δίνεται από τη σχέση:

$$\varepsilon E = \sum \varepsilon E_i = \frac{\delta}{\rho} * \sum \frac{\rho_i}{d_{mgi}} \quad [m^2/kg]$$

Όπου:

$\varepsilon E$  είναι η ειδική επιφάνεια του συνόλου των κλασμάτων  $i$  (με επιμέρους τιμές  $\varepsilon E_i$ )

$\delta$  είναι ο διορθωτικός συντελεστής σχήματος (βλ Πίνακα 5)

$\rho$  είναι η πυκνότητα των αδρανών [ $kg/m^3$ ]

$\rho_i$  (είναι το ποσοστό κάθε κλάσματος  $i$  κατά μάζα )/100

$d_{mgi}$  είναι η μέση γεωμετρική διάσταση του κλάσματος  $i$  [mm] με  $\max$  άνοιγμα κοσκίνου  $d_i$  και  $\min$  άνοιγμα κοσκίνου  $d_{i-1}$

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.5 : Διορθωτικός συντελεστής σχήματος για την εκτίμηση της ειδικής επιφάνειας

| Μορφή κόκκου                | Διορθωτικός συντελεστής δ |
|-----------------------------|---------------------------|
| σφαιρική                    | 6                         |
| κυβική                      | 8.5                       |
| τετραεδρική                 | 17                        |
| οκτεδρική                   | 10.5                      |
| στρογγυλευμένη έως γωνιώδης | 8 έως 12                  |
| πλακοειδής έως βελονοειδής  | 12 έως 17                 |

Στον Πίνακα 2.6 δίνεται ένα παράδειγμα υπολογισμού της ειδικής επιφάνειας που έχει ένα θραυστό αμμοχάλικο 0.063/31.5 που ακολουθεί την διαβάθμιση της διαχωριστικής γραμμής ΔΕ μεταξύ της ζώνης Δ και Ε του ΚΤΣ (βλ Σύνθεση αδρανών). Για τον υπολογισμό λήφθηκε τιμή δ=10 και ρ=2670kg/m<sup>3</sup>

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.6 : Υπολογισμός ειδικής επιφάνειας

| Κόσκιο   | Διερχόμενο % | Κλάσμα                           | Συγγρατούμενο στο κλάσμα | μέση γεωμετρική διάσταση κόκκου του κλάσματος                            | ειδική επιφάνεια m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> | ειδική επιφάνεια m <sup>2</sup> /kg           |
|--|--------------|----------------------------------|--------------------------|--|---|---|
| mm   |              | d <sub>i-1</sub> /d <sub>i</sub> | ρ <sub>i</sub>           | d <sub>m</sub> = (d <sub>i-1</sub> *d <sub>i</sub> ) <sup>0.5</sup> [mm] | εE=ρ <sub>i</sub> * δ/d <sub>m</sub>            | εE= (ρ <sub>i</sub> *δ/d <sub>m</sub> )*(1/ρ) |
| 0.063  | 0            |                                  |                          |  |   |   |
| 0.25   | 13           | 0.063/0.25                       | 0.13                     | 0.125  | 10358.65  | 3.88  |
| 0.5  | 21.5         | 0.25/0.5                         | 0.085                    | 0.354  | 2404.16   | 0.90  |
| 1  | 30           | 0.5/1                            | 0.085                    | 0.707  | 1202.08   | 0.45  |
| 2  | 40           | "1/2                             | 0.1                      | 1.414  | 707.11  | 0.26  |
| 4  | 52           | "2/4                             | 0.12                     | 2.828  | 424.26  | 0.16  |
| 8  | 68           | "4/8                             | 0.16                     | 5.657  | 282.84  | 0.11  |
| 16   | 87           | "8/16                            | 0.19                     | 11.314   | 167.94  | 0.06  |
| 31.5   | 100          | "16/32                           | 0.13                     | 22.450   | 57.91   | 0.02  |
| <b>Ειδική επιφάνεια υλικού 0.063/31.5 =</b>                      |              |                                  |                          | <b>Αθροισμα =</b>  | 15604.95  | 5.84  |
| Ο διορθωτικός συντελεστής σχήματος λήφθηκε ίσος προς δ=10        |              |                                  |                          |  |   |   |
| Η πυκνότητα του υλικού λήφθηκε ίση προς ρ=2670 kg/m <sup>3</sup> |              |                                  |                          |  |   |   |

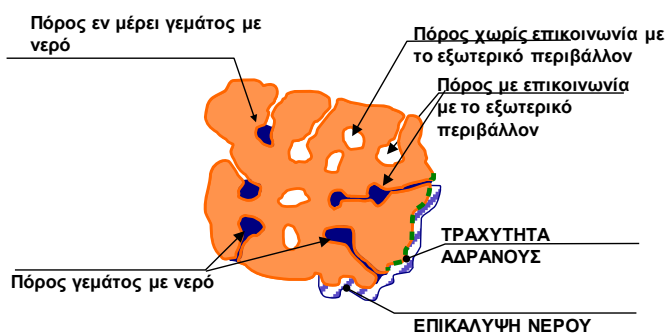
## 2.3 ΦΥΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Γίνεται αναφορά μόνο τα κυριότερα φυσικά χαρακτηριστικά, για περισσότερες πληροφορίες βλ EN 12620

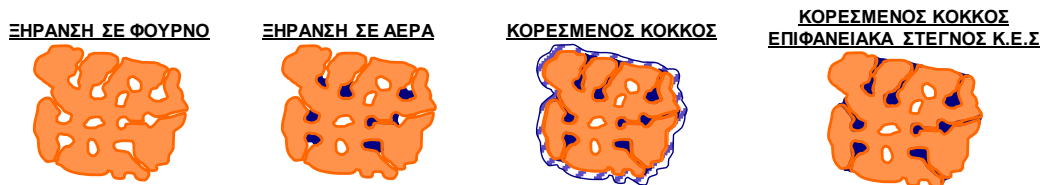
### 2.3.1 Πυκνότητα κόκκου – Σχετική πυκνότητα<sup>8</sup>

Στο κείμενο αυτό ακολουθούνται οι ορισμοί και οι μέθοδοι μέτρησης του πρότυπου ΕΛΟΤ EN 1097-6

Πυκνότητα είναι ο λόγος της μάζας ενός σώματος προς τον όγκο του. Στην περίπτωση των αδρανών επειδή η μάζα τους περιλαμβάνει κενά-πόρους προσβάσιμους ή μη από το νερό (βλ σχ 2.11) διακρίνονται διάφορα είδη πυκνοτήτων κόκκων που αναφέρονται στην επόμενη παράγραφο. Επίσης παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον η πυκνότητα που αποκτούν αδρανή (ίδιου ή διαφορετικού μεγέθους) όταν σωρεύονται με ή χωρίς συμπίκνωση για σχηματίσουν σωρούς. Η πυκνότητα αυτή αποτελεί διαφορετικό είδος και έχει να κάνει, εκτός από την πυκνότητα κάθε κόκκου και με τον τρόπο με τον οποίο γίνεται η στοίβαξη-τοποθέτηση (επισώρευση) των κόκκων μεταξύ τους. Η πυκνότητα αυτή ονομαζόμενη "πυκνότητα στοιβάγματος" (πυκνότητα υλικού χύδην)<sup>9</sup> έχει χρήση στις μετατροπές βάρους (μάζας) - όγκου σωρών αδρανών και στις θεωρίες βέλτιστης σύνθεσης του σκυροδέματος.



#### α. Προσβάσιμοι και μη προσβάσιμοι από το νερό πόροι κόκκων αδρανών



#### β. Υγρασιακές καταστάσεις κόκκων αδρανών

Σχ 2.11: Είδη πόρων αδρανών υλικών και υγρασιακές καταστάσεις αδρανών

<sup>8</sup> Οι αντίστοιχοι όροι στην αγγλική είναι :particle density, relative particle density και επίσης specific gravity = ειδικό βάρος (στην Αμερικανική κυρίως βιβλιογραφία)

<sup>9</sup> packing density, bulk density (loose bulk density πυκνότητα υλικού χύδην δηλ χωρίς ουσιαστική συμπίκνωση σε χαλαρή κατάσταση), consolidated bulk density ή packing density πυκνότητα υλικού μετά από συμπίκνωση (πυκνότητα στοιβάγματος)

**Πυκνότητα κόκκων** : Ο λόγος της μάζας δείγματος κόκκων προς τον όγκο που καταλαμβάνουν οι κόκκοι αυτοί στον οποίο συμπεριλαμβάνονται ο όγκος των προσβάσιμων και μη προσβάσιμων από το νερό πόρων των κόκκων. Ο όγκος επομένως που λαμβάνεται υπόψη είναι ο "εξωτερικός" όγκος των κόκκων χωρίς να αφαιρεθούν οι όγκοι των προσβάσιμων και μη προσβάσιμων από το νερό πόρων – "όγκος της εξωτερικής περιμέτρου".

Ανάλογα με την υγρασιακή κατάσταση των κόκκων κατά τη μέτρηση της μάζας τους διακρίνονται:

1. **Πυκνότητα κόκκων ξηραμένων σε φούρνο**<sup>10</sup> (ξηρή πυκνότητα), **ρ<sub>ξηρ</sub>** :Ο λόγος της ξηραμένης σε φούρνο (θερμοκρασία 110±5°C) μάζας του δείγματος των κόκκων προς τον όγκο του δείγματος στον οποίο περιλαμβάνονται οι πόροι οι προσβάσιμοι και οι μη προσβάσιμοι από το νερό.
2. **Πυκνότητα κόκκων σε κορεσμένη επιφανειακά στεγνή κατάσταση**<sup>11</sup> (**ΚΕΣ**) **ρ<sub>ΚΕΣ</sub>**: Ο λόγος της μάζας του δείγματος των κόκκων σε κατάσταση κορεσμένη επιφανειακά στεγνή (ΚΕΣ) προς τον όγκο του δείγματος στον οποίο περιλαμβάνονται οι προσβάσιμοι και οι μη προσβάσιμοι από το νερό πόροι.

**Φαινόμενη Πυκνότητα κόκκων**<sup>12</sup>: Ο λόγος της μάζας δείγματος κόκκων προς τον όγκο που καταλαμβάνουν οι κόκκοι αυτοί από τον οποίο αφαιρείται ο όγκος των πόρων που είναι προσβάσιμοι από το νερό.(συμπεριλαμβάνεται ο όγκος μόνο των μη προσβάσιμων από το νερό πόρων των κόκκων). Ο όγκος που λαμβάνεται υπόψη δεν περιλαμβάνει τους προσβάσιμους από το νερό πόρους και επομένως είναι μικρότερος από τον όγκο της "εξωτερικής περιμέτρου" άρα η φαινόμενη πυκνότητα είναι μεγαλύτερη της αντίστοιχης πυκνότητας (1) ή (2)

**Σχετική πυκνότητα**<sup>13</sup> είναι μέγεθος αδιάστατο και είναι ο λόγος της εκάστοτε πυκνότητας προς την πυκνότητα ίσου όγκου νερού και επομένως διακρίνεται σε **σχετική πυκνότητα κόκκων και σε σχετική φαινόμενη πυκνότητα κόκκων**. Ανάλογα με την υγρασιακή κατάσταση των κόκκων διακρίνεται σε **σχετική πυκνότητα κόκκων** σε α) κατάσταση ΚΕΣ ή β) σε ξηρή κατάσταση.

Οι αρχές προσδιορισμού των διαφόρων ειδών πυκνότητας παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 7. Η πυκνότητα των κόκκων (κλάσματα κόκκων 0.063mm - 4mm ή 4mm-31.5mm, ή 31.5mm- 63mm) προσδιορίζεται από τον λόγο της μάζας προς τον αντίστοιχο όγκο αυτής. Η μάζα μετράται με ζύγιση του δείγματος :

- σε κορεσμένη επιφανειακά στεγνή κατάσταση (ΚΕΣ) μετά από παραμονή του δείγματος επί (24±0.5)h μέσα σε νερό (22±3) ° C και κατάλληλο στέγνωμα της επιφάνειας πριν από τη ζύγιση: Μάζα σε κατάσταση ΚΕΣ (M1) Πίνακας 2.7
- σε ξηρή κατάσταση μετά από ξήρανση σε φούρνο στους 110±5 °C μέχρι σταθερότητας βάρους: Ξηρή μάζα (M4) Πίνακας 2.7

Ο όγκος προσδιορίζεται (βλ Πίνακα 2.7), με βάση την αρχή του Αρχιμήδη, ως διαφορά μάζας/βάρους του δείγματος στον αέρα (M1 ή M4) από το βάρος (μάζα) του δείγματος μέσα σε νερό (M2 - M3). Η θερμοκρασία του νερού πρέπει να μετράται (22±3)°C για να γίνει

10 Particle density on an oven dried basis

11 Particle density on a saturated and surface-dried basis SSD

12 Apparent particle density

13 Relative particle density (στην αμερικανική κυρίως βιβλιογραφία αναφέρεται και ως specific gravity)

κατάλληλη διόρθωση της πυκνότητας του. Αν στον προσδιορισμό της πυκνότητας χρησιμοποιηθεί ως μάζα δείγματος στον αέρα:

- η μάζα του δείγματος σε κατάσταση ΚΕΣ (M1) τότε προσδιορίζεται ο όγκος που αφορά την εξωτερική περιμέτρο των κόκκων (άρα συμπεριλαμβάνονται στον όγκο οι πόροι που είναι προσβάσιμοι από το νερό και οι πόροι που δεν είναι προσβάσιμοι από το νερό M1-(M2-M3) Πίνακας 1.
- η μάζα του ξηρού δείγματος (M4) τότε προσδιορίζεται ο όγκος του δείγματος από τον οποίο έχουν αφαιρεθεί τα προσβάσιμα από το νερό κενά M4-(M2-M3) Πίνακας 1 , αλλά περιλαμβάνεται ο όγκος των μη προσβάσιμων από το νερό πόρων

Σύμφωνα με το Πρότυπο EN1097-6 οι πυκνότητες εκφράζονται σε Mg/m<sup>3</sup> (= 1000kg/m<sup>3</sup>).

Σημειώνεται ότι και στις δύο ως άνω περιπτώσεις προσδιορισμού του όγκου του δείγματος των κόκκων, οι μη προσβάσιμοι από το νερό πόροι συμπεριλαμβάνονται στον προσδιοριζόμενο όγκο, με άλλα λόγια θεωρείται ότι οι πόροι αυτοί δεν υπάρχουν (είναι γεμάτοι με τη μάζα του κόκκου). Στην πραγματικότητα τα κενά που δεν είναι προσβάσιμα από το νερό δεν έχουν καμία επιρροή στην συμπεριφορά του μίγματος ούτε στον προσδιορισμό των αναλογιών του.

Η πυκνότητα που θα μπορούσε να προσδιοριστεί με αφαίρεση και των μη προσβάσιμων από το νερό κενών από τον όγκο της μάζας του υλικού ονομάζεται **απόλυτη πυκνότητα** και αφορά την πυκνότητα των ορυκτών που αποτελούν τους κόκκους. Η πυκνότητα αυτή βρίσκεται με άλεση των κόκκων ώστε τα μηδενιστούν τα μη προσβάσιμα από το νερό κενά. Η απόλυτη πυκνότητα δεν έχει καμία χρήση στην τεχνολογία του σκυροδέματος και γι'αυτό συνήθως δεν μετράται.

Λόγω των ιδιοτήτων που παρουσιάζει ο προσδιορισμός της κατάστασης ΚΕΣ και ιδιαίτερα στην περίπτωση των λεπτόκοκκων υλικών (άμμου)<sup>14</sup> η φαινόμενη πυκνότητα είναι εκείνη που προσδιορίζεται με το μικρότερο σφάλμα ακολουθεί η πυκνότητα σε ξηρή κατάσταση. Η πυκνότητα σε κατάσταση ΚΕΣ είναι εκείνη που χρησιμοποιείται συνθέστερα στον υπολογισμό της σύνθεσης του σκυροδέματος και στη μετατροπή των ποσοτήτων από βάρος/μάζα σε όγκο και αντίστροφα. Την μεγαλύτερη τιμή παρουσιάζει η φαινόμενη πυκνότητα και τη μικρότερη η πυκνότητα σε ξηρή κατάσταση. Είναι φανερό (βλ Πίνακα1) ότι οι διαφορές μεταξύ των πυκνοτήτων είναι μεγαλύτερες όσο μεγαλύτερη είναι η υδαταπορρόφηση. Τις τιμές των πυκνοτήτων και της υδαταπορρόφησης συνδέουν οι ακόλουθες σχέσεις [Dewar& Anderson]:

$$\text{υδαταπ}(\%) = 100 \times \left[ \frac{1}{\rho_{\xi}} - \frac{1}{\rho_{\Phi}} \right] \quad \text{υδαταπ}(\%) = 100 \times \left[ \frac{\rho_{\text{ΚΕΣ}}}{\rho_{\xi}} - 1 \right]$$

14 Η κατάσταση ΚΕΣ (SSD) προσδιορίζεται μετά από επιφανειακό σκουπίσμα (με απορροφητικό πανί ή χαρτί) των μεγάλων κόκκων των αδρανών αλλά στην περίπτωση της άμμου η διαδικασία αυτή δεν είναι εφικτή και ορίζεται ως η υγρασία κώνου άμμου που αρχίζει να καταρρέει [EN 1097-6, ASTM C-128]. Κατά τον γράφοντα είναι φανερό ότι στην περίπτωση της άμμου η επιφανειακή κατάσταση των κόκκων είναι διαφορετική από εκείνη των "σκουπισμένων" κόκκων (χαλίκια, γαρμπίλι) διότι για να διατηρείται ο κώνος σε κατάσταση έναρξης κατάρρευσης σημαίνει ότι ένα ποσοστό κόκκων θα έχει επιφανειακά κάποιες, έστω μικρές, υγρασίες ώστε οι αναπτυσσόμενες επιφανειακές τάσεις να μην επιτρέπουν την πλήρη κατάρρευση του κώνου. Επειδή όμως η ειδική επιφάνεια της άμμου είναι σημαντικά μεγαλύτερη εκείνης των χονδρότερων αδρανών η επιπλέον αυτή υγρασία είναι σημαντικό ποσοστό της μάζας του κόκκου και έχει ως συνέπεια να μετρούνται μεγαλύτερη υγρασία απορρόφησης και μεγαλύτερη πυκνότητα σε κατάσταση ΚΕΣ. Το φαινόμενο είναι πολύ πιο έντονο σε περίπτωση αυξημένων ποσοστών παιπάλης και παρουσιάζει διαφοροποιήσεις ανάλογα με το σχήμα και την επιφάνεια των κόκκων της άμμου (άμμος φυσική στρουγγυλεμένη-άμμος θραυστή με διαφορετικό σχήμα και επιφανειακά χαρακτηριστικά κόκκων). Επίσης μεγάλη επιρροή έχει το αν η άμμος εξετάζεται πλυμένη οπότε έχει αφαιρεθεί η παιπάλη (<0.074mm ASTM, <0.063mmEN) ή χωρίς πλύση.

$$\text{υδαταπ}(\%) = 100 \times \left[ \frac{1 - \rho_{\text{ΚΕΣ}}}{\rho_{\text{ΚΕΣ}} - 1} \right]$$

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.7 Προσδιορισμός πυκνοτήτων κατά EN 1097

|  | ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΜΕΤΡΗΣΗ  | Ξήρανση<br>110 ± 5 °C | ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ |       |  |  |   |
|--|---|-----------------------|----------------------|-------|--|--|---|
|  | <p><b>ΚΕΣ (SSD)</b><br/>Κορεσμένη επιφανειακά στεγνή</p>  |                       |                      |       |  |  |   |
| Μετρήσεις<br>Μάζας                         | $M_1 = M_4 + \text{Νερό Υδατοπ}$  | $M_2$                 | $M_3$                | $M_4$ | $V = M_4 - (M_2 - M_3)$                      | $V + \text{Νερό υδατοπ} = M_1 - (M_2 - M_3)$           |   |
|  | Μάζα κόκκου (ων) μέσα στο νερό = $M_2 - M_3$  |                       |                      |       |  |  |   |
| Προκύπτοντες<br>Όγκοι                      | Όγκος κόκκου(ων) στον οποίο περιλαμβάνονται οι μη προσβάσιμοι και οι προσβάσιμοι από το νερό πόροι = $M_1 - (M_2 - M_3)$                              |                       |                      |       |  | Όγκος εξωτερικής περιμέτρου = $V + \text{Νερό υδατοπ}$ |   |
|  | Όγκος κόκκου(ων) στον οποίο περιλαμβάνονται μόνον οι μη προσβάσιμοι από το νερό πόροι = $M_4 - (M_2 - M_3)$<br>(οι προσβάσιμοι πόροι έχουν αφαιρεθεί) |                       |                      |       |  | Όγκος χωρίς τον όγκο των προσβάσιμων από νερό πόρων    |   |
| Υπολογιζόμενες Πυκνότητες & Υδαταπορρόφηση | Πυκνότητα κόκκου(ων) σε κατάσταση κορεσμένη επιφανειακά στεγνή  |                       |                      |       |  | $\rho_{\text{ΚΕΣ}} = \frac{M_1}{M_1 - (M_2 - M_3)}$    | $\frac{\text{Μάζα σε κατάσταση ΚΕΣ}}{\text{Όγκος εξωτερικής περιμέτρου}}$             |
|  | Πυκνότητα κόκκου(ων) μετά ξήρανση στους 110 ± 5 °C  |                       |                      |       |  | $\rho_{\text{ΞΗΡ}} = \frac{M_4}{M_1 - (M_2 - M_3)}$    | $\frac{\text{Μάζα ξερή}}{\text{Όγκος εξωτερικής περιμέτρου}}$                         |
|  | Φαινόμενη Πυκνότητα κόκκου(ων)  |                       |                      |       |  | $\rho_{\text{ΦΑΙΝ}} = \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)}$   | $\frac{\text{Μάζα ξερή}}{\text{Όγκος χωρίς τον όγκο των προσβάσιμων από νερό πόρων}}$ |
|  | Υδαταπορ <sub>24h</sub> = $\frac{M_1 - M_4}{M_4} \cdot 100$ [%]   |                       |                      |       |  | Νερό που εισχώρησε στους πόρους, υδαταπορρόφηση        |   |
|  | $\rho_{\text{ΚΕΣ}} = 1 + \rho_{\text{ΞΗΡ}} - \frac{\rho_{\text{ΞΗΡ}}}{\rho_{\text{ΦΑΙΝ}}}$  |                       |                      |       | Για έλεγχο των μετρήσεων και των υπολογισμών |  |   |



Πρέπει να επισημανθεί ότι οι κόκκοι των αδρανών έρχονται σε επαφή μεταξύ τους και με τα άλλα υλικά του σκυροδέματος (τσιμέντο, νερό, πρόσμικτα) με την εξωτερική τους επιφάνεια και ως εκ τούτου οι πόροι, που είναι προσβάσιμοι από το νερό, επηρεάζουν την συμπεριφορά του μίγματος μόνο ως προς το νερό που απορροφούν δηλ την υγρασία απορρόφησης. Συνήθως στις βόρειες χώρες τα αδρανή είναι υγρά και εισάγονται στον αναμικτήρα σε κορεσμένη κατάσταση ή ακόμη πιο υγρή (επιφανειακή υγρασία Σχ2.11). Στη χώρα μας υπάρχουν μεγάλα χρονικά διαστήματα που τα αδρανή βρίσκονται σε κατάσταση σημαντικά πιο ξηρή εκείνης της ΚΕΣ. Αν τα αδρανή αναμιχθούν με τα άλλα υλικά του σκυροδέματος σε απόλυτα ξηρή κατάσταση ή συνηθέστερα, σε μερικώς ξηρή κατάσταση (βλ Σχ 2.11) (καλοκαίρι σε χώρες με ξηρό κλίμα ) τότε θα απορροφήσουν νερό από το μίγμα και η εργασιμότητα/συνεκτικότητα που μετράται στο σκυρόδεμα μετά την έξοδο του από τον αναμικτήρα θα είναι σημαντικά μεγαλύτερη εκείνης που μετράται μετά 15' ή 20' ή 60' λεπτά από την έξοδο από τον αναμικτήρα. Αυτό συμβαίνει διότι κατά το διάστημα αυτό εκτός από την έναρξη της ενυδάτωσης και των συνεπειών της, πραγματοποιείται σε σημαντικό βαθμό η υδαταπορρόφηση και το απορροφούμενο νερό δεν είναι πια διαθέσιμο για την διευκόλυνση της μετακίνησης των κόκκων του μίγματος.

Δεν είναι όμως μόνο η εργασιμότητα που επηρεάζεται από την υδαταπορρόφηση. Το νερό που απορροφάται από τα συνήθη αδρανή δεν είναι ελεύθερο για να αντιδράσει με το τσιμέντο και επομένως το νερό που θα είναι διαθέσιμο για ενυδάτωση του τσιμέντου θα είναι μειωμένο κατά την ποσότητα του νερού που απορροφήθηκε από τα αδρανή. Έτσι στο σκυρόδεμα το **συνολικό νερό αναμίξεως  $N_{\sigma}$**  διακρίνεται σε **ενεργό νερό  $N_e$  (ή ελεύθερο νερό)** και σε **νερό απορρόφησης  $N_{απ}$**  για το οποίο ισχύει η σχέση:

$$N_{\sigma} = N_{απ} + N_e$$

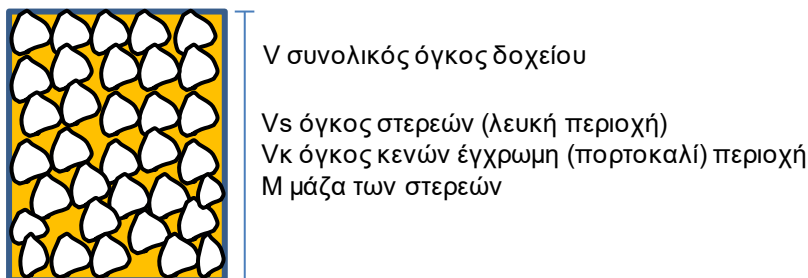
Για τον λόγο αυτό είναι πολύ ενδιαφέρον και χρήσιμο να γίνονται μετρήσεις υδαταπορρόφησης αδρανών όχι μόνο μετά από υδρεμποτισμό 24 ωρών (χρονικό διάστημα μεγάλο) αλλά και μετά από υδρεμποτισμό 30', 60' 90' και 120' λεπτών. Οι υπάρχουσες ενδείξεις είναι ότι σε ασβεστολιθικά αδρανή κατά το διάστημα αυτό των πρώτων 15' έως 90 λεπτών λαμβάνει χώρα το μεγαλύτερο ποσοστό προσρόφησης νερού από ξηρά αδρανή. Επίσης έχει επισημανθεί ότι οι λεπτοί κόκκοι του τσιμέντου των οποίων αρχίζει η ενυδάτωση μπορεί να καλύπτουν την είσοδο των πόρων και να παρεμποδίζουν την προσρόφηση του νερού από τους πόρους των αδρανών. Εντούτοις, από προκαταρκτική εργασία στο ΕΜΠ, που έγινε στο χονδρότερο κλάσμα των αδρανών, υπάρχει η ένδειξη ότι κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει τουλάχιστον σε σημαντικό βαθμό, γεγονός όμως, το οποίο πρέπει να επιβεβαιωθεί και από άλλες έρευνες.

Θα πρέπει επίσης να αναφερθεί ότι ορισμένα ελαφρά πορώδη αδρανή με πόρους μεγάλου μεγέθους έχουν την δυνατότητα να αποδώσουν στη μάζα του (σκληρυμένου) σκυροδέματος μέρος του νερού που έχουν απορροφήσει. Αυτής της δυνατότητας γίνεται χρήση για τη δημιουργία συνθηκών "εσωτερικής συντήρησης" με τροφοδοσία εκ των "έσω" του τσιμεντοπολτού που βρίσκεται σε στάδιο σκλήρυνσης με νερό. Έτσι, σε περιπτώσεις σκυροδεμάτων πολύ υψηλής αντοχής ( μεγάλη περιεκτικότητα σε τσιμέντο και μικρή περιεκτικότητα σε νερό, μικρός N/T) που είναι επιρρεπή σε έντονη ενδογενή συστολή (βλ Κεφ Συστολή), συχνά χρησιμοποιείται ένα ποσοστό πορωδών αδρανών για την απόδοση νερού στο εσωτερικό της μάζας του σκυροδέματος και μετριασμό της ενδογενούς συστολής.

### 2.3.2 Πυκνότητα ομάδας κόκκων

**Φαινόμενη πυκνότητα στοιβάγματος (στοιβής)** Είναι ο λόγος της μάζας πολλών κόκκων προς τον συνολικό όγκο που καταλαμβάνουν στον οποίο συμπεριλαμβάνονται τα κενά μεταξύ των κόκκων και οι πόροι των κόκκων (προσβάσιμοι και μη προσβάσιμοι από το νερό). Επομένως αν **M** είναι η μάζα αδρανών που έχουν τοποθετηθεί (στοιβαχθεί) μέσα σε ένα δοχείο όγκου **V** ( βλ Σχ. 2.12) φαινόμενη πυκνότητα στοιβάγματος είναι :

$$\text{Φαινόμενη πυκνότητα στοιβάγματος } \rho_{\text{στ}} = \frac{M}{V}$$



Σχ 2.12 : Αδρανή τοποθετημένα-στοιβαγμένα σε δοχείο όγκου V

Ανάλογα με την υγρασιακή κατάσταση των κόκκων διακρίνεται σε φαινόμενη πυκνότητα στοιβάγματος σε κατάσταση ΚΕΣ  $\rho_{\text{στΚΕΣ}}$  ή σε ξηρή κατάσταση  $\rho_{\text{στξκ}}$ . Η τιμή της εξαρτάται από την συμπίκνωση που υπέστησαν τα αδρανή (η οποία πρέπει να αναφέρεται), από τη διαβάθμισή τους, το σχήμα των κόκκων και την τραχύτητα της επιφάνειας.

Συναφής έννοια είναι επίσης ο **λόγος** του όγκου **Vκ** των κενών μεταξύ των αδρανών και μεταξύ των αδρανών και του δοχείου (δεν λαμβάνονται υπόψη τα "εσωτερικά" κενά των αδρανών) προς τον συνολικό όγκο **Vs** της μάζας των αδρανών (στερεών) ή προς τον συνολικό όγκο **Vολ** του σωρού που καταλαμβάνουν τα αδρανή. Και οι δύο λόγοι εκφράζουν το μέγεθος των κενών σε σχέση με τον όγκο των στερεών ή τον συνολικό όγκο με τιμές που μπορεί να κυμανθούν από 0 έως 1 ή μπορεί να εκφραστούν ως ποσοστό (%) του αντίστοιχου όγκου.

**Λόγος/Δείκτης κενών σωρού ή Πορώδες σωρού**<sup>15</sup>  $\rho = \frac{V_{\kappa}}{V_s} = \frac{\rho}{\rho_{\text{στ}}} - 1$

**Περιεκτικότητα σε αέρα**<sup>16</sup>  $\alpha = \frac{V_{\kappa}}{V_{\text{ολ}}} = 1 - \frac{\rho_{\text{στ}}}{\rho}$

(Επισημαίνεται η διαφορά στον παρανομαστή των δύο μεγεθών: Vs όγκος στερεών και Vολ συνολικός όγκος.  $\rho = \rho_{\text{κοκ}}$  (βλ αποδείξεις σχέσεων) Επίσης για τον συμβολισμό της περιεκτικότητας σε αέρα "α" χρησιμοποιείται η ελληνική σειρά χαρακτήρων)

<sup>15</sup> Voids ratio. Πρόκειται για πορώδες σωρού αδρανών που περιλαμβάνει τα κενά μεταξύ των κόκκων σε αντίθεση με το πορώδες του κόκκου που περιλαμβάνει τα κενά της μάζας του κόκκου που είναι προσβάσιμα στο νερό . Για να μην γίνονται συγχύσεις προτιμάται ο όρος voids ratio αλλά επειδή δεν πρόκειται στην πραγματικότητα για λόγο κενών (Vs είναι όγκος στερεών) στην απόδοση στην Ελληνική προτιμάται ο όρος **Δείκτης κενών ή πόρων, indice de vides**

<sup>16</sup> Air content

Τα δύο μεγέθη συνδέονται με τη σχέση  $\alpha = \frac{\rho}{1+\rho}$  , ή  $\rho = \frac{\alpha}{1-\alpha}$

Χρησιμοποιείται<sup>17</sup> επίσης και το μέγεθος : ο λόγος του όγκου των στερεών προς τον συνολικό όγκο ή η κατ' όγκο αναλογία των στερεών στο συνολικό όγκο του σωρού για το οποίο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ο όρος **δείκτης συμπίκνωσης/πυκνότητας σωρού**.

$$\Phi = \frac{V_s}{V_{ολ}} = \frac{V_s}{V_s + V_k} = \frac{\rho_{στ}}{\rho_{κοκ}}$$

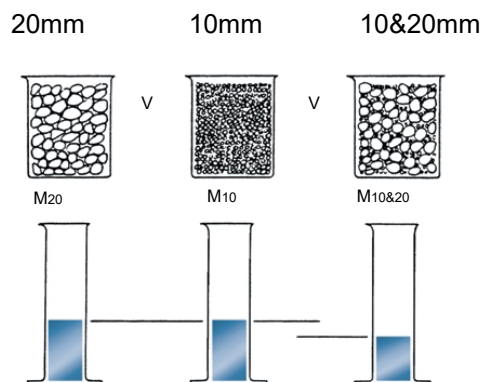
Όπου  $\rho_{κοκ}$  είναι η πυκνότητα του κόκκου

Φυσικά ισχύει  $\Phi + \alpha = 1$

και  $\Phi = \frac{1}{1+\rho}$  ,  $\rho = \frac{1-\Phi}{\Phi}$

Με τα μεγέθη αυτά (που είναι αδιάστατα) μπορεί να γίνει σύγκριση του βαθμού συμπίκνωσης διαφορετικών αδρανών χωρίς να πρέπει να γίνεται αναφορά στην πυκνότητα αυτών. Δεν πρέπει όμως να γίνει σύγχυση με την έννοια του πορώδους των κόκκων που αφορά τον λόγο του όγκου των εσωτερικών κενών των κόκκων των αδρανών . Σημειώνεται ότι προφανώς στις παραπάνω σχέσεις οι τιμές των  $\rho$  και  $\rho_{στ}$  που χρησιμοποιούνται είναι για την ίδια υγρασιακή κατάσταση (πχ αν χρησιμοποιηθεί η τιμή  $\rho_{ΚΕΣ}$  θα πρέπει επίσης να χρησιμοποιηθεί και η τιμή  $\rho_{στ ΚΕΣ}$  )

Μία εφαρμογή των παραπάνω εννοιών φαίνεται στο Σχ. 2.13. Το πρώτο και το δεύτερο δοχείο έχουν πληρωθεί χρησιμοποιώντας την ίδια συμπίκνωση με ίσου όγκου V ισόκοκκα αδρανή πχ 20 mm το πρώτο 10 mm το δεύτερο. Τα δοχεία που βρίσκονται ακριβώς από κάτω παρουσιάζεται το νερό που απαιτείται για να γεμίσουν τα δοχεία συμπληρώνοντας τα κενά μεταξύ των ισόκοκκων αδρανών με νερό.

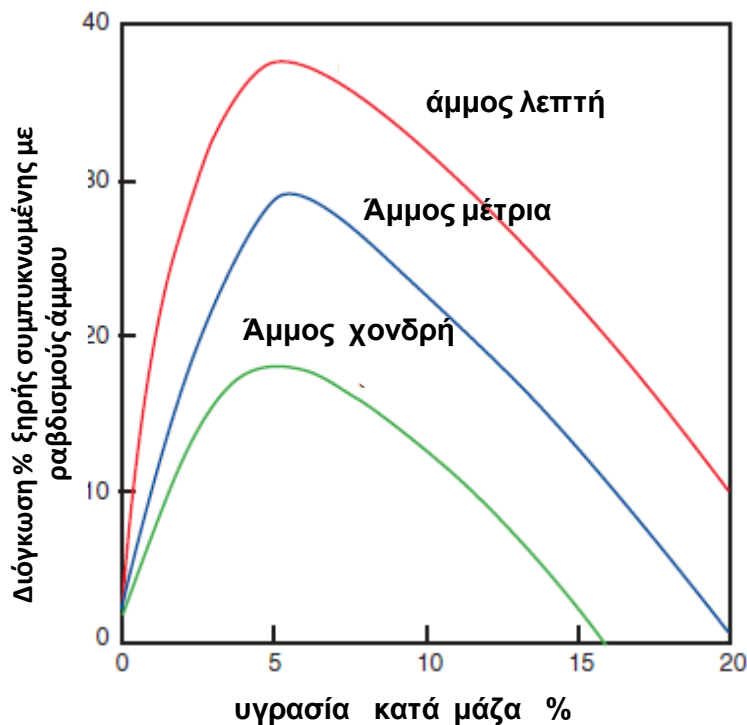


Σχ. 2.13.: Ο όγκος των κενών σε ισόκοκκα αδρανή είναι σταθερός και ανεξάρτητος της διάστασης των αδρανών. Τα κενά ελαττώνονται σημαντικά αν χρησιμοποιηθεί μίγμα αδρανών [Kosmatca et al]

<sup>17</sup> Από τους de Larrard et al στις θεωρίες τους για στοιβαξη αδρανών με τον όρο *compacité* που άστοχα έχει μεταφραστεί στην αγγλική ως *packing density* αφού δεν πρόκειται για πυκνότητα (με διαστάσεις [Μάζα/όγκου]) αλλά απλά για την κατ' όγκο αναλογία των στερεών στο συνολικό όγκο του σωρού δηλ ποσοστό στερεών στο συνολικό όγκο , μέγεθος αδιάστατο (δείκτης συμπίκνωσης ή δείκτης πυκνότητας σωρού)

Παρατηρείται ότι οι ποσότητες του νερού των δύο δοχείων είναι ίσες γεγονός που σημαίνει ότι ο συνολικός όγκος των κενών μεταξύ των αδρανών (και μεταξύ των αδρανών και των τοιχωμάτων του δοχείου) είναι ο ίδιος ανεξάρτητα από το μέγεθος του κόκκου (αρκεί τα αδρανή να είναι ισόκοκκα) (βλ παραγ 4 .1). Αν όμως αναμιχθούν τα αδρανή, όπως γίνεται στο τρίτο δοχείο, τότε το νερό που απαιτείται για να γεμίσει τα κενά είναι σημαντικά λιγότερο από εκείνο των προηγούμενων δοχείων αποδεικνύοντας έτσι ότι το μίγμα έχει ολιγότερα κενά. Αυτό αποτελεί και τη βασική αρχή όλων των θεωριών για τη βέλτιστη σύνθεση του σκυροδέματος (βλ παραγ 4).

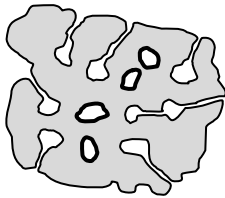
Μία χαρακτηριστική ιδιότητα των λεπτόκοκκων αδρανών (άμμου) είναι η μεταβολή του όγκου που καταλαμβάνουν ανάλογα με την περιεχόμενη υγρασία. Για ορισμένα χαμηλά σχετικώς ποσοστά υγρασίας (μέχρι ~20%) η άμμος καταλαμβάνει μεγαλύτερο όγκο σε σύγκριση με εκείνον που καταλαμβάνει σε ξηρή κατάσταση (βλ Σχ. 2.14). Το φαινόμενο αυτό γνωστό ως "διόγκωση της άμμου" οφείλεται στον υμένα νερού που δημιουργείται γύρω από τους κόκκους και στις επιφανειακές τάσεις που αναπτύσσονται σε ορισμένες χαμηλές σχετικώς υγρασίες και πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στις σπάνιες περιπτώσεις κατ'όγκο δοσομέτρησης της σύνθεσης σκυροδεμάτων. Επισημαίνεται ότι όσο λεπτότεροι είναι οι κόκκοι τόσο η διόγκωση είναι μεγαλύτερη.



Σχ. 2.14 : Διόγκωση άμμου [ Kosmatka et al]

## ΑΠΟΔΕΙΞΕΙΣ ΣΧΕΣΕΩΝ

### Χαρακτηριστικά κόκκου

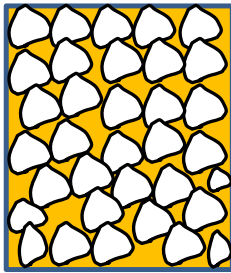


$V_s$  στερεάς μάζας  
 $V_k$  πόρων προσβάσιμων από το νερό  
 $V$  πόρων μη προσβάσιμων από το νερό  
 Δεν λαμβάνονται υπόψη  
 $M$  στερεών

|                   |
|-------------------|
| συνολικά<br>$V_k$ |
| $V_s, M_s$        |

Πυκνότητα κόκκου  $\rho = \frac{M_{\text{στερεών}}}{V_{\text{αδρανούς}}}$  βλ παραγράφους για τις περιπτώσεις  $\rho_{\text{ΚΕΣ}}, \rho_{\text{ξηρ}}, \rho_{\text{φαιν}}$

### Χαρακτηριστικά σωρού κόκκων



$V$  συνολικός όγκος δοχείου  
 $V_s$  όγκος στερεών (λευκή περιοχή)  
 $V_k$  όγκος κενών έγχρωμη (πορτοκαλί) περιοχή  
 $M$  μάζα των στερεών

|  |
|--|
| Συνολικά κενά<br>$V_{\text{κενών}}$                        |
| Συνολικά στερεά<br>$V_{\text{στερεών}} M_{\text{στερεών}}$ |

Πυκνότητα σωρού  $\rho_{\text{στοιβ}} = \frac{M_{\text{στερεώνσωρού}}}{V_{\text{σωρού}}}$

### Δείκτες

#### 1. Λόγος-Δείκτης κενών σωρού ή Πορώδες σωρού $p$

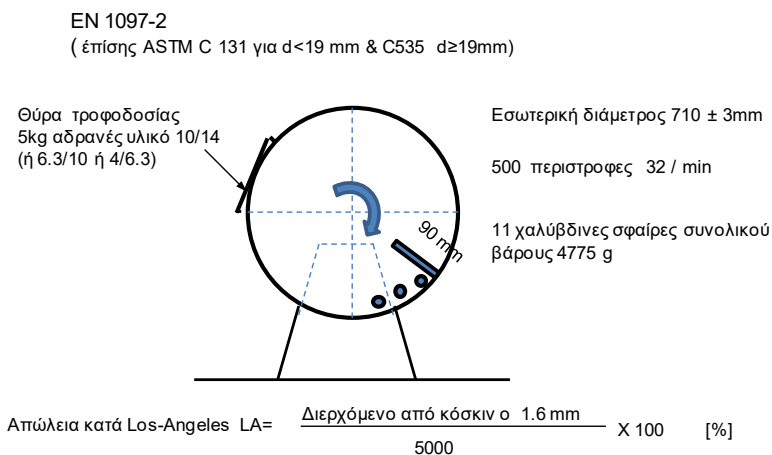
$$p = \frac{V_{\text{κενώνσωρού}}}{V_{\text{στερεώνσωρού}}} = \frac{V_{\text{ολικσωρού}} - V_{\text{στερεώνσωρού}}}{V_{\text{στερεώνσωρού}}} = \frac{V_{\text{ολικώνσωρού}}}{V_{\text{στερεώνσωρού}}} - 1 = \frac{\frac{M_{\text{στερεώνσωρού}}}{\rho_{\text{στοιβ}}}}{\frac{M_{\text{στερεώνσωρού}}}{\rho_{\text{κόκκου}}}} - 1 = \frac{\rho_{\text{στοιβ}}}{\rho_{\text{κόκκου}}} - 1$$

#### 2. Περιεχόμενος αέρας – κενά

$$\alpha = \frac{V_{\text{κενών}}}{V_{\text{ολικ}}} = \frac{V_{\text{ολικ}} - V_{\text{στερ}}}{V_{\text{ολικ}}} = 1 - \frac{V_{\text{στερ}}}{V_{\text{ολικ}}} = 1 - \frac{\frac{M_{\text{στερ}}}{\rho}}{\frac{M_{\text{στερ}}}{\rho_{\text{στοιβ}}}} = 1 - \frac{\rho_{\text{στοιβ}}}{\rho}$$

### 2.3.3 Αντίσταση σε θρυμματισμό – Δοκιμή Los-Angeles

Ποσότητα 5 kg αντιπροσωπευτικού δείγματος 10/14 (ή 6.3/10 ή 4/6.3) περιστρέφεται μέσα σε κυλινδρικό δοχείο που έχει σε ένα σημείο της παράπλευρης επιφάνειάς του μεταλλικό πτερύγιο μήκους 90 mm μαζί με 11 χαλύβδινες σφαίρες βλ Σχ.2.15.



Κατά τις περιστροφές του δοχείου ένα μέρος των σφαιρών και του αδρανούς παρασύρεται από το πτερύγιο και φθάνοντας στο υψηλότερο σημείο της περιστροφής πέφτει πάνω στο υπόλοιπο υλικό που δεν παρασύρθηκε προκαλώντας φθορά από κρούση. Ταυτόχρονα η περιστροφή προκαλεί τριβή των κόκκων του αδρανούς μεταξύ τους αλλά και με τα τοιχώματα του κυλινδρικού δοχείου και με τις μεταλλικές σφαίρες προκαλώντας απότριψη των κόκκων. Μετά το πέρας των 500 περιστροφών κοσκινίζεται με πλύσιμο το αδρανές υλικό που περιέχεται στο δοχείο από το κόσκινο ανοίγματος οπής 1.6 mm. Ο λόγος της μάζας του διερχόμενου υλικού από το κόσκινο οπής 1.6 mm προς τη μάζα του αρχικού υλικού (5 kg) αποτελεί τον Δείκτη Los-Angeles LA (απώλεια κατά Los-Angeles). Όσο μικρότερος είναι ο δείκτης (απώλεια) τόσο μεγαλύτερη αντίσταση έχει το υλικό σε θρυμματισμό από τριβή και κρούση. Συνήθως η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή LA είναι 40% ή 50 %.

Θα πρέπει να διατηρούνται ορισμένες επιφυλάξεις σχετικά με τη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή LA δεδομένου ότι αν το σκυρόδεμα δεν υποστεί πολλές περιστροφές μέσα στο αυτοκίνητο μεταφοράς (βαρέλα) - όπου μπορεί να υποστεί απότριψη - και δεν υφίσταται κατά την λειτουργία του επιπρόσθετα σε τριβή και κρούση, μπορεί να έχει ικανοποιητική συμπεριφορά αν έχει την απαιτούμενη αντοχή, η οποία δεν είναι δύσκολο να επιτευχθεί στις συνήθεις περιπτώσεις..

Μία άλλη παρατήρηση για την δοκιμή αυτή και την χρήση της στο σκυρόδεμα, είναι ότι δεν εξετάζει την αντίσταση του υλικού με παρουσία νερού- όπως είναι οι πραγματικές συνθήκες για την περίπτωση του σκυροδέματος- και ενδεχομένως ορισμένα αδρανή να έχουν μικρότερη αντίσταση με παρουσία νερού. Αυτό σημαίνει ότι η δοκιμή δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την έρευνα των μεταβολών του σκυροδέματος κατά την διάρκεια της ανάμειξης της μεταφοράς και της διάσθρωσης. Η περίπτωση αυτή καλύπτεται από τη δοκιμή

**micro-Deval (MDE)** (αντίσταση σε φθορά), η οποία είναι παρόμοια με την δοκιμή Los-Angeles αλλά εκτελείται με παρουσία νερού (EN1097-1).

### 2.3.4 Παιπάλη – Ποσότητα και Ποιότητα παιπάλης

Η παιπάλη αποτελούμενη από πολύ μικρού μεγέθους κόκκους ( $\leq 0.063\text{mm}$  κατά τα Ευρωπαϊκά πρότυπα,  $\leq 0.075\text{mm}$  κατά τα Αμερικανικά πρότυπα) έχει μεγάλη επιρροή στις ιδιότητες του σκυροδέματος νωπού και σκληρυμένου και για τον λόγο αυτό τίθενται ορισμένοι περιορισμοί ως προς την ποσότητα της στο μίγμα του σκυροδέματος αλλά επιπρόσθετα τίθενται και ορισμένοι κανόνες ως προς την ποιότητά της που αφορούν κυρίως την περιεκτικότητά της σε επιβλαβή υλικά (κυρίως άργιλο). Οι περιορισμοί αυτοί αφορούν πρωτίστως τις συνήθεις περιπτώσεις σκυροδεμάτων διότι υπάρχουν πολλές περιπτώσεις που οι περιορισμοί αυτοί δεν πρέπει να ισχύουν

Ειδικότερα, η ειδική επιφάνεια της παιπάλης είναι πολύ μεγάλη και επομένως οι απαιτήσεις σε νερό αλλά και σε τσιμεντοπολτό (ή άλλο συνδετικό υλικό πχ άσφαλο) αυξάνονται υπέρμετρα για μικρή αύξηση της ποσότητας της παιπάλης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα στα συνηθισμένα σκυροδέματα, χωρίς χημικά πρόσθετα, να αυξάνεται η απαίτηση σε νερό, για σταθερή εργασιμότητα και επομένως αυξάνεται και η απαίτηση σε συνδετικό υλικό, άρα και το κόστος για σταθερή αντοχή. Γενικά όμως οι σχετικώς αυξημένες ποσότητες παιπάλης αυξάνουν την συνοχή του μίγματος και βελτιώνουν την ομοιομορφία του.

Το θέμα είναι αρκετά πολύπλοκο γιατί η παιπάλη μπορεί να έχει ποικίλες δράσεις μέσα στο μίγμα. Οι λεπτοί κόκκοι, όταν έχουν κατάλληλο σχήμα (σφαιρικό), μπορούν να δράσουν και ως μειωτές τριβής μεταξύ των μεγαλύτερων κόκκων των αδρανών επομένως να βελτιώσουν την εργασιμότητα. Υπάρχει επίσης και η περίπτωση με κατάλληλο μέγεθος οι λεπτοί αυτοί κόκκοι να συμπληρώσουν τα κενά μεταξύ των αδρανών ή ακόμη και τα κενά μέσα στο πήγμα ή μεταξύ τσιμέντου και αδρανών-μεταβατική ζώνη (περίπτωση πυριτικής παιπάλης –silica fume ή άλλων παρόμοιων πληρωτικών υλικών (φίλερς)). Στις περιπτώσεις αυτές το πορώδες μειώνεται, με αποτέλεσμα η αντοχή και η ανθεκτικότητα του σκυροδέματος να βελτιώνονται σημαντικά, μόνο από την μηχανική αυτή δράση των υλικών αυτών.

Οι επιφανειακές τάσεις που αναπτύσσονται στους τόσο μικρού μεγέθους κόκκους είναι σημαντικές σε σχέση με τη μάζα τους, με αποτέλεσμα να δημιουργούν συσσωματώματα (κροκυδώματα). Για τον λόγο αυτό η χρήση κατάλληλων χημικών προσθέτων (με επιφανειακή δράση) είναι απαραίτητη για να εξουδετερώσουν τις τάσεις συσσωμάτωσης και να διασπείρουν τους κόκκους.

Σε άλλες περιπτώσεις, όπως στις περιπτώσεις αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος, η μεγάλη ποσότητα υπερ-ρευστοποιητικού πρόσθετου, που χρησιμοποιείται, έχει συχνά σαν αποτέλεσμα το μίγμα να είναι επιρρεπές σε απόμιξη και για τον λόγο αυτό απαιτούνται αυξημένες ποσότητες πρόσμικτου υλικού μεγέθους παιπάλης, το οποίο αυξάνει την συνοχή και μειώνει την τάση απόμιξης.

#### Ποσότητα

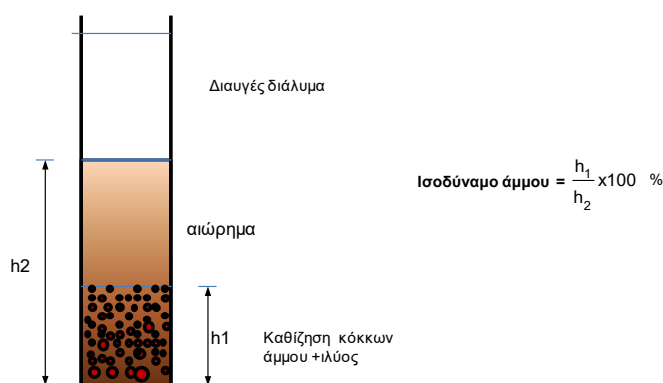
Για τους παραπάνω λόγους οι ποσότητες της παιπάλης που περιέχεται στα αδρανή πρέπει να δηλώνεται από τον παραγωγό των αδρανών τόσο για το χονδρόκοκκο όσο και για το λεπτόκοκκο κλάσμα (βλ ΕΛΟΤ EN 12620). Για το χονδρόκοκκο αδρανές διακρίνονται 3 κατηγορίες με περιεκτικότητα  $\leq 1.5\%$ ,  $\leq 4\%$  και  $>4\%$ . Για το λεπτόκοκκο αδρανές (άμμο) 0/4 διακρίνονται οι ακόλουθες κατηγορίες  $\leq 3$ ,  $\leq 10$ ,  $\leq 16$ ,  $\leq 22$ ,  $>22$ . Στον ΚΤΣ απαιτείται στο χονδρόκοκκο αδρανές το ποσοστό της παιπάλης να είναι μικρότερο από 5% κ.μ ενώ στην άμμο το ποσοστό είναι 16% αν πρόκειται για θραυστή άμμο και 5% αν η άμμος είναι φυσική. Η διάκριση μεταξύ θραυστής και φυσικής άμμου γίνεται διότι στη φυσική άμμο συνήθως η

παιπάλη αποτελείται από ιλύ και άργιλο και η άργιλος είναι γνωστό ότι έχει πολύ βλαβερή επιρροή στην αντοχή και τα άλλα μηχανικά χαρακτηριστικά του σκυροδέματος (συστολή, ερπυσμός, ρηγματώση κ.α). Αντίθετα στη θραυστή άμμο η παιπάλη κανονικά είναι προϊόν απότριψης του πετρώματος και επομένως δεν είναι βλαβερή. Φυσικά πρέπει πάντοτε αυτό να ελέγχεται διότι είναι πιθανόν στην παιπάλη αυτή να υπάρχει και σημαντική ποσότητα αργίλου αν το μέτωπο του πετρώματος δεν είναι καθαρό και περιέχει εναποθέσεις (φλέβες ή φωλεές) αργίλου που μολύνουν το υλικό που προέρχεται από θραύση

### Ποιότητα- Καθαρότητα

Η ποιότητα της άμμου πρέπει πάντοτε να ελέγχεται ως προς την περιεκτικότητα σε άργιλο με τη δοκιμή του ισοδύναμου άμμου SE (ΕΛΟΤ EN 933-8) και τη δοκιμή του μπλε του μεθυλενίου (MB) (ΕΛΟΤ EN 933-9).

Στην **δοκιμή ισοδύναμου άμμου**<sup>18</sup> αντιπροσωπευτική ποσότητα (~122 g) ελαφρώς υγρού δείγματος (υγρασία <2%) 0/2 mm ή 0/4 mm εισάγεται σε δοκιμαστικό διαφανή σωλήνα μαζί με μικρή ποσότητα διαλύματος νερού και ειδικού υγρού που αποτρέπει την δημιουργία συσσωματωμάτων. Ο σωλήνας σφραγίζεται και ανακινείται με οριζόντιες μετακινήσεις κατά τυποποιημένο τρόπο και επί ορισμένο χρονικό διάστημα ώστε οι αργιλικές επικαλύψεις των κόκκων και οι σβώλοι αργίλου να διαλυθούν. Στη συνέχεια ο κύλινδρος αποσφραγίζεται και εισάγεται στη μάζα του δείγματος σωλήνας από τον οποίο εισάγεται διάλυμα υπό σταθερή πίεση έτσι ώστε όλοι οι λεπτοί κόκκοι να αποχωριστούν από τους άλλους κόκκους και να ανέλθουν στη επιφάνεια. Η εισαγωγή του διαλύματος σταματάει όταν η στάθμη φθάσει σε προκαθορισμένο ύψος του σωλήνα. Ο κύλινδρος αφήνεται ακίνητος ώστε το αιώρημα να βρίσκεται σε ηρεμία για 20min και στη συνέχεια μετρούνται τα h1 και h2, βλ Σχ.2.16. Το ισοδύναμο άμμου SE είναι ο λόγος του ύψους της "άμμου" h1 προς το συνολικό ύψος h2 (αιώρημα +καθίζηση). Όσο μεγαλύτερο είναι το SE τόσο το ποσοστό της άμμου είναι μεγαλύτερο και το αδρανές είναι καταλληλότερο για σκυρόδεμα. Κατά τον ΚΤΣ (ΕΛΟΤ 408) για συνήθεις συνθήκες min SE=65% και για συνθήκες επιμελημένης κατασκευής ή δυσμενών περιβαλλοντικών επιδράσεων min SE=70%



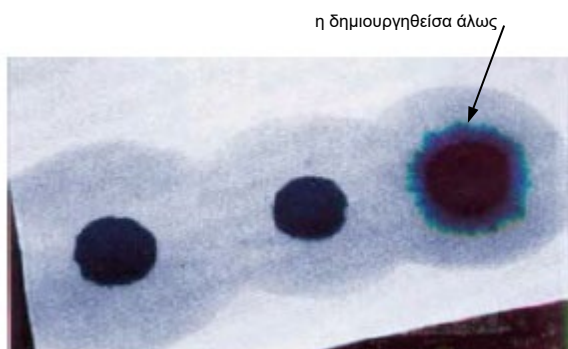
Σχ. 2.16: Αρχή δοκιμής ισοδύναμου άμμου

Η δοκιμή του **μπλε του μεθυλενίου** στηρίζεται στο γεγονός ότι η περιεχόμενη στο αδρανές άργιλος δεσμεύει το μπλέ του μεθυλενίου. Έτσι σε μίγμα νερού και αντιπροσωπευτικού δείγματος αδρανών 0/2mm ή 0/0.125 mm προστίθενται και αναμιγνύονται διαδοχικά

18 sand equivalent, , equivalent de sable, Sanadequivalent -Verfahren



μετρούμενες ποσότητες διαλύματος μπλε του μεθυλενίου. Μετά το πέρας κάθε ανάμιξης αφήνεται να πέσει πάνω σε φύλλο απορροφητικού χαρτιού μία σταγόνα του αιωρήματος (μίγματος νερού αδρανούς και διαλύματος μπλε του μεθυλενίου). Όταν μετά από διαδοχικές αυξήσεις της ποσότητας του διαλύματος μπλέ του μεθυλενίου δημιουργηθεί γύρω από τη σταγόνα μία χαρακτηριστική άλως (στεφάνη) μπλέ χρώματος βλ Σχ.2.17 (3<sup>η</sup> εξ αριστερών σταγόνες) και η άλως αυτή παραμένει αναλλοίωτη για 5 min, θεωρείται ότι όλη η περιεχόμενη άργιλος εδέσμευσε/προσρόφησε το προστιθέμενο μπλε του μεθυλενίου και ότι υπάρχει πλέον περίσσεια αυτού που δεν υπάρχει άργιλος να το προσροφήσει. Η ποσότητα αυτή V1 σημειώνεται και εκφράζεται ως ο λόγος V1 (g διαλύματος) που προσροφήθηκε ανά M1 (g μάζας του αδρανούς)



Σχ 2.17 : Εικόνες σταγόνων μίγματος νερού αδρανούς και διαλύματος μπλέ του μεθυλενίου πάνω σε απορροφητικό χαρτί με 3<sup>ο</sup> από αριστερά τον σχηματισμό χαρακτηριστικής στεφάνης (άλω) μπλε χρώματος.

Η δοκιμή ισοδυναμίου άμμου έχει το μειονέκτημα ότι μπορεί να προσμετρήσει ως άργιλο και λεπτούς κόκκους από προϊόν απότριψης των αδρανών. Έτσι ένα μικρό SE δεν σημαίνει ότι το λεπτόκοκκο κλάσμα του αδρανούς είναι αργιλικό αλλά μπορεί να περιέχει κόκκους πολύ μικρού μεγέθους που δεν είναι αργιλικοί και δεν είναι βλαβεροί. Αντίθετα το μπλέ του μεθυλενίου προσροφάται μόνο από κόκκους αργίλου και με την δοκιμή προσδιορίζεται η περιεκτικότητα των βλαβερών αυτών κόκκων. Για τον λόγο αυτό το Πρότυπο ΕΛΟΤ EN 12620 προβλέπει ότι η παιπάλη δεν θεωρείται επιβλαβής όταν ισχύει κάποια από τις ακόλουθες 4 συνθήκες

- 1 Η περιεκτικότητα σε κλάσμα < 0,063 mm είναι <3%
- 2 SE > από τιμή που προβλέπεται στις εθνικές διατάξεις
- 3 MB < από τιμή που προβλέπεται στις εθνικές διατάξεις
- 4 Όταν η εμπειρία στη περιοχή χρήσης παρέχει βεβαιότητα για ικανοποιητική επιτελεστικότητα

### 3 ΣΥΝΘΕΣΗ ΑΔΡΑΝΩΝ - ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗ - ΘΕΩΡΙΕΣ ΣΤΟΙΒΑΓΜΑΤΟΣ

#### 3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗ

Η σημασία της διαβάθμισης των αδρανών για την βελτιστοποίηση των ιδιοτήτων του σκυροδέματος σε νωπή και σκληρυμένη κατάσταση είχε αναγνωριστεί ήδη από τα τέλη του 19<sup>ου</sup> αιώνα [Ferret 1892]. Από τότε είχε αναγνωριστεί η σημασία της ύπαρξης κόκκων διαφόρων μεγεθών έτσι ώστε οι μικρότεροι κόκκοι να συμπληρώνουν τα κενά που δημιουργούν οι μεγαλύτεροι. Το 1907 οι Fuller και Thomson πρότειναν τη γνωστή και ευρύτατα χρησιμοποιούμενη ακόμη και σήμερα σχέση, που πρέπει να συνδέει το διερχόμενο ποσοστό ενός κόκκου μεγέθους  $d$  με το μέγεθος του μέγιστου κόκκου  $D$  για να έχει το μίγμα την **βέλτιστη κοκκοδιαβάθμιση** .ώστε να εξασφαλίζεται το μικρότερο ποσοστό κενών.

$$p = \left(\frac{d}{D}\right)^{0.5} \quad (1)$$

Πχ για μέγιστο κόκκο  $D=31.5$  mm το ποσοστό των κόκκων διάστασης  $d$ : 16, 8, 4 και 2 mm είναι αντίστοιχα : 71.3%, 50.4%, 35.6%, 25.2% (βλ Σχ.2.8 §2.2.4 καμπύλη Α).

Αργότερα 1930 οι Adreasen και Adersen πρότειναν γενικευμένη σχέση όπου ο εκθέτης δεν ήταν σταθερός στην τιμή 0.5 αλλά πρότειναν ανάλογα με τη μορφή των κόκκων τη σχέση

$$p = \left(\frac{d}{D}\right)^q \quad (2)$$

όπου οι συνιστώμενες τιμές του εκθέτη  $q$  είναι από 0.3 έως 0.5 με μικρότερες τιμές για γωνιώδη αδρανή με ανώμαλες επιφάνειες. Ο εκθέτης  $q$  επηρεάζει το ποσοστό των λεπτόκοκκων υλικών στο μίγμα: όσο μικρότερος είναι, τόσο το ποσοστό των λεπτόκοκκων είναι μεγαλύτερο (βλ Σχ.2.8 §2.2.4 καμπύλη Α και καμπύλη Β). Αυτό αποδίδεται στο γεγονός ότι όσο πιο ανώμαλη και γωνιώδης είναι η επιφάνεια των κόκκων τόσο τα κενά είναι περισσότερα και απαιτείται μεγαλύτερη ποσότητα λεπτών κόκκων για να γεμίσουν τα κενά αυτά. Μία σύγχρονη εξέλιξη στον τομέα αυτόν αποτελεί η πρόταση των Funk & Dinger το 1980 (που αρχικά αναπτύχθηκε για μίγματα ορυκτού άνθρακα) κατά την οποία πρέπει στις παραπάνω σχέσεις να ληφθεί υπόψη όχι μόνο η μέγιστη διάσταση  $D_{max}$  των κόκκων αλλά και η ελάχιστη  $d_{min}$  που περιέχονται στο μίγμα των αδρανών σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$p = \frac{d^q - d_{min}^q}{D_{max}^q - d_{min}^q} \quad (3)$$

με τιμή εκθέτη  $q=0.37$

Οι εμπειρικές αυτές σχέσεις δεν έχουν την δυνατότητα να λάβουν υπόψη τους στον απαιτούμενο βαθμό την επίδραση της τραχύτητας της επιφάνειας (λεία, ανώμαλη, τραχιά ) και της μορφής/σχήματος των κόκκων (σφαιρικοί , πεπλατυσμένοι, βελονοειδείς) ούτε τις αλληλεπιδράσεις των κόκκων μεταξύ τους, φαινόμενα τα οποία λαμβάνουν υπόψη τους οι θεωρίες στοιβάγματος των αδρανών (βλ παρ.4). Για τον λόγο αυτό η χρήση των παραπάνω σχέσεων είναι προσεγγιστική παρόλη την ευρεία μέχρι σήμερα εφαρμογή τους. Ο Powers με τις εκτεταμένες εργαστηριακές του έρευνες στον τομέα αυτό(1968) άσκησε δριμεία κριτική

στην γενικευμένη χρήση των σχέσεων αυτών και στην υποχρεωτική εφαρμογή τους που έθεταν ορισμένες Προδιαγραφές και Κανονισμοί. Επιπλέον έθεσε νέα σημαντική ώθηση στην ανάπτυξη νέων θεωριών στον τομέα αυτό που είναι γνωστές ως **θεωρίες στοιβάγματος αδρανών**, οι οποίες στηρίζονται σε εργαστηριακές μετρήσεις κυρίως του φαινομένου πυκνότητας στοιβάγματος σωρού (βλ Παρ4) . Η βάση των θεωριών αυτών είναι η πρώτη αναλυτική προσέγγιση της ανάμιξης δύο διαφορετικής διάστασης ισόκοκκων κλασμάτων αδρανών που παρουσιάστηκε ήδη από το 1929 από τον Furnas (βλ παρ4.4).

Η ραγδαία ανάπτυξη των υπολογιστών συνέβαλε και στη ανάπτυξη νέων μεθόδων διερεύνησης του θέματος της στοιβαξης αδρανών κατά τυχαίο τρόπο: **των τρισδιάστατων υπολογιστικών προσομοιωμάτων στοιβαξης αδρανών** τα οποία βρίσκονται ακόμη στο στάδιο της ανάπτυξης και δεν έχουν φτάσει ακόμη σε προτάσεις εφαρμογής.

### 3.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗΝ ΠΡΑΞΗ - ΖΩΝΕΣ ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΩΝ ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΕΩΝ

Στην πράξη το πρόβλημα τις βέλτιστης κοκκοδιαβάθμισης αντιμετωπίζεται από τις Προδιαγραφές και τις Οδηγίες παρασκευής σκυροδέματος που εφαρμόζουν διάφορα κράτη και οργανισμοί. Οι οδηγίες αυτές περιλαμβάνουν διαβαθμίσεις ή όρια διαβαθμίσεων προσαρμοσμένες στα συνήθη αδρανή της χώρας και τις μεθόδους παρασκευής και σκυροδέτησης. Ακολουθώντας τις διαβαθμίσεις που προδιαγράφονται εξασφαλίζεται σε μεγάλο βαθμό ότι το σκυρόδεμα που θα παραχθεί θα έχει επαρκή εργασιμότητα και σταθερότητα (δεν θα απομεινύεται) ώστε να έχει την δυνατότητα επίτευξης της απαιτούμενης αντοχής εφόσον τηρηθούν και οι απαιτήσεις για τον ελάχιστο λόγο N/T. Παλαιότερα οι οδηγίες αυτές ήταν υποχρεωτικές<sup>19</sup> ενώ σήμερα πρέπει να είναι απλώς συμβουλευτικές, όπως προβλέπει η νέα αναθεώρηση του ΚΤΣ 2016 .

Στα Σχ. 2.1 παρουσιάζονται οι συνιστώμενες κοκκομετρικές διαβαθμίσεις κατά τον ΚΤΣ/2016 για αδρανή μέγιστου κόκκου 31.5 mm. Ανάλογα διαγράμματα προβλέπονται για μέγιστο κόκκο 63, 16 και 8 mm Διακρίνονται οι ζώνες Δ,Ε και Ζ. Η ζώνη Ζ χρησιμοποιείται για άοπλο σκυρόδεμα. Για οπλισμένο σκυρόδεμα η διαβάθμιση πρέπει να βρίσκεται στην ζώνη Δ εκτός από την περίπτωση αντλητού σκυροδέματος κατά τη οποία η διαβάθμιση μπορεί να είναι εν μέρει ή εν όλω στην ζώνη Ε. Ο εργοδότης, η επίβλεψη ή η Υπηρεσία μπορεί να προδιαγράψει διαβάθμιση εντός της ζώνης Ε. Και οι δύο αυτές εξαιρέσεις επιτρέπονται για σκυροδέματα κατηγορίας C30/37 και κατώτερης. Οι περιορισμοί αυτοί αποτελούν απλώς "διευκολυντικές για τον παραγωγό" υποδείξεις.

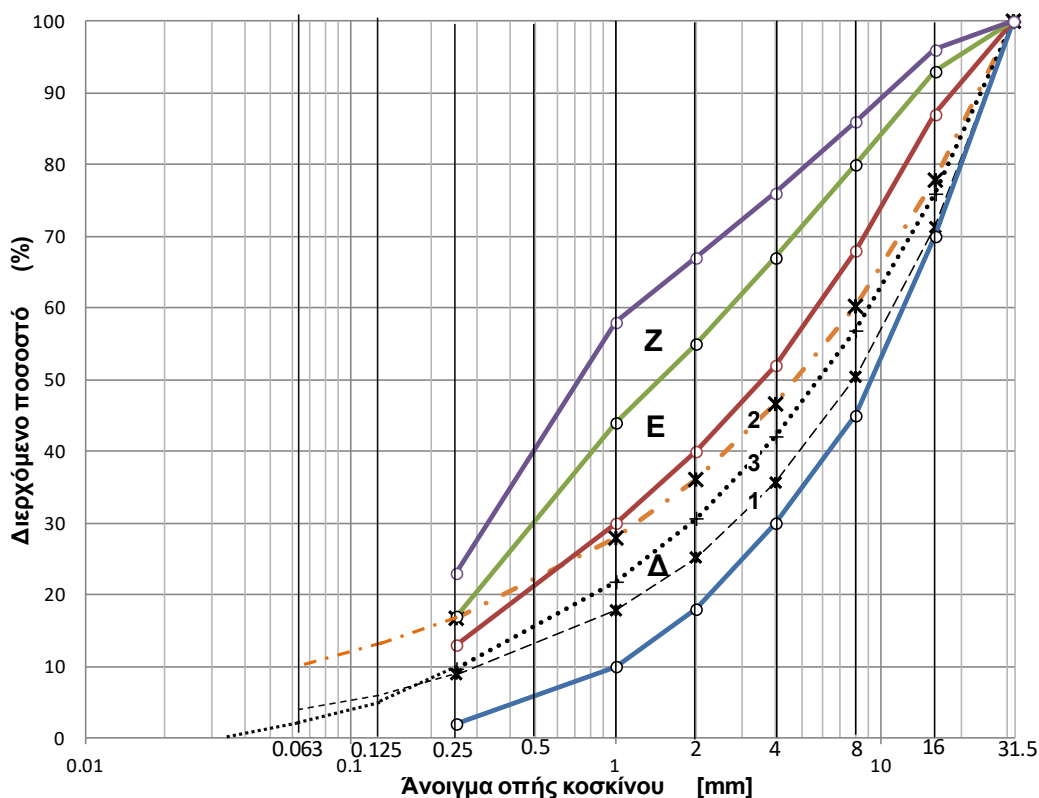
Στο ίδιο σχήμα παρουσιάζονται και οι διαβαθμίσεις σύμφωνα με τις σχέσεις

- (1) Fuller με εκθέτη 0.5
- (2) Adreasen με εκθέτη 0.37 και
- (3) Funk με ελάχιστο κόκκο 0.0315 mm και εκθέτη 0.37

Η καμπύλη (3)(Funk) βρίσκεται περί το μέσον της ζώνης Δ ενώ η (1) (Fuller) βρίσκεται κάτω του μέσου για μεγέθη κόκκων μέχρι 1mm και η καμπύλη (2) βρίσκεται στο πάνω μέρος της ζώνης Δ. Και οι τρεις διαβαθμίσεις διακρίνονται για τα υψηλά ποσοστά κόκκων μεγέθους

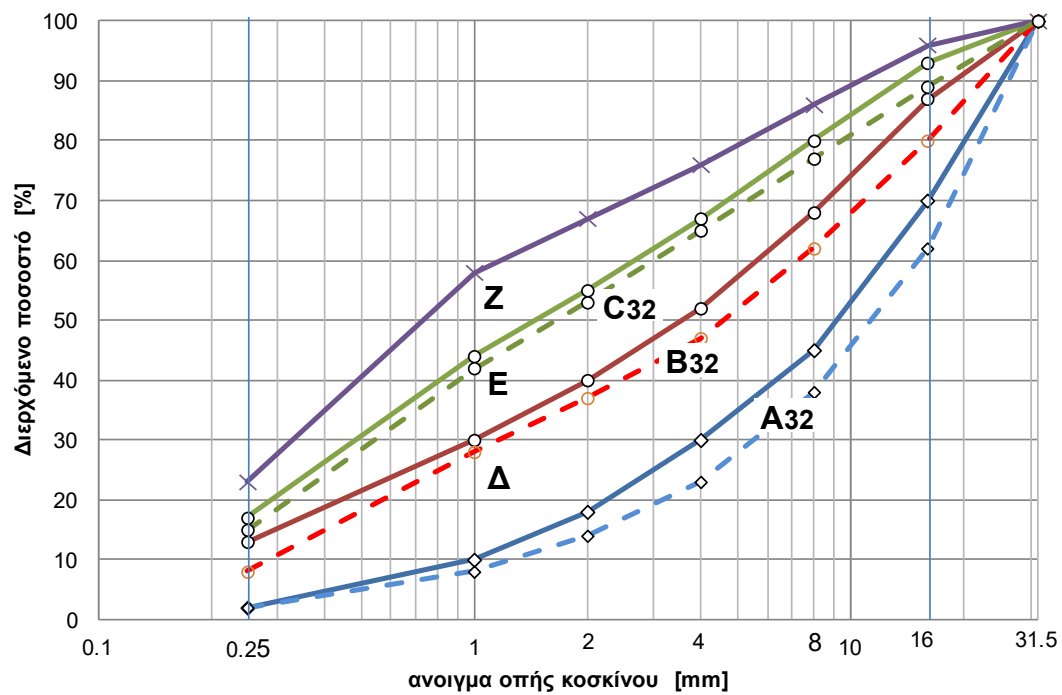
<sup>19</sup> Οι Προδιαγραφές αυτές ήταν **προδιαγραφές μεθόδου παρασκευής/κατασκευής** στις οποίες οι προδιαγραφόμενοι όροι και οδηγίες έπρεπε να τηρηθούν. Σήμερα οι προδιαγραφές είναι συνήθως **προδιαγραφές τελικού προϊόντος (επιτελεστικότητας)** κατά τις οποίες προδιαγράφονται οι απαιτούμενες ιδιότητες ή η συμπεριφορά (επιτελεστικότητα) η τήρηση των οποίων ελέγχεται, ενώ η μέθοδος ( αναλογίες σύνθεσης ) που ο παραγωγός /κατασκευαστής ακολουθεί είναι θέμα δικής του επιλογής. Σημειώνεται ότι οι προδιαγραφές τελικού προϊόντος δίνουν την δυνατότητα χρησιμοποίησης νέων προϊόντων (χημικά πρόσθετα, πρόσμικτα κλπ) καθώς και νέων μεθόδων και συσκευών, που η συνεχής τεχνική πρόοδος παρέχει, ενώ οι προδιαγραφές μεθόδου δεν επέτρεπαν τέτοιου είδους εξελίξεις και αποτελούσαν στην ουσία φραγμό κάθε τεχνολογικής πρόοδου στο τομέα του σκυροδέματος.

μικρότερου από 1 mm υποδεικνύοντας την ανάγκη παρουσίας μικρών κόκκων για πλήρωση των κενών που σχηματίζουν οι μεγαλύτεροι κόκκοι. Στην περίπτωση των Ελληνικών αδρανών, που στην πλειοψηφία τους είναι θραυστά και επομένως με ανώμαλες τραχιές επιφάνειες και σχήμα που απέχει του κυβικού ή σφαιρικού, πιστεύεται ότι θα πρέπει να χρησιμοποιείται εκθέτης  $q$  μικρότερος του 0.37 (πολύ πιθανόν  $q \approx 0.3$ )



Σχ. 3.1: Όρια διαβαθμίσεως αδρανών σκυροδέματος κατά τον ΚΤΣ /97 και θεωρητικές καμπύλες διαβάθμισης

Στο Σχ. 3.2 συγκρίνονται οι διαβαθμίσεις που προβλέπονται στον ΚΤΣ/97 και DIN 1045 για αδρανή με  $D_{max}=31.5$  mm. Τα διαχωριστικά όρια του παλαιού DIN 1045 παρουσιάζονται με διακεκομμένες γραμμές ( $A_{32}$ ,  $B_{32}$ ,  $C_{32}$ ) και διακρίνουν δύο περιοχές ανάλογες των Δ και Ε του ΚΤΣ : "συνιστώμενη" η κατώτερη και "χρησιμοποιήσιμη" η ανώτερη. Περιοχή Ζ (δηλ άνω όριο της Ζ) δεν προβλέπεται στο παλαιό DIN1045. Παρατηρείται ότι τα όρια γενικά δεν διαφέρουν σημαντικά. Οι ζώνες Δ και Ε του ΚΤΣ βρίσκονται υψηλότερα εκείνων του DIN 1045 γεγονός που δικαιολογείται από το ότι τα ελληνικά αδρανή είναι στην πλειοψηφία τους θραυστά με γωνιώδεις μη κανονικού σχήματος κόκκους με τραχιά και ανώμαλη επιφάνεια. Επισημαίνεται ότι κατά το DIN 1045 μπορούν να χρησιμοποιηθούν και διαβαθμίσεις που δεν βρίσκονται στις προβλεπόμενες περιοχές αλλά τονίζεται ότι η αναγκαία ποσότητα τσιμέντου θα είναι μεγαλύτερη της συνήθους όταν η διαβάθμιση βρίσκεται ψηλότερα από την γραμμή  $C_{32}$  και το μίγμα θα έχει πολύ μικρή εργασιμότητα για διαβαθμίσεις κάτω της  $A_{32}$ .



Σχ.3.2 : Σύγκριση διαβαθμίσεων αδρανών ΚΤΣ/97 και παλαιού DIN 1045 με  $D_{max} = 31.5$  mm

### 3. ΘΕΩΡΙΕΣ ΣΤΟΙΒΑΓΜΑΤΟΣ ΑΔΡΑΝΩΝ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

#### 4.1 Γενικές αρχές

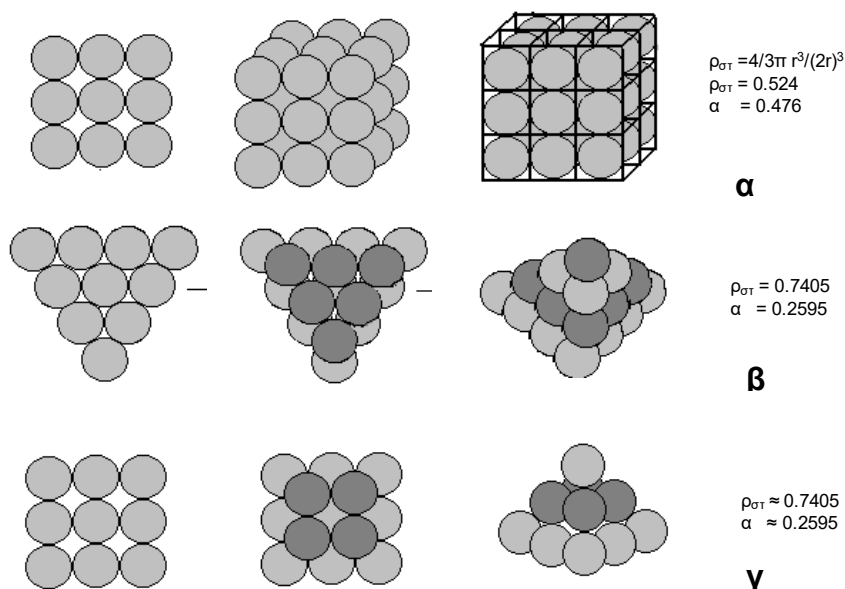
Οι θεωρίες στοιβάγματος των αδρανών αποσκοπούν στον καθορισμό των αναλογιών σύνθεσης των διαφόρων κλασμάτων των αδρανών έτσι ώστε μαζί με το τσιμέντο και τα άλλα στερεά πρόσμικτα, που ενδεχομένως μπορεί να χρησιμοποιηθούν, να αποτελέσουν μία βέλτιστη σύνθεση για το σκυρόδεμα από απόψεως μηχανικών χαρακτηριστικών, κόστους και ευκολίας διάστρωσης και συμπίκνωσης (εργασιμότητας).

Ειδικότερα τα αδρανή πρέπει να συνιστούν ένα "σύμπλεγμα" με τα μικρότερα συνολικά κενά και το τσιμέντο με τα άλλα πρόσθετα στερεά υλικά να γεμίζουν τα κενά αυτά και ταυτόχρονα να σχηματίζουν γύρω από τα αδρανή έναν υμένα ικανού πάχους για να εξασφαλίζεται η συνεργασία των αδρανών με το συνδετικό υλικό σε σκληρυμένη κατάσταση, ενώ παράλληλα, σε νωπή κατάσταση, να διευκολύνεται η μετακίνηση των κόκκων και να εξασφαλίζεται επαρκής εργασιμότητα. Δεν είναι ακόμη εξακριβωμένο ότι οι δύο αυτές απαιτήσεις μπορούν να ικανοποιηθούν ταυτόχρονα αλλά η απαίτηση της κατάλληλης εργασιμότητας είναι αδύνατον να αγνοηθεί και αυτό είναι ένα σημείο περαιτέρω βελτίωσης των υπαρχόντων "συστημάτων βέλτιστης σύνθεσης" (βέλτιστου στοιβάγματος)

#### 4.2 Στοιβάγμα σφαιρών ίδιας διαμέτρου

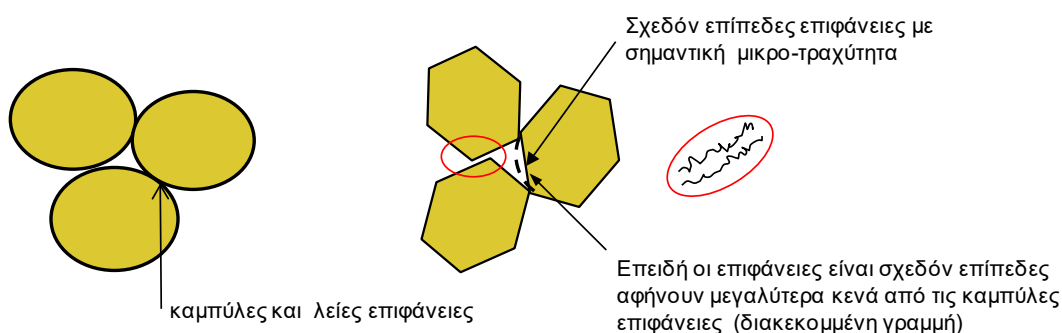
Δεν είναι δυνατόν να αναφερθούν πλήρως όλα τα "συστήματα" και οι θεωρίες βέλτιστης σύνθεσης αλλά θα γίνει μία περιληπτική παρουσίαση των κυριότερων σημείων αρχίζοντας από το απλούστερο στην πράξη (αλλά όχι στην θεωρητική επίλυση) της διερεύνησης των τρόπων στοιβάγματος σφαιρών της ίδιας διαμέτρου (βλ Σχ. 4.1).

Όπως φαίνεται στο Σχ1 η πρώτη διάταξη (Σχ1α) έχει κενά 47.6% ενώ δεύτερη (Σχ.4.1β) και η τρίτη (Σχ.4.1γ) 25.9% ανεξάρτητα από το μέγεθος της διαμέτρου της σφαίρας.



Σχ. 4.1: Τρόποι τοποθέτησης/στοιβάγματος σφαιρών της ίδιας διαμέτρου και τα κενά που δημιουργούνται από τις διατάξεις αυτές.

Πρακτική συνέπεια της παραπάνω παρατήρησης είναι ότι ισόκοκκα αδρανή έχουν τα ίδια συνολικά κενά ανεξάρτητα μεγέθους κόκκου (βλ Σχ.2.13 Παρ.2.3.2 Πυκνότητα). Τα φυσικά αδρανή που προέρχονται από ποτάμια ή λίμνες ή άλλες αποθέσεις, τα οποία έχουν συνήθως στρογγυλεμένο σχήμα και λεία επιφάνεια έχουν σε συμπυκνωμένη κατάσταση κενά 0.40 έως 0.36 σε αντίθεση με τα θραυστά ισόκοκκα τα οποία έχουν 0.47 έως 0.42. Η διαφορά αυτή αποδίδεται στην μεγαλύτερη τραχύτητα και κατά συνέπεια μεγαλύτερη τριβή που αναπτύσσουν τα θραυστά αδρανή και στην "επιπεδότητα" των επιφανειών τους βλ Σχ.4.2.



Σχ. 4.2. : Τα θραυστά ισόκοκκα αδρανή παρουσιάζουν μεγαλύτερα κενά από τα συλλεκτά αδρανή που δεν έχουν υποστεί θραύση

Η ίδια αρχή μπορεί να επεκταθεί και σε ομάδες αδρανών με παρόμοια διαβάθμιση αλλά με διαφορετικό μέγεθος κόκκων πχ ομάδα Α με μεγέθη από  $d_1$  σε  $d_2$  και ομάδα Β με μεγέθη από  $D_1$  σε  $D_2$  (όπου  $d_2/d_1 = D_2/D_1$ ) θα έχουν περίπου τα ίδια κενά όσο περισσότερο

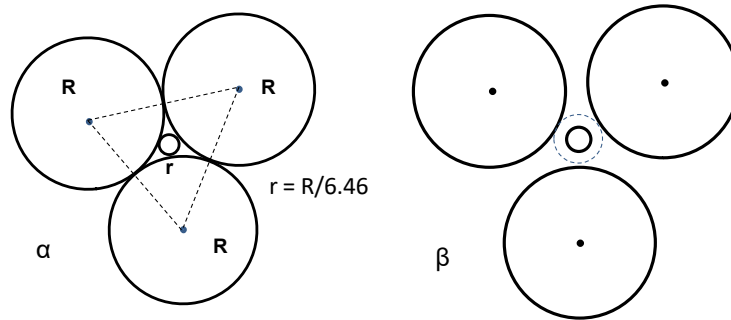
- οι επιμέρους διαβαθμίσεις τους ( $d_1-d_2$  και  $D_1-D_2$ ) είναι παρόμοιες,
- το γεωμετρικό τους σχήμα είναι παρόμοιο,
- η επιφανειακή τους τραχύτητα είναι παρόμοια

και φυσικά συμπυκνώνονται με την ίδια μέθοδο.

### 4.3 Ανάμιξη σφαιρών ή κόκκων διαφορετικών διαστάσεων. Λόγοι απόκλισης των μιγμάτων που χρησιμοποιούνται στην πράξη από τα θεωρητικά προβλεπόμενα

Στην περίπτωση που μπορεί να χρησιμοποιηθούν και σφαίρες μικρότερης διαμέτρου είναι λογικά επόμενο να αναζητηθεί<sup>20</sup> η διάμετρος εκείνη της μικρότερης σφαίρας που θα "χωράει" ανάμεσα στα κενά που δημιουργούν τρεις σφαίρες μεγαλύτερης διαμέτρου που εφάπτονται μεταξύ τους (Σχ. 4.3)

<sup>20</sup> Γνωστό ως Απολλώνιο πρόβλημα



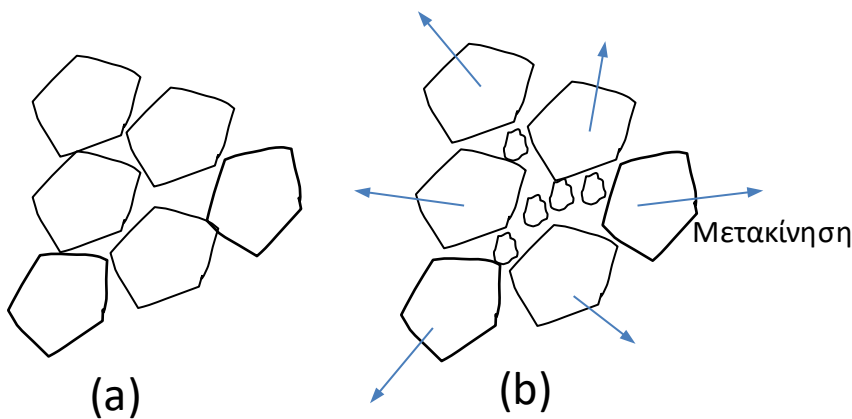
Σχ. 4.3: Σχέση μεταξύ της διαμέτρου τριών εφαιπτόμενων σφαιρών (κύκλων) και της διαμέτρου της σφαίρας που εφάπτεται στις τρεις (3α). **Φαινόμενο παρεμβολής** (3β)

Αποδεικνύεται ότι η μικρότερη σφαίρα έχει ακτίνα

$$r = \left(\frac{2}{\sqrt{3}} - 1\right)R \approx \frac{R}{6.46}$$

Στην πράξη όμως ένας κόκκος με ακτίνα ίση με  $R/6.46$  δεν είναι δυνατόν να εισχωρήσει μεταξύ των μεγάλων σφαιρών χωρίς να τις εκτοπίσει προκαλώντας μία διαταραχή στο στοίβαγμα των μεγάλων σφαιρών και μείωση της φαινόμενης πυκνότητας στοίβαγματος  $\rho_{στ}$ , όπως φαίνεται στο Σχ. 4.3β.

Η διατάραξη στη δομή των αδρανών που προκαλείται από την ανάμιξη αδρανών διαφορετικού μεγέθους, **φαινόμενο παρεμβολής**<sup>21</sup> (Σχ 4.3β, Σχ.4.4), εξαρτάται φυσικά πρωτίστως από τη σχέση μεγέθους των αδρανών επηρεάζεται όμως και από το σχήμα των κόκκων, την αδρότητα της επιφάνειάς τους και την μέθοδο συμπίκνωσης. Συνοδεύεται από μία μετακίνηση των κόκκων -διόγκωση/διαστολή του όγκου- και από μερική ή ολική απώλεια επαφής των μεγάλων κόκκων που υπήρχε αρχικά



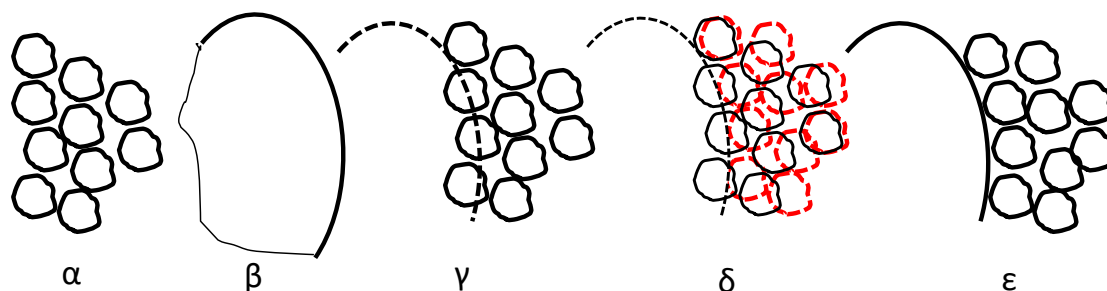
Σχ. 4.4: Διαταραχή στη δομή των κόκκων (α) από την εισχώρηση μικρότερων κόκκων στα κενά μεταξύ τους (β) . **Φαινόμενο παρεμβολής**

Συναφές είναι επίσης και το **φαινόμενο της παρειάς**<sup>22</sup> για το οποίο ήδη έχει γίνει αναφορά στο κεφάλαιο περί Τσιμέντου για την Διεπιφανειακή Μεταβατική Ζώνη (ΔΜΖ). Το φαινόμενο αυτό αφορά την διαταραχή που υφίσταται η δομή μικρού μεγέθους κόκκων όταν παρεμβληθεί η παρειά ενός καλουπιού ή ενός σχετικά μεγάλου κόκκου, Σχ.4.5.

<sup>21</sup> Desserrement, Particle interference (particle dilation)

<sup>22</sup> Effet de paroi, wall effect





Σχ. 4.5 : Διατάραξη της δομής(διάταξης) των κόκκων (α) με την παρεμβολή κόκκου μεγάλης σχετικώς διάστασης (β) ή μεγάλης διαχωριστικής επιφάνειας (καλούπι). Φαινόμενο παρειάς.

Όπως φαίνεται στο Σχ4, ο εξαναγκασμός των μικρής διάστασης κόκκων να αναδιαταχθούν έτσι ώστε να είναι σε επαφή με την επιφάνεια του μεγάλου κόκκου (Σχ.4.5 γ,δ και ε) προκαλεί αύξηση των κενών σε μία περιοχή κοντά στον μεγάλο κόκκο

Το φαινόμενο είναι εντονότερο (μεγαλύτερα κενά) κοντά στην επιφάνεια του μεγάλου αδρανούς και ελαττώνεται σε μεγαλύτερες αποστάσεις. Εξαρτάται από τη σχέση των διαστάσεων του μεγάλου αδρανούς  $D$  προς τα μικρά  $d$ , από τα μεταξύ τους ποσοστά ανάμιξης και από άλλους παράγοντες όπως σχήμα κόκκων, τραχύτητα επιφάνειας κόκκων κ.α . Έχουν αναφερθεί βάθη διαταραχής από  $0.5d$  έως  $12d$ . ( Dewar). Άρα η διατάραξη της δομής των κόκκων  $d$  και επομένως το μέγεθος του φαινομένου παρειάς, ελαττώνεται όσο ο λόγος  $d/D$  μικραίνει.

Τα τοιχώματα των τύπων/καλουπιών είναι σημαντικός παράγοντας δημιουργίας του φαινομένου παρειάς και κυρίως επηρεάζεται από τον λόγο της διάστασης των αδρανών προς την μικρότερη διάσταση του καλουπιού.

Για  $d/D < 0.2$  το φαινόμενο παρειάς πιστεύεται ότι είναι ανάλογο- ή περίπου ανάλογο- με την επιφάνεια των μεγάλων κόκκων ή της παρειάς και αθροίζεται γραμμικά δηλ αν διπλασιαστεί η επιφάνεια των μεγάλων κόκκων διπλασιάζεται και το φαινόμενο παρειάς. Αντίθετα το φαινόμενο της παρεμβολής δεν φαίνεται να είναι γραμμικό

#### 4.4 Στοίβαγμα δύο ισόκοκκων υλικών διαφορετικού μεγέθους $d, D$ (Furnas 1929, Powers 1968)

Η θεώρηση αυτή αποτελεί την βάση όλων των εξελεγμένων μεθόδων επιλογής της βέλτιστης σύνθεσης σκυροδέματος.

Ας θεωρηθεί ότι αναμειγνύονται δύο ομάδες ισόκοκκων αδρανών διαστάσεων  $D$  και  $d$  με σχετικά μεγάλη διαφορά μεγέθους σε ένα δοχείο με αρκετά μεγάλες διαστάσεις σε σχέση με τους κόκκους των αδρανών έτσι ώστε να είναι δυνατόν στο κεντρική περιοχή του δοχείου το μίγμα να μην επηρεάζεται από το φαινόμενο παρειάς των επιφανειών του δοχείου. Σε κάθε περίπτωση τα αδρανή συμπυκνώνονται με την ίδια μέθοδο.

Έστω ότι ο δείκτης κενών (πορώδες σωρού) του χονδρότερου αδρανούς είναι  $\rho_0$  και του λεπτότερου  $\rho_1$ .<sup>23</sup> και ότι οι κατ'όγκο (κ.ο) αναλογίες χονδρού ( $\chi$ ) και λεπτού στερεού υλικού

<sup>23</sup> Κανονικά επειδή τα αδρανή είναι ισόκοκκα θα πρέπει να είναι  $\rho_0 \approx \rho_1$  αλλά στη γενική περίπτωση τα αδρανή της πρώτης ομάδας μπορεί να είναι από διαφορετική πηγή από εκείνη της δεύτερης ομάδας (διαφορετικό σχήμα, επιφάνεια, μικροτραχύτητα) οπότε οι δείκτες πόρων δεν είναι ίσοι.

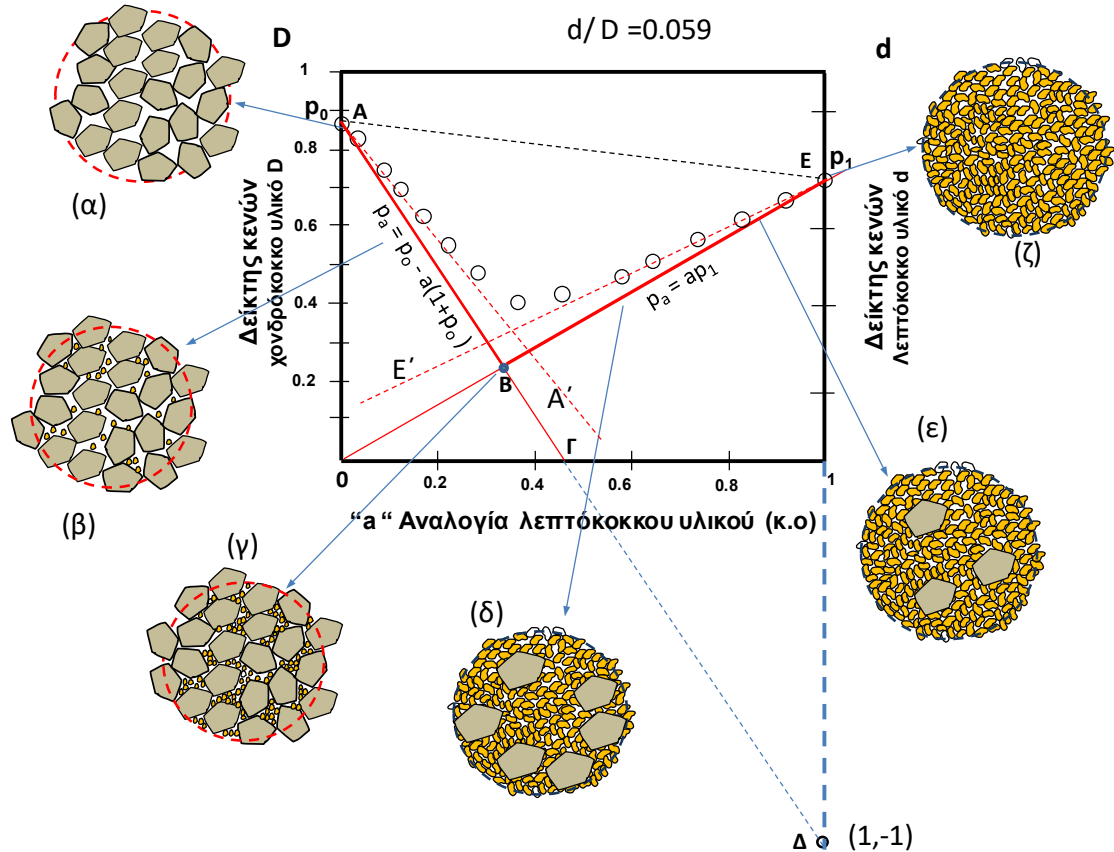
(λ) είναι X και Λ αντίστοιχα. Η αναλογία του λεπτού υλικού στο μίγμα είναι  $a = \Lambda / (X + \Lambda)^{24}$ . Για λόγους απλούστευσης θεωρούμε ότι ο συνολικός όγκος των στερεών του μίγματος ισούται προς τη μονάδα οπότε  $\Lambda = a$  και  $X = 1 - a$ .

Στο Σχ.4.6 φαίνεται το διάγραμμα<sup>25</sup> της μεταβολής του δείκτη των πόρων του μίγματος των δύο αδρανών σε συνάρτηση με τη μεταβολή της αναλογίας "a" του λεπτού υλικού (οριζόντιος άξονας). Στον κατακόρυφο άξονα σημειώνεται ο δείκτης κενών (πορώδες σωρού) και ειδικότερα στον αριστερό άξονα σημειώνεται ο δείκτης κενών του χονδρόκοκκου υλικού (σημείο A,  $p_0$ ,  $a=0$ ) ενώ στον δεξιό ο δείκτης κενών του λεπτόκοκκου υλικού (σημείο E,  $p_1$ ,  $a=1$ ).

Αρχικά στο χονδρόκοκκο υλικό βρίσκεται συμπυκνωμένο με μέρος των κόκκων σε επαφή μεταξύ τους και –το σημαντικότερο- μη μετακινήσιμους. Στη κατάσταση αυτή του χονδρόκοκκου υλικού προστίθεται λεπτόκοκκο υλικό σε αυξανόμενες διαδοχικά ποσότητες. Υποτίθεται ότι το λεπτόκοκκο υλικό τοποθετείται στα κενά του χονδρόκοκκου υλικού κατά ένα εξιδανικευμένο τρόπο (μη πραγματοποιήσιμο στην πράξη) έτσι ώστε οι κόκκοι του χονδρόκοκκου υλικού να μην μετακινούνται από τις αρχικές τους θέσεις. Επομένως δεν μπορεί να αναπτυχθεί το φαινόμενο της παρεμβολής /διόγκωσης.

<sup>24</sup> Επισημαίνεται ότι για την αναλογία λεπτόκοκκου προς χονδρόκοκκο υλικό χρησιμοποιείται λατινικός χαρακτήρας γραμμάτων " a " για να διακρίνεται από την περιεκτικότητα σε αέρα όπου χρησιμοποιείται ελληνικός χαρακτήρας " α"

<sup>25</sup> Τα διαγράμματα αυτά χρησιμοποιήθηκαν αρχικά από τον Furnas και από τον Powers και από άλλους με οριζόντιο άξονα τις αναλογίες του χονδρόκοκκου υλικού και στον αριστερό άξονα τον δείκτη κενών του λεπτόκοκκου υλικού. Εδώ, υιοθετήθηκε η παρουσίαση που χρησιμοποίησε ο Dewar με ορισμένες τροποποιήσεις. Τα διαγράμματα γενικά της μεταβολής του δείκτη των πόρων έχουν το πλεονέκτημα ότι είναι ανεξάρτητα από την πυκνότητα των κόκκων των αδρανών



Σχ. 4.6 : Μεταβολή του δείκτη κενών (πορώδους σωρού) μίγματος αδρανών σε συνάρτηση με τις αναλογίες σύνθεσής των

Με τις παραπάνω προϋποθέσεις είναι δυνατόν να υπολογιστεί η μεταβολή του δείκτη των κενών όσο η αναλογία του λεπτόκοκκου υλικού στο μίγμα αυξάνει

Εφόσον η διάταξη των κόκκων του χονδρόκοκκου υλικού παραμένει αναλλοίωτη (κόκκοι αμετακίνητοι) ο δείκτης των κενών του χονδρόκοκκου υλικού δεν αλλάζει αλλά μεταβάλλεται η αναλογία του στο μίγμα. Ο δείκτης κενών  $p_a$  για κάποια τιμή  $a$  του λεπτόκοκκου υλικού στο μίγμα θα ισούται με τον δείκτη κενών του χονδρόκοκκου υλικού που συμμετέχει στο μίγμα με αναλογία  $1-a$  δηλ θα είναι  $(1-a)p_0$  και μειωμένος κατά τον όγκο  $a$  του λεπτόκοκκου υλικού που συμμετέχει στο μίγμα, ήτοι :

$$p_a = (1-a)p_0 - a = p_0 - a(1+p_0) \quad (1)$$

Η σχέση αυτή δίνει την εξίσωση της γραμμής AB που δείχνει την μεταβολή του δείκτη κενών σε συνάρτηση με την αναλογία  $a$  του λεπτόκοκκου υλικού όταν στο χονδρόκοκκο υλικό προστίθενται ποσότητες λεπτόκοκκου, όπως φαίνεται στα ένθετα σχήματα α, β και γ. Στο σημείο B τα λεπτά αδρανή έχουν γεμίσει όλους τους πόρους μεταξύ των κόκκων του χονδρόκοκκου υλικού και δεν μπορούν να προστεθούν άλλα χωρίς να επέλθει μετακίνηση του χονδρόκοκκου κλάσματος. Η εξίσωση αυτή της γραμμής για  $a=1$  δίνει ένα σταθερό σημείο Δ (1,-1) από όπου διέρχεται πάντοτε η γραμμή AB. Με την παρατήρηση αυτή διευκολύνεται η χάραξη της γραμμής AB. (Πρακτικότερο είναι να σχεδιάζεται αντί του σημείου Δ το σημείο Γ με συντεταγμένες  $p_0/(1+p_0), 0$ )

Από το σημείο B και για μεγαλύτερες τιμές του  $a$  η σχέση της μεταβολής του δείκτη των κενών σε συνάρτηση με το  $a$  γίνεται διαφορετική διότι το μίγμα πρέπει πλέον να θεωρηθεί ως

λεπτόκοκκο υλικό μέσα στο οποίο "κολυμπάνε" οι χονδροί κόκκοι και μόνο στην αρχή (σημείο Β) βρίσκονται σε επαφή, όπως φαίνεται στα ένθετα σχήματα δ,ε,ζ.

Στην περίπτωση αυτή ο δείκτης κενών εξαρτάται μόνο από δείκτη των κενών του λεπτόκοκκου υλικού και την αναλογία συμμετοχής του στο μίγμα δηλ θα δίνεται από τη σχέση:

$$p_a = a \cdot p_1 \quad (2)$$

Ακολουθείται επομένως η γραμμή ΟΒΕ, ή χάραξη της οποίας είναι άμεση.

Η τεταγμένη του σημείου Β δίνει τον μικρότερο δείκτη κενών (άρα τη μέγιστη πυκνότητα) που προκύπτει "θεωρητικά" από την παραπάνω εξιδανικευμένη (αλλά μη πραγματοποιήσιμη) μέθοδο στοίβαξης των δύο αδρανών.

$$p_B = p_{\min} = \frac{p_0 p_1}{1 + p_0 + p_1} \quad (3)$$

Και η αναλογία λεπτόκοκκου υλικού για την οποία αυτό θεωρητικά επιτυγχάνεται είναι (τετμημένη του Β):

$$a_B = \frac{p_0}{1 + p_0 + p_1} \quad (4)$$

Επομένως για τιμές πχ  $p_0=0.88$  και  $p_1=0.77$  προκύπτει  $p_{\min} = 0.256$  με  $a=0.33$  δηλ αν αναμιχθούν ένα υλικό χονδροκόκκο με δείκτη κενών 0.88 και ένα λεπτόκοκκο με δείκτη κενών 0.77 με αναλογία λεπτόκοκκου 33 % θα προκύψει (θεωρητικά) μίγμα με δείκτη κενών 0.256.

Η τεθλασμένη γραμμή ΑΒΕ παριστάνει την μεταβολή του δείκτη κενών που υπολογίζεται θεωρητικά για το μίγμα των δύο αδρανών με το σημείο Ε να αποτελεί την "θεωρητικά" μικρότερη τιμή του δείκτη κενών και την αντίστοιχη τιμή  $a$  την βέλτιστη αναλογία με την οποία επιτυγχάνεται η μικρότερη τιμή κενών. Όλες οι δυνατές τιμές βρίσκονται μέσα στο τρίγωνο ΑΒΕ με τη γραμμή ΑΕ να παριστά το άνω όριο των τιμών που θα μπορούσαν να αποκτηθούν στην περίπτωση που  $D=d$

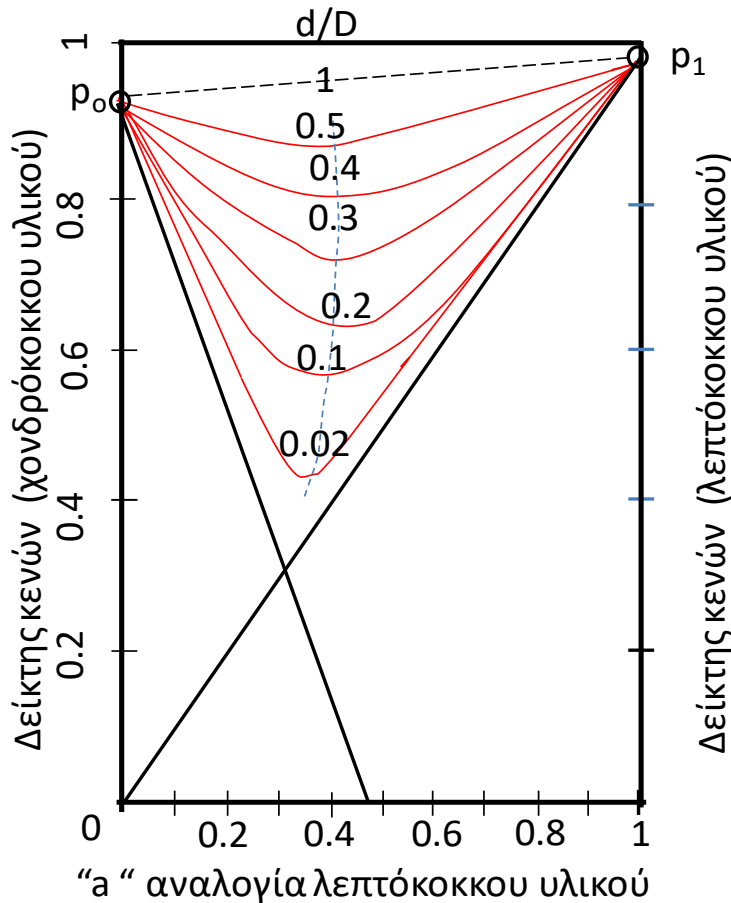
Στην πραγματικότητα όμως πολυάριθμες εργαστηριακές μετρήσεις από πολλούς ερευνητές, δείχνουν ότι οι τιμές απέχουν των "θεωρητικά" υπολογισμένων και βρίσκονται ψηλότερα από την τεθλασμένη γραμμή, όπως παρουσιάζονται στο Σχ5 με μικρά κυκλικά σημεία. Η απόκλιση είναι μεγαλύτερη για τιμές του  $a$  που δεν είναι κοντά στο 0 ή το 1 δηλ στην περιοχή του σημείου Β.

Η απόκλιση αυτή οφείλεται στην επίδραση των φαινομένων της "παρεμβολής" και της "παρειάς". Το φαινόμενο της παρεμβολής παρουσιάζεται στην περιοχή ΑΒ και της παρειάς στην περιοχή ΒΕ, όπως γίνεται φανερό από τα ένθετα σχήματα α,β,γ,δ,ε και ζ. Ειδικότερα για το φαινόμενο παρειάς παρατηρείται ότι τα πρώτα 5σημεία κοντά στο Ε βρίσκονται ουσιαστικά πάνω στη γραμμή ΕΕ' γεγονός που μπορεί να συσχετιστεί με την γραμμικότητα του φαινομένου παρειάς ενώ δεν παρατηρείται το ίδιο στα σημεία της ΑΒ τα οποία πολύ γρήγορα απέχουν της ευθείας ΑΑ'.

Στην περιοχή περί το Β τα δύο φαινόμενα συνυπάρχουν και γιαυτό η καμπύλωση της γραμμής είναι έντονη.

Το Σχ. 4.7 στηρίζεται σε πειραματικά αποτελέσματα που έγιναν σε αδρανή με λόγο  $d/D=0.059$ . Η επίδραση του λόγου  $d/D$  στη μεταβολή του δείκτη κενών σε συνάρτηση με τις

αναλογίες σύνθεσης  $a$  παρουσιάζεται στο Σχ6. Από το σχήμα αυτό γίνεται φανερό ότι όσο περισσότερο οι κόκκοι των δύο υλικών διαφέρουν μεταξύ τους τόσο μικρότερος δείκτης κενών μπορεί να επιτευχθεί, ενώ όταν το μέγεθος των κόκκων δεν διαφέρει πολύ η επίδραση των φαινομένων παρειάς και παρεμβολής είναι εντονότερο με αποτέλεσμα τα κενά να μεγαλώνουν. Όταν οι κόκκοι έχουν το ίδιο μέγεθος η μεταβολή ακολουθεί την διακεκομμένη γραμμή  $\rho_0-\rho_1$ , Σχ4.7.



Σχ. 4.7 : Επίδραση του λόγου του μεγέθους των κόκκων  $d/D$  στη μεταβολή του δείκτη κενών

Αντί των διαγραμμάτων της μεταβολής του δείκτη κενών  $\rho$  σε σχέση με την μεταβολή του ποσοστού  $a$  του λεπτόκοκκου αδρανούς στο μίγμα, χρησιμοποιούνται επίσης διαγράμματα που δείχνουν την μεταβολή του δείκτη συμπίκνωσης  $\Phi$  (ποσοστό στερεών στο συνολικό όγκο) σε σχέση με την μεταβολή του ποσοστού του χονδρόκοκκου αδρανούς στο μίγμα.

Η θεωρία αυτή ισχύει για ισόκοκκα αδρανή αλλά μπορεί να επεκταθεί και σε ανάμιξη δύο κλασμάτων αδρανών (πχ  $0/8$  και  $8/16$ ) θεωρώντας ότι κάθε κλάσμα αντιπροσωπεύεται από τη μέση διάμετρο του κλάσματος η οποία λαμβάνεται συνήθως ίση με :

$$\log(d_m) = 0.5(\log(d_{ανω}) + \log(d_{κάτω}))$$

όπου  $d_{ανω}$  και  $d_{κάτω}$  το άνω και κάτω όριο των διαστάσεων του κλάσματος.

#### 4.5 Συστήματα βελτιστοποίησης σύνθεσης σκυροδέματος

Είναι προφανές ότι το πρώτο βήμα για την δημιουργία συστήματος βελτιστοποίησης της σύνθεσης των αδρανών για την επίτευξη του ελάχιστου δυνατού δείκτη κενών  $\rho$  ή της μέγιστης δυνατής φαινόμενης πυκνότητας σωρού, θα μπορούσε να γίνει με την υιοθέτηση των σχέσεων 1,2,3,4 του προηγούμενου κεφαλαίου μη λαμβάνοντας υπόψη τα φαινόμενα παρεμβολής και παρειάς. Από τα σχήματα 4.6 και 4.7 φαίνεται ότι η προσέγγιση αυτή δεν είναι ακριβής και η διαφορά από τα πραγματικά (μετρημένα ) αποτελέσματα είναι μεγαλύτερη όσο ο λόγος  $d/D$  είναι μεγαλύτερος, Σχ. 4.7, (πλησιάζει το 1) διότι τα φαινόμενα αλληλεπίδρασης των κόκκων γίνονται εντονότερα

Με βάση τα προηγούμενα και με τη χρήση λογισμικών έχουν σήμερα αναπτυχθεί αρκετά συστήματα βελτιστοποίησης της σύνθεσης σκυροδέματος με κύριο χαρακτηριστικό ότι δεν περιορίζονται στη βελτιστοποίηση της σύνθεσης των αδρανών μόνο, αλλά επεκτείνονται και στα λεπτότερα υλικά δηλ τσιμέντο και πρόσμικτα με συνδετική δράση (πχ ποζολάνες) ή πληρωτικά αδρανή -λεπτόκοκκα φίλερς (πχ λεπτόκοκκος ασβεστόλιθος)<sup>26</sup>.

Με τη χρήση των κατάλληλων αναλογιών μειώνονται στο ελάχιστο δυνατόν τα κενά του μίγματος και έτσι επιτυγχάνεται μεταξύ των άλλων:

- μείωση του απαιτούμενου νερού για δεδομένη εργασιμότητα
- μείωση του απαιτούμενου τσιμέντου
- βελτίωση των ιδιοτήτων του τσιμέντου (αντοχή, πορώδες ανθεκτικότητα)

Τα συστήματα αυτά επομένως κατά βάση επιτυγχάνουν μείωση των κενών του μίγματος ενώ λαμβάνουν και κάποια μέτρα έτσι ώστε να υπάρχει η περίσσεια σε πολτό που είναι απαραίτητη προκειμένου να εξασφαλιστεί η απαιτούμενη εργασιμότητα χωρίς την οποία το μίγμα είναι παντελώς άχρηστο. Διάφορες συγκριτικές μελέτες έχουν δείξει ότι στο θέμα της εργασιμότητας απαιτείται περαιτέρω βελτίωση ενώ στο θέμα της μείωσης των κενών οι διαφορές μεταξύ των διαφόρων συστημάτων δεν είναι σημαντικές.

Από τα σημαντικότερα συστήματα βελτιστοποίησης είναι εκείνα των: Toufar (1976 αρχικό και βελτιωμένο από τον Goltermann 1997), Dewar (1999), Stoval & de Larrard (Linear Packing Model 1986), de Larrard (Compressible Packing Model 1999) για τα οποία έχουν αναπτυχθεί και αντίστοιχα λογισμικά πχ Europack, MixSim, RENE-LCPC, BetonlabPro LCPC.

Στα συστήματα αυτά λαμβάνεται υπόψη η διατάραξη που υφίστανται οι διάφοροι κόκκοι όταν αναμειγνύονται μεταξύ των δηλ τα φαινόμενα "παρειάς" και "παρεμβολής". Επίσης κατά

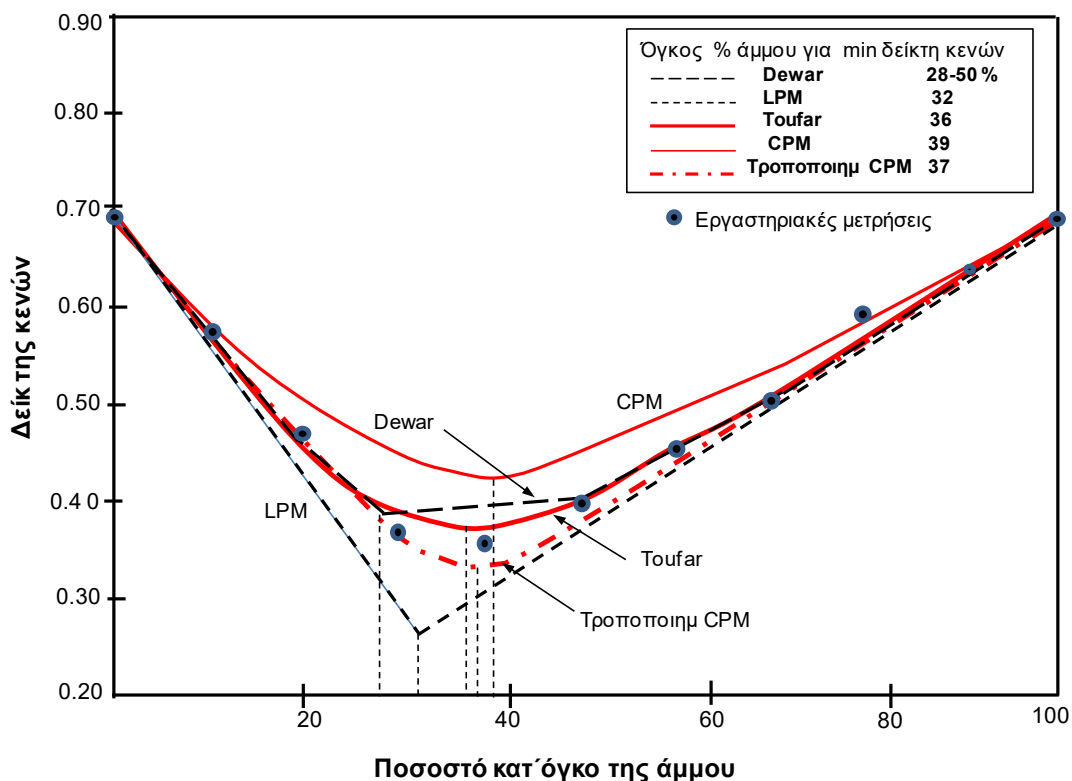
<sup>26</sup> Έχει αποδειχθεί ότι σε πολλές περιπτώσεις η κατάλληλη χρήση λεπτών υλικών (μέγεθος κόκκου και ποσότητα υλικού) δεν αυξάνει την απαίτηση σε νερό, όπως θα αναμένονταν λόγω της αύξησης της συνολικής ειδικής επιφάνειας των αδρανών αλλά, λόγω της παρεμβολής των μικρών κόκκων μεταξύ των άλλων κόκκων, οι μικροί κόκκοι αναπτύσσουν δράση διευκόλυνσης των μετακινήσεων σαν "ένσφαιροι μειωτές τριβών" (μπίλιες, ρουλεμάν) και ταυτόχρονα εκτοπίζουν με τον όγκο τους νερό το οποίο είναι διαθέσιμο στο μίγμα.

έμμεσο τρόπο λαμβάνονται υπόψη και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά διότι απαιτείται εργαστηριακός προσδιορισμός του δείκτη κενών  $\rho$  ή του δείκτη συμπίκνωσης  $\Phi$ .

Στα συστήματα Toufar, Toufar&Goltermann και Dewar τα διάφορα κλάσματα των αδρανών και των λεπτόκοκκων προσμίκτων λαμβάνονται διαδοχικά υπόψη με συνδυασμό ανά δύο και ειδικότερα στο σύστημα Dewar πρέπει η έναρξη να γίνει από τα δύο λεπτότερα. Αφού συνδυαστούν τα δύο πρώτα κλάσματα και ευρεθεί η βέλτιστη αναλογία γίνεται συνδυασμός με το επόμενο κλάσμα κ.ο.κ μέχρις ότου συμπεριληφθούν όλα τα κλάσματα. Αυτό έχει σαν συνέπεια να απαιτείται αρκετός λογισμικός χρόνος και η ακρίβεια εκτίμησης πιθανόν να επηρεάζεται δυσμενώς. Δεν απαιτείται όμως η γνώση της κοκκομετρικής διαβάθμισης των επιμέρους κλασμάτων αλλά μόνο ο δείκτης κενών  $\rho$  ή ο δείκτης συμπίκνωσης  $\Phi$ .

Στα συστήματα De Larrard (Linear Packing Mode(LPM)),και Compressible Packing Model (CPM)) έχουν αναπτυχθεί γενικής εφαρμογής σχέσεις που ισχύουν για ολόκληρο το εύρος των διαστάσεων των αδρανών και των λεπτόκοκκων πληρωτικών αδρανών -φίλερς και είναι απαραίτητη η γνώση της κοκκοδιαβάθμισης όλων των υλικών. Ιδιαίτερα στο Compressible Packing Model (CPM) λαμβάνεται υπόψη και η ενέργεια συμπίκνωσης (συμπύκνωση με : τυποποιημένη ελεύθερη πτώση του υλικού από ορισμένο ύψος, με ραβδισμούς, με δόνηση, και με δόνηση που συνδυάζεται και με άσκηση πίεσης). Από την άποψη αυτή τα συστήματα αυτά έχουν γενικότερη εφαρμογή και επιδέχονται μελλοντικές βελτιώσεις και τροποποιήσεις.

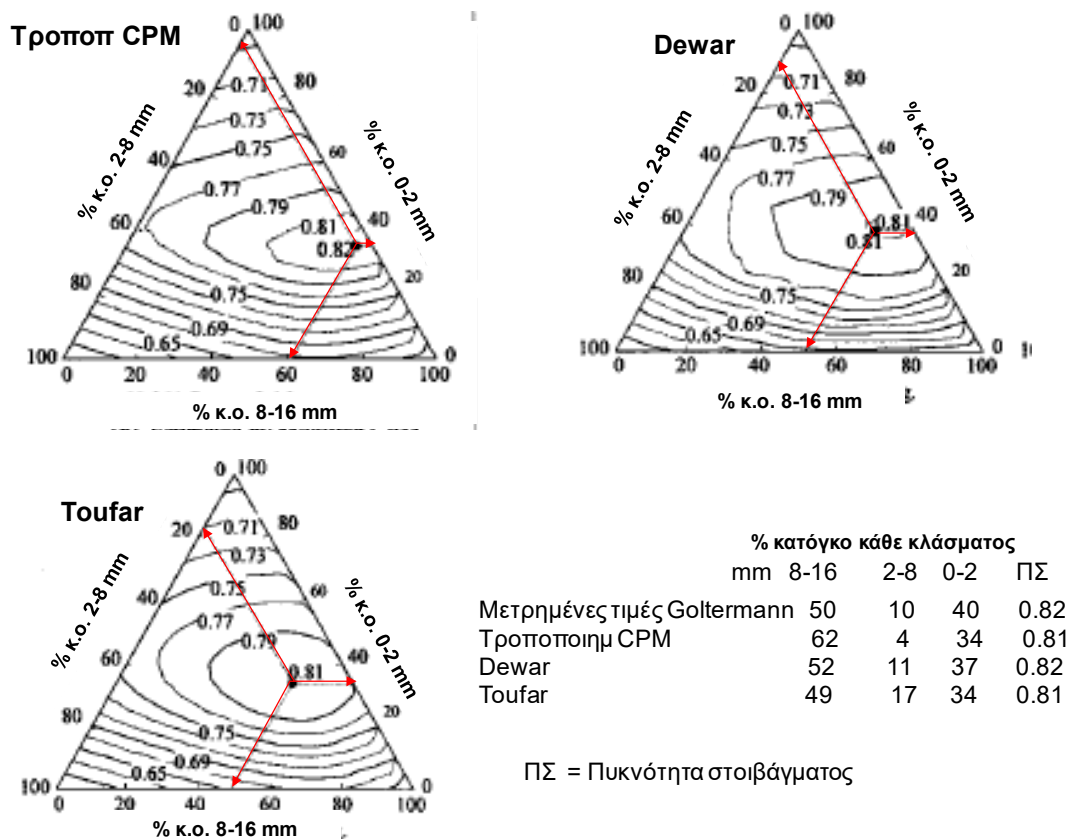
Στο σχήμα 4.8 γίνεται σύγκριση του εκτιμώμενου δείκτη κενών (κατακόρυφος άξονας) με τα συστήματα Toufar, Dewar, de Larrard (Linear Packing Model LPM, Compressible Packing Model CPM-αρχικό και τροποποιημένο) με μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο για σύνθεση χονδροκόκκου αδρανούς 10 mm με άμμο σε διάφορες αναλογίες (οριζόντιος άξονας) από την εργασία των Jones ,Cheng and Newlads. Στον ένθετο στο σχήμα 8 πίνακα παρουσιάζονται τα ποσοστά της άμμου για τα οποία επιτυγχάνεται ο ελάχιστος δείκτης κενών. Όπως φαίνεται οι διαφορές δεν είναι σημαντικές πλην της περίπτωσης του Linear Packing Model που διαφέρει αρκετά από τις εργαστηριακές μετρήσεις αλλά η αναλογία της άμμου δεν είναι πολύ διαφορετική από εκείνες των άλλων συστημάτων. Το σύστημα Dewar πλησιάζει τις εργαστηριακές μετρήσεις αλλά δίνει min δείκτη κενών για ένα διάστημα ποσοστών άμμου από 28% έως 50%



Σχ. 4.8 Σύγκριση του δείκτη κενών που εκτιμάται από τα συστήματα Toufar, Dewar, de Larrard (Linear Packing Model LPM, Compressible Packing Model CPM-αρχικό και τροποποιημένο) με μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο για σύνθεση χονδρόκοκκου αδρανούς 10 mm με άμμο σε διάφορες αναλογίες Jones ,Cheng and Newlads

Στο Σχ. 4.9 συγκρίνονται ομοίως τα αποτελέσματα τριμερών συνθέσεων 0/2, 2/8, 8/16 για την επίτευξη του μέγιστου πυκνότητα στοιβάγματος Φ του μίγματος που εκτιμώνται από τα συστήματα Dewar, Toufar και τροποποιημένο Compressible Packing Model με τις εργαστηριακές μετρήσεις του Goltermann





Σχ 9 Σύγκριση μετρημένων τιμών (Goltermann) με τις προβλεπόμενες από τα συστήματα α) Τροποποιημένο LPM , β) Dewar και γ) Toufar

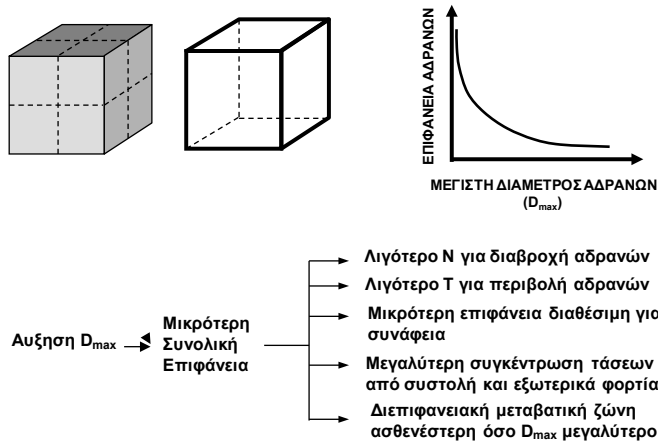
#### 4. ΕΠΙΡΟΗ ΑΔΡΑΝΩΝ ΣΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

##### 5.1 Επιρροή του μέγιστου κόκκου $D_{max}$ και γενικά του μεγέθους των αδρανών

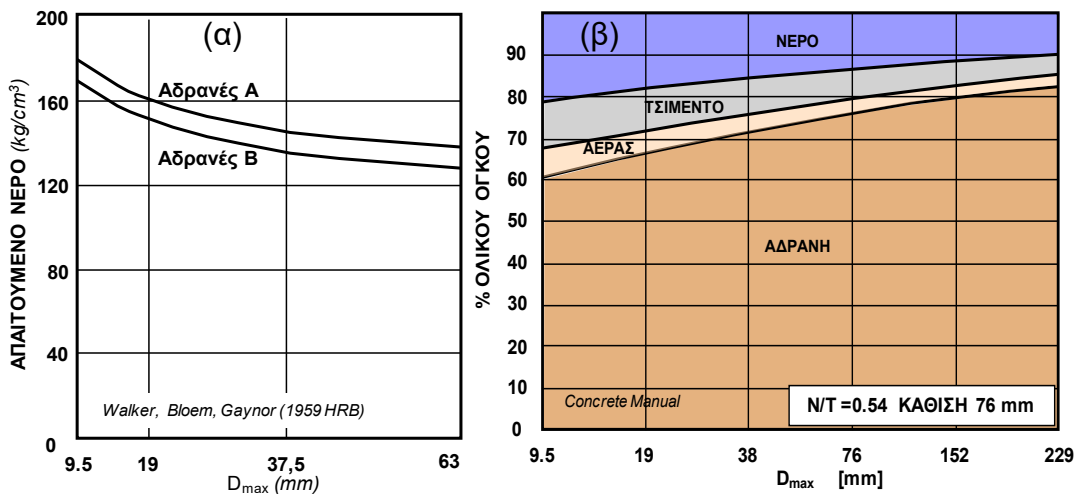
###### 5.1.1 Εργασιμότητα

Η αύξηση του μέγιστου κόκκου μιας διαβάθμισης από  $D_{1max}$  σε  $D_{2max}$  έχει σαν συνέπεια την μείωση της συνολικής επιφάνειας των αδρανών (μείωση της ειδικής επιφάνειας βλ Σχ. 2.6) και αυτό προκαλεί μείωση του απαιτούμενου νερού για την διαβροχή των αδρανών και για την ίδια εργασιμότητα. Επίσης προκαλείται μείωση της ποσότητας του τσιμεντοπολυτού-

άρα και του τσιμέντου- που απαιτείται για να περιβάλλει τα αδρανή. Στο Σχ 5.1 συνοψίζονται οι συνέπειες της μεταβολής της μέγιστης διάστασης των αδρανών  $D_{max}$ . Όπως φαίνεται υπάρχουν θετικές και αρνητικές συνέπειες που θα αναπτυχθούν παρακάτω.



Σχ. 5.1: Συνέπειες της αύξησης του μέγιστου κόκκου αδρανών

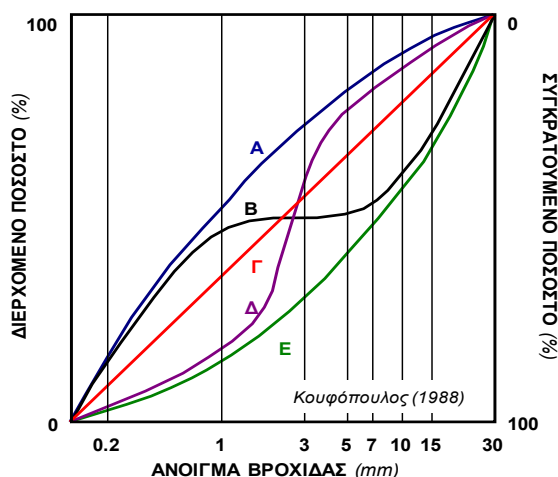


Σχ. 5.2: Συνέπειες της αύξησης του  $D_{max}$ . (α) Μείωση του απαιτούμενου νερού (σε  $kg/m^3$ ) για σταθερή κάθιση και (β) μείωση του ποσοστού του νερού, του τσιμέντου και του περιεχόμενου αέρα

Στο Σχ 5.2α παρουσιάζεται η μείωση του απαιτούμενου νερού με την αύξηση του  $D_{max}$  (Proc.HRB1959) για σκυροδέματα με  $D_{max}$  από 9.5mm σε 63 mm. Στο Σχ.5.2β παρουσιάζονται τα ποσοστά κατόγκο αδρανών, νερού και τσιμέντου για σκυροδέμα με σταθερό  $N/T= 0.54$  και σταθερή κάθιση 80 mm. (Concrete Manual 1981, US Bereau of Reclamation). Είναι φανερό η μείωση τόσο του απαιτούμενου νερού όσο και του τσιμέντου και του περιεχόμενου αέρα με την αύξηση του μέγιστου κόκκου από 9.5mm σε 229 mm. Των δύο αυτών θετικών συνεπειών γίνεται συχνά χρήση στη μελέτη σύνθεσης συνήθους σκυροδέματος. Πρακτικά στις συνήθεις περιπτώσεις επιδιώκεται η χρήση του μέγιστου επιτρεπόμενου κόκκου αδρανών γιατί έτσι επιτυγχάνεται σημαντική οικονομία αφού το

απαιτούμενο νερό μειώνεται, οπότε για την ίδια αντοχή και με σταθερή κάθιση το μίγμα 2 με μεγαλύτερο κόκκο ( $D_{2max}$ ) απαιτεί (για την ίδια ενέργεια συμπίκνωσης - τα ίδια συμπυκνωτικά μέσα) λιγότερο νερό, άρα για τον ίδιο λόγο  $N/T$  (ίδια αντοχή) θα απαιτηθεί και λιγότερο τσιμέντο. Υπενθυμίζεται ότι ο μέγιστος κόκκος καθορίζεται πρωτίστως από την ελάχιστη απόσταση μεταξύ των ράβδων του οπλισμού (βλ σχετικούς Κανονισμούς διαστασιολόγησης, πχ  $m_{ih}$  απόσταση ράβδων μεταξύ τους =  $D_{max} + 5 \text{ mm}$ ) αλλά και από τον περιορισμό που τίθεται από την αυξημένη τάση απόμιξης των σκυροδεμάτων με μεγάλο μέγιστο κόκκο.

Στην πράξη επίσης παρουσιάζονται περιπτώσεις που σκοπίμως μεταβάλλονται οι αναλογίες σκύρων και άμμου στο μίγμα (μέσα σε ορισμένα όρια) για να μεταβληθεί η εργασιμότητα προς την επιδιωκόμενη κατεύθυνση. Έτσι πχ αύξηση του ποσοστού της άμμου προκαλεί γενικά αύξηση της απαιτούμενης ποσότητας σε νερό για να διατηρηθεί η ίδια εργασιμότητα. Αντιστρόφως αύξηση του ποσοστού των σκύρων με ταυτόχρονη μείωση του ποσοστού της άμμου συνεπάγεται γενικά αύξηση της εργασιμότητας γιατί μειώνεται η συνολική επιφάνεια των αδρανών και επομένως είναι ελεύθερη μεγαλύτερη ποσότητα νερού για να δράσει ως "λιπαντικό μέσον" και να αυξήσει τη ρευστότητα (μείωση ιξώδους) του τσιμεντοπολτού.



- A:** Μικρό εργάσιμο, μικρή ρευστότητα. Πλαστικότητα, Συνοχή  
**B:** Μεγάλη ρευστότητα και τάση για απόμιξη  
**Γ:** Ομοιογένεια, λίγα κενά, μικρή ρευστότητα  
**Δ:** Ούτε ρευστότητα ούτε πλαστικότητα  
**Ε:** Απόμιξη για κάθιση μεγαλύτερη των 5-6 cm. Χρησιμοποιείται για ύφυγνα και συμπυκνούμενα με οδοστρωτήρα μόνο

Σχ. 5.3: Ποιοτικό διάγραμμα με τα χαρακτηριστικά διαφόρων διαβαθμίσεων αδρανών και τα αναμενόμενες κατά προσέγγιση συνέπειες στην εργασιμότητα σκυροδέματος (Κουφόπουλος)

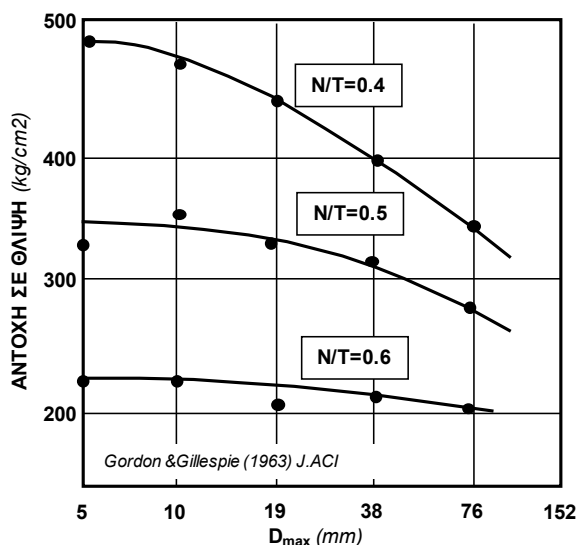
Στο Σχ.5.3 παρουσιάζονται κατά απλουστευμένο και κατά προσεγγιστικό τρόπο τα χαρακτηριστικά διαφόρων διαβαθμίσεων και οι συνέπειες που αναμένονται ως προς την εργασιμότητα και τα άλλα ρεολογικά χαρακτηριστικά συνήθων σκυροδεμάτων που συντίθενται με αυτά τα αδρανή. Αδρανή με διαβάθμιση Γ ευθύγραμμη ή σχεδόν ευθύγραμμη ή με σημεία παλιδρομούντα ελαφρώς εκατέρωθεν της ευθείας η γενικά κοντά στην ευθύγραμμη διαβάθμιση (με λογαριθμική κλίμακα) παράγουν γενικά συνήθη σκυροδέματα (με τις συνήθεις ποσότητες τσιμέντου) που διακρίνονται για την ομοιογένεια τα λίγα κενά αλλά και τη μικρή ρευστότητα. Αντιθέτως τα αδρανή με ασυνεχή διαβάθμιση Β στα οποία υπάρχει

έλλειψη των μεσαίων κόκκων (χονδρή άμμος , γαρμπίλι) παράγουν σκυροδέματα με μεγάλη ρευστότητα αλλά και με έντονη τάση για απόμιξη γεγονός, που τα καθιστά μη χρησιμοποιήσιμα στην πράξη παρά μόνο σε περιπτώσεις (προκατασκευή), που η διάστρωση και η συμπίκνωση γίνεται κατά απόλυτα τυποποιημένο τρόπο και υπό συνεχή έλεγχο. Η αφθονία σε λεπτά υλικά που παρέχει η διαβάθμιση Α εξασφαλίζει πλαστικότητα και συνοχή στο σκυροδέμα αλλά του μειώνει την ρευστότητα και γενικά την εργασιμότητα. Αντίθετα, η διαβάθμιση Ε, με τις μικρές ποσότητες λεπτών υλικών, παρέχει σκυροδέματα μικρής εργασιμότητας (άγρια) και αν γίνει προσπάθεια βελτίωσής της με αύξηση του νερού τότε τα σκυροδέματα αυτά υφίστανται απόμιξη. Οι διαβαθμίσεις αυτές είναι κατάλληλες (οικονομικές) για ύφυγρα σκυροδέματα και σκυροδέματα συμπυκνούμενα με οδοστρωτήρα, αλλά χρειάζεται προσοχή στη διάστρωση γιατί εύκολα παθαίνουν απόμιξη. Οι διαβαθμίσεις Δ, με περίσσεια υλικού μεσαίων διαστάσεων και έλλειψη κόκκων μεγάλου και μικρού μεγέθους, δεν έχουν ούτε ρευστότητα ούτε πλαστικότητα και πρέπει να αποφεύγονται.

### 5.1.2 Επιρροή στην αντοχή

Όπως συνοψίζεται στο Σχ 5.1, υπάρχουν και αρνητικές συνέπειες από αύξηση του μεγέθους των αδρανών, που θα μπορούσαν να αποδοθούν γενικά στην προκαλούμενη αύξηση της ανομοιομορφίας στην μάζα του σκυροδέματος. Έτσι με την αύξηση του μεγέθους των αδρανών (διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας από εκείνο του τσιμεντοπυλτού-τσιμεντοκονιάματος) οι ανηγμένες παραμορφώσεις και επομένως και οι τάσεις στην διεπιφάνεια των αδρανών – τσιμεντοπολτού αυξάνουν (βλ κεφ 1 Σχ7 μετρήσεις Dantu) και επομένως η αστοχία του υλικού επέρχεται σε μικρότερο συνολικό φορτίο. Επίσης λαμβάνοντας υπόψη ότι τα δύο υλικά-δηλ αδρανή- τσιμεντοπολτός- συνεργάζονται μεταξύ τους μέσω της επιφάνειας με την οποία εφάπτονται το ένα με το άλλο και της αναπτυσσόμενης συνάφειας, γίνεται φανερό ότι όσο μικρότερη επιφάνεια είναι διαθέσιμη για ανάπτυξη της συνάφειας τόσο η συνεργασία είναι πιο ασθενής με συνέπεια και η αντοχή να είναι μικρότερη. Εξάλλου ορισμένοι ερευνητές [πχ Mehta] αποδίδουν την μείωση της αντοχής με την αύξηση του  $D_{max}$  και στο γεγονός ότι όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά μεγέθους κόκκου μεταξύ τσιμέντου και αδρανών τόσο η διεπιφανειακή μεταβατική ζώνη γίνεται ασθενέστερη ή/και πιθανόν το πάχος της μεγαλύτερο, με αποτέλεσμα να μειώνεται η αντοχή καίτοι η συνολική επιφάνεια της μεταβατικής ζώνης μειώνεται με την αύξηση της  $D_{max}$  (φαινόμενο παρειάς).

Στο Σχ. 5.4 φαίνεται ότι για τον ίδιο λόγο  $N/T$  δηλ για την ίδια αντοχή τσιμεντοπολτού (μέσον διασποράς) η αντοχή μικραίνει όσο το  $D_{max}$  αυξάνει. Η διαφορά είναι εντονότερη για μικρούς λόγους  $N/T$  ενώ γίνεται μικρότερη –μέχρι και ασήμαντη- για μεγαλύτερες τιμές του  $N/T$ . Το γεγονός αυτό εξηγεί γιατί στην πράξη, όπου συνήθως χρησιμοποιούνται τιμές  $N/T$  πλησίον του 0.6, το φαινόμενο αυτό δεν είναι τόσο εμφανές.



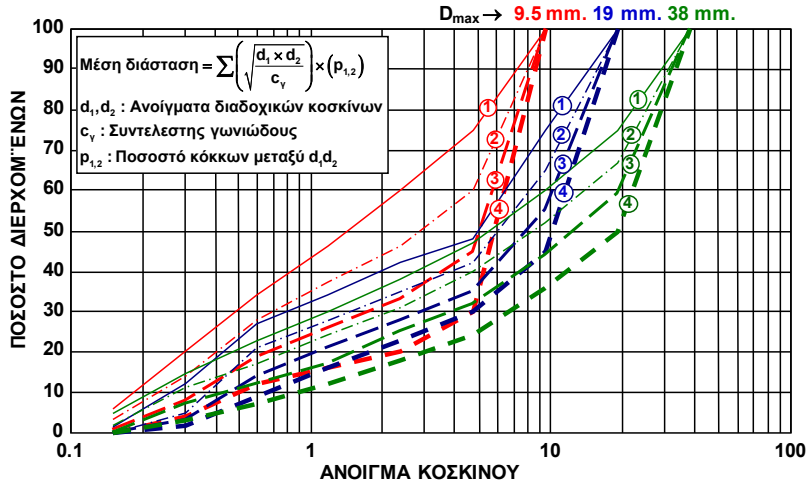
Σχ.5.4: Μεταβολή της αντοχής με την μεταβολή του  $D_{max}$  για σταθερές τιμές του  $N/T$

Σε μεταγενέστερη και διεξοδικότερη εργασία οι Johnston and Sidwell ερεύνησαν λεπτομερέστερα το θέμα του μεγέθους των κόκκων των αδρανών επεκτείνοντας τις μετρήσεις και σε δοκιμές καθαρού (μονοαξονικού) εφελκυσμού. Εξετάστηκαν τρεις σειρές διαβαθμίσεων με  $D_{max}$  9.5mm, 19mm και 38 mm. Κάθε σειρά περιελάμβανε 4 επιμέρους διαβαθμίσεις με το ίδιο  $D_{max}$  που σημειώνονται με την αρίθμηση 1,2,3 και 4, όπως παρουσιάζεται στο Σχ 5.5 (διαβαθμίσεις που χρησιμοποιούνται στην πράξη στην Αγγλία και προβλέπονται στο Road Notre No4).

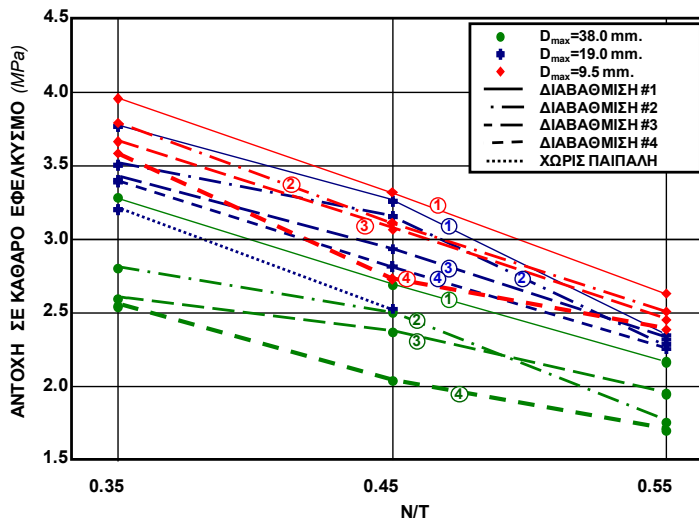
Με τα αδρανή των διαβαθμίσεων αυτών παρασκευάστηκαν μίγματα σκυροδέματος με τρεις λόγους  $N/T$ : 0.35, 0.45 και 0.55, τα οποία εξετάστηκαν σε θλίψη (κύβοι ακμής 150mm) και σε καθαρό εφελκυσμό (πρίσματα 150mm X150mm X500mm).

Τα αποτελέσματα των δοκιμών σε καθαρό (μονοαξονικό) εφελκυσμό παρουσιάζονται στο Σχ 5.6 για διάφορους λόγους  $N/T$ . Κάθε διαβάθμιση φέρει την αρίθμηση 1,2,3 και 4 ανάλογα με τη θέση της στο Σχ. 5.5. Η επίδραση του  $D_{max}$  και του μεγέθους των κόκκων κάθε διαβάθμισης είναι φανερή. Οι λεπτότερες διαβαθμίσεις έχουν γενικά μεγαλύτερη αντοχή.

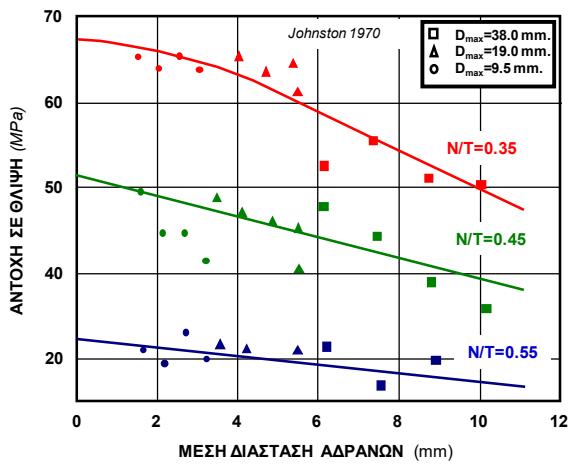
Τα αποτελέσματα των δοκιμών σε θλίψη παρουσιάζονται στο Σχ.5.7 σε σχέση με τη μέση γεωμετρική διάσταση κόκκου κάθε διαβάθμισης που υπολογίστηκε με βάση την σχέση που βρίσκεται ένθετη στο Σχ.5.5 (βλ παρ. 2.2.4). Από το Σχ 5.6 γίνεται φανερή η επίδραση του μεγέθους των κόκκων των αδρανών στην θλιπτική αντοχή. Σημειώνεται ότι στο σχήμα αυτό η μέγιστη διάσταση κόκκου κάθε διαβάθμισης απεικονίζεται με διαφορετικό σχήμα σημείου (τετραγωνικό, τριγωνικό, κυκλικό) Η επίδραση αυτή είναι εντονότερη για μικρές τιμές  $N/T$  ενώ για μεγαλύτερες τιμές  $N/T$  η επίδραση είναι σημαντικά μικρότερη επιβεβαιώνοντας έτσι πλήρως τα αποτελέσματα του Σχ. 5.4



Σχ 5.5: Κοκκομετρικές διαβαθμίσεις αδρανών σκυροδεμάτων που εξετάστηκαν



Σχ 5.6: Αντοχή σε εφελκυσμό ως συνάρτηση του λόγου N/T , της διαβάθμισης και του μεγέθους  $D_{max}$ .



Σχ 5.7: Μεταβολή της αντοχής σε θλίψη σε σχέση με την μέση γεωμετρική διάσταση κόκκου κάθε διαβάθμισης αδρανών

Σημειώνεται ότι η επιρροή της μεταβολής των διαστάσεων των κόκκων των αδρανών στην αντοχή στην πράξη δεν αποτελεί συχνό σημαντικό πρόβλημα διότι αφ' ενός μεν η μεταβολή των διαστάσεων των αδρανών δεν είναι σημαντική, αφού η διάταξη των οπλισμών δεν αφήνει πολλά περιθώρια μεταβολών, αφ' ετέρου η μεταβολή στο απαιτούμενο νερό είναι η κυριαρχούσα συνέπεια που επισκιάζει τις συνέπειες στην αντοχή. Γενικά όμως θα μπορούσε να λεχθεί ότι η τάση σήμερα είναι να χρησιμοποιούνται μέγιστοι κόκκοι μικρότεροι από 31.5 mm γιατί τα παραγόμενα σκυροδέματα έχουν μεγαλύτερη ομοιομορφία ως προς την εργασιμότητα και την αντοχή και είναι λιγότερο επιρρεπή σε διαχωρισμό ενώ δεν παρουσιάζουν προβλήματα σε σχέση με την πυκνότητα του οπλισμού.

Θεωρητικά όμως το θέμα παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον και αντιμετωπίζεται ριζικά με βάση τη Μηχανική της Θραύσης (Θραυστομηχανική). Όπως θα έπρεπε να αναμένεται για αδρανή με  $E_{αδ} > E_{π}$  συνδετικού μέσου (τσιμεντοπολτού /τσιμεντοκονιάματος), η επιρροή της μέγιστης διάστασης των αδρανών είναι καταρχήν θέμα "κλίμακος". Έτσι αν το φαινόμενο εξετάζεται με σχετικώς μικρά δοκίμια (όπως είναι τα συνήθη δοκίμια του εργαστηρίου) τότε η αντοχή αυξάνει με την μείωση του μεγέθους  $maxD$  (περίπτωση δομικών στοιχείων συνήθων έργων –πλάκες, δοκοί, υποστυλώματα μικρών σχετικώς διαστάσεων), ενώ για μεγάλα δοκίμια-κατασκευές (πχ φράγματα) η αντοχή αυξάνει με την αύξηση του  $maxD$ . Για ενδιάμεσα μεγέθη η επιρροή του  $maxD$  δεν είναι καθοριστική και επισκιάζεται από τα άλλα χαρακτηριστικά των αδρανών (σχέση  $E_{αδ} - E_{π}$ , σχήμα, μορφή επιφάνειας κ.α)

## 5.2 Επιρροή του ποσοστού των αδρανών ( συγκέντρωση αδρανών)

Το σκυρόδεμα είναι ένα σύνθετο στερεό υλικό αποτελούμενο από αδρανή και μίγμα σκληρυμένου τσιμεντοπολτού (μέσον διασποράς, matrix) και άλλων λεπτόκοκκων υλικών, όπως το λεπτόκοκκο κλάσμα της άμμου και διάφορα στερεά πρόσμικτα με συνδετική ή μη δράση (πυριτική παιπάλη, λεπτή ασβεστολιθική παιπάλη κ.α). Τα αδρανή είναι υλικά πολύ μεγαλύτερου μεγέθους από τους κόκκους που συνθέτουν το μέσον διασποράς ( matrix). Τα αδρανή με διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας (συνήθως μεγαλύτερο) και ασήμαντη (συνήθως) και συστολή ξήρανσης επηρεάζουν σημαντικά την συμπεριφορά του σκυροδέματος. Έτσι αύξηση του ποσοστού των αδρανών στο σκυρόδεμα (με διατήρηση της ίδιας διαβάθμισης και του ίδιου  $D_{max}$ ) μπορεί να προκαλέσει<sup>27</sup>:

1. Μείωση της συστολής του σκυροδέματος με συνέπεια την μείωση των ρηγματώσεων που προκαλούνται σε μικρή ηλικία πριν από την επιβολή φορτίου
2. Μείωση της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στη μάζα του σκυροδέματος από τη θερμότητα ενυδάτωσης με αποτέλεσμα την μείωση των ρηγματώσεων σε μικρή ηλικία πριν από την επιβολή φορτίου
3. Μείωση της εξίδρωσης του σκυροδέματος και επομένως της ανισοτροπίας που παρουσιάζει
4. Μείωση του πάχους του υμένα από τσιμεντοπολτό που περιβάλλει τα αδρανή

<sup>27</sup> Η παράθεση σειράς πιθανών συνεπειών δεν συνεπάγεται ότι είναι πλήρης

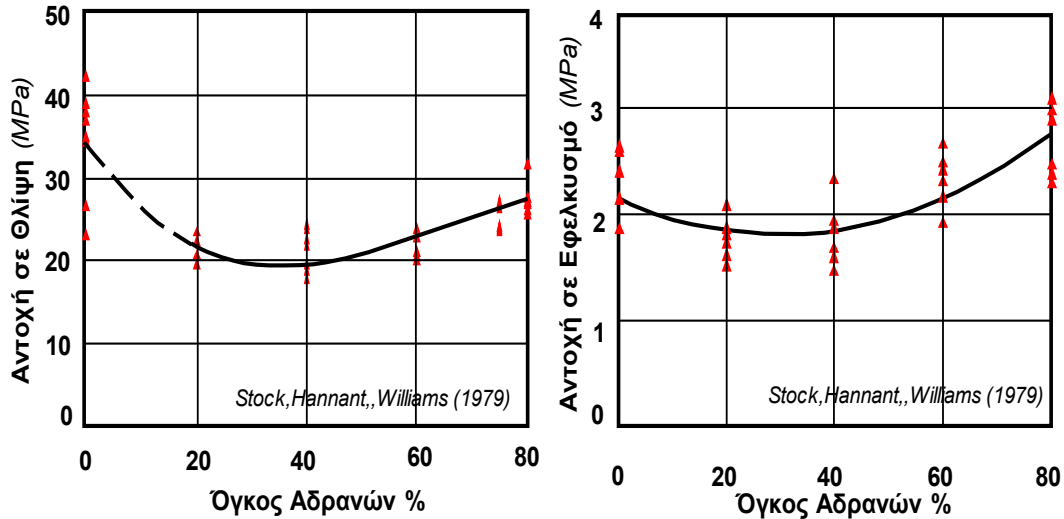
5. Μείωση της συνολικής ποσότητας νερού ανά κυβικό μέτρο σκυροδέματος αφού το ποσοστό του τσιμεντοπολτού ελαττώνεται με την αύξηση του ποσοστού των αδρανών και επομένως τα κενά θα μειωθούν
6. Μείωση του ερπυσμού
7. Αύξηση της συνολικής επιφάνειας της διεπιφανειακής μεταβατικής ζώνης με συνέπεια τη μείωση της αντοχής
8. Αύξηση του δαιδαλώδους της τροχιάς των ρωγμών που αναπτύσσονται κατά την επιβολή αυξανόμενου φορτίου οι οποίες ακολουθούν τροχιά που "παρακάπτει" συνήθως τα αδρανή (βλ Κεφ 1 Σχ8&9) που συνεπάγεται αύξηση της απαιτούμενης ενέργειας για θραύση.
9. Αύξηση του αριθμού των δευτερευουσών ρωγμών που προκαλούνται από τα αδρανή κατά την επιβολή αυξανόμενου φορτίου που συνεπάγεται αύξηση της απαιτούμενης ενέργειας για θραύση
10. Αύξηση της αλληλεπίδρασης των συγκετρώσεων τάσεων γύρω από τα αδρανή (βλ Κεφ 1 Σχ7 μετρήσεις Dantu) γεγονός που μεταβάλλει τις κρίσιμες τάσεις και ανηγμένες παραμορφώσεις. Με άλλα λόγια το εντατικό και παραμορφωσιακό πεδίο στη μάζα του σκυροδέματος γίνεται ευνοϊκότερο όσο το ποσοστό των αδρανών αυξάνει και το πάχος του υμένα του τσιμεντοπολτού που περιβάλλει τα αδρανή γίνεται μικρότερο.

Από την παραπάνω καταγραφή των συνεπειών που μπορεί να έχει η μεταβολή του ποσοστού των αδρανών στο σκυρόδεμα, η οποία δεν πρέπει να θεωρηθεί πλήρης, γίνεται φανερή η πολυπλοκότητα του θέματος. Η πειραματική διερεύνηση του θέματος έχει και αυτή σημαντικές δυσκολίες δεδομένου ότι η παρασκευή σκυροδέματος με μικρά ποσοστά αδρανών προσκρούει στην δυσκολία ότι ο ιστός των αδρανών μέσα στο νωπό σκυρόδεμα είναι ιδιαίτερα ασταθής και τα αδρανή καθιζάνουν (ως βαρύτερα) όσο το σκυρόδεμα είναι νωπό προκαλώντας σημαντικές ανομοιομορφίες στο δοκίμιο. Οι δυσκολίες αυτές ξεπεράστηκαν από τους Stock, Hannant και Williams με μία πρωτότυπη διάταξη με την βοήθεια της οποίας τα δοκίμια ετίθεντο σε αργή περιστροφική κίνηση όσο το σκυρόδεμα ήταν νωπό έτσι ώστε τα φαινόμενα της καθίζησης και εξίδρωσης να ελαχιστοποιηθούν. Τα αποτελέσματα της έρευνας αυτής παρουσιάζονται στο Σχ 5.8 και περιλαμβάνουν αντοχή σε θλίψη όσο και αντοχή σε μονοαξονικό εφελκυσμό.



**N/T=0.50 D<sub>max</sub>=19 mm.** Διαβάθμιση Νο3 (Road Note No4)

Δοκίμια: θλίψης κύβοι ακμής 150 mm , εφελκυσμού πρίσματα 100mmX100mmX500mm.



Σχ 5.8: Μεταβολή της αντοχής ως συνάρτηση του ποσοστού των αδρανών κατ' όγκον. Όλα τα μίγματα παρασκευάστηκαν με αδρανή διαβάθμισης Νο3 με D<sub>max</sub> =19mm (βλ Σχ13) με λόγο N/T=0.5. (Τα δοκίμια για τις δοκιμές σε θλίψη ήταν κυβικά ακμής 100mm και τις δοκιμές σε εφελκυσμό πρισματικά 100mmX100mmX500mm)

Παρατηρείται ότι τόσο η αντοχή σε θλίψη όσο και η αντοχή σε εφελκυσμό παρουσιάζουν ελάχιστη τιμή για κατ'όγκο ποσοστό αδρανών μεταξύ 30% και 40%. Η τιμή αυξάνει για μεγαλύτερα και μικρότερα ποσοστά και φθάνει τη μέγιστη τιμή για ποσοστό 80%. Η θλιπτική αντοχή για τσιμεντοπολτό (αδρανή 0%) είναι μεγαλύτερη από τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος σε κάθε αναλογία αδρανών, φαινόμενο που έχει αποδειχθεί από πολλές έρευνες και αποδίδεται πρωτίστως στην ύπαρξη μεταβατικής ζώνης (βλ Κεφ2 &6). Η αντοχή σε καθαρό εφελκυσμό που παρουσιάζεται στο Σχ.5.8 είναι κατά πάσα πιθανότητα μικρότερη από την πραγματική γιατί η διάταξη επιβολής εφελκυσμού που χρησιμοποιήθηκε ανέπτυξε συγκέντρωση τάσεων στην περιοχή επαφής της αρπάγης με το δοκίμιο, οι οποίες για την περίπτωση του τσιμεντοπολτού, που είναι ομοιογενές υλικό, προκαλούσε πρόωρη θραύση του τσιμεντοπολτού. Υπάρχουν επομένως ικανές ενδείξεις για να θεωρηθεί ότι και στην περίπτωση του εφελκυσμού η αντοχή του τσιμεντοπολτού είναι μεγαλύτερη ή τουλάχιστον ίση με εκείνη του σκυροδέματος με ποσοστό αδρανών 80% .

Το 1993 οι de Larrard and Tondat παρουσίασαν την ημιεμπειρική θεωρία του Μέγιστου Πάχους Τσιμεντοπολτού (ΜΠΤ) σε μίγμα σκυροδέματος που συνάδει με τις καταγραφές υπ'άρθ 4 και 9 των συνεπειών της αύξησης του ποσοστού των αδρανών δηλ ότι η αντοχή είναι συνάρτηση του ΜΠΤ που αντιστοιχεί σε ένα "μέσο πάχος" πολτού μέσα στο σκυρόδεμα και μπορεί να υπολογιστεί με τη σχέση:

$$\text{ΜΠΤ} = D_{\text{max}} * \left( \sqrt[3]{\frac{g^*}{g}} - 1 \right)$$

Όπου :

D<sub>max</sub> είναι η μέγιστη διάσταση αδρανών

$g$  είναι ο όγκος των αδρανών στην μονάδα όγκου του σκυροδέματος

$g^*$  είναι η πυκνότητα στοιβάγματος των αδρανών (χωρίς τσιμέντο)

Τα μεγέθη  $D_{max}$  και  $g$  είναι δεδομένα ή μπορούν να υπολογιστούν από τα στοιχεία του μίγματος και το  $g^*$  μπορεί να μετρηθεί ή να εκτιμηθεί (κατά προσέγγιση) με την βοήθεια των τροποποιημένων σχέσεων Caquot :

$$g^* = 1 - 0.39 * \left( \frac{d}{D_{max}} \right)^{0.22} \quad \text{για αδρανή συλλεκτά στρογγυλευμένα}$$

$$g^* = 1 - 0.45 * \left( \frac{d}{D_{max}} \right)^{0.19} \quad \text{για αδρανή θραυστά}$$

Ως προς την επίδραση του ποσοστού των αδρανών στον ερπυσμό και την συστολή ξήρανσης του σκυροδέματος ισχύει πάντοτε ο γενικός κανόνας ότι για τα συνήθη αδρανή αύξηση του ποσοστού τους στο σκυρόδεμα μειώνει τόσο τον ερπυσμό όσο και τη συστολή (βλ σχετικά κεφάλαια)

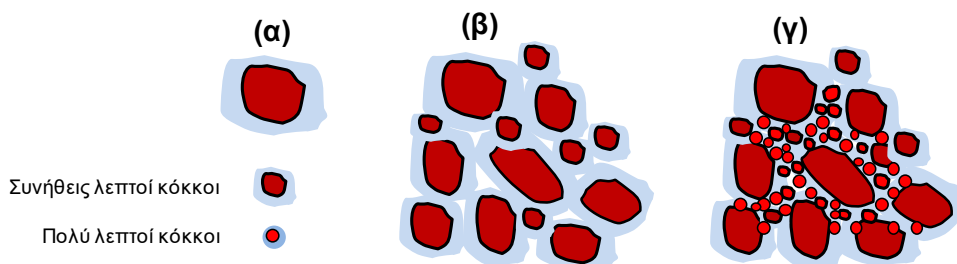
### 4.3 Επιρροή του λεπτόκοκκου υλικού

#### 5.3.1 Επιρροή στην εργασιμότητα

Σχετικά με την επιρροή των λεπτόκοκκων και μάλιστα των πολύ λεπτόκοκκων υλικών ( $\sim < 125 \mu\text{m}$ ) διακρίνονται δύο μηχανισμοί δράσεις βλ Σχ5.9 :

1. Οι λεπτότεροι κόκκοι έχουν μεγαλύτερη ειδική επιφάνεια και επομένως αυξάνουν την απαίτηση σε νερό, Σχ.5.9α και Σχ.5.9β
2. Οι λεπτότεροι κόκκοι ταυτόχρονα με δράση υπ' αριθ 1 δρουν και ως "ένσφαιροι τριβείς" (ρουλεμάν) μεταξύ των μεγαλύτερων κόκκων διευκολύνοντας τις μετακινήσεις των κόκκων του μίγματος, Σχ.5.9 γ. Ταυτόχρονα εκτοπίζουν με τον όγκο τους το νερό το οποίο πλέον είναι διαθέσιμο για να δράσει ως λιπαντικό σε άλλα σημεία του μίγματος

Προϋπόθεση για να ισχύει η δράση 2 είναι τα πολύ λεπτόκοκκα υλικά να είναι ομοιόμορφα κατανεμημένα στο μίγμα δηλ να μην έχουν δημιουργήσει συσσωματώματα (πρωτίστως) και η ανάμιξη να είναι πολύ καλή. Τα πολύ λεπτόκοκκα υλικά λόγω των υψηλών επιφανειακών τάσεων και της μικρής επίδρασης της βαρύτητας, λόγω της μικρής τους μάζας, έχουν την τάση να δημιουργούν συσσωματώματα τόσο σε ξηρή κατάσταση όσο και σε υγρή κατάσταση.



Σχ.5.9 : Δράση του νερού και των πολύ λεπτόκοκκων υλικών στο σκυρόδεμα (α) μεμονωμένοι κόκκοι αδρανών περιβεβλημένοι με υμένα νερού (β) μίγμα σκυροδέματος χωρίς "πολύ λεπτόκοκκο υλικό" (γ) μίγμα σκυροδέματος με "πολύ λεπτόκοκκο υλικό" ομοιόμορφα καταναμεμημένο

Για την αποφυγή της δημιουργίας συσσωματωμάτων στο σκυρόδεμα (υγρή κατάσταση) είναι απαραίτητη η χρήση κατάλληλων χημικών προσθέτων (συνήθως υπερ-ρευστοποιητικών), τα οποία, λόγω της έντονης διεπιφανειακής δράσης τους, συγκρατούν τους λεπτούς κόκκους σε απόσταση. Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν την δράση των πολύ λεπτόκοκκων υλικών είναι το σχήμα τους και η τραχύτητα της επιφάνειας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η ιπτάμενη τέφρα και το τσιμέντο. Τα μίγματα κλίνκερ ή τσιμέντου Ι με α) πυριτική τέφρα ή με β) ασβεστόχο ιπτάμενη τέφρα έχουν πολύ διαφορετικές απαιτήσεις σε νερό για την ίδια εργασιμότητα που αποδίδεται στο γεγονός ότι η πυριτική ιπτάμενη τέφρα συνήθως έχει στρογγυλεμένους κόκκους σε αντίθεση με την ασβεστόχο ιπτάμενη τέφρα. Άλλο χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι τα μίγματα σκυροδέματος με πυριτική παιπάλη 10%-15% κ.β τσιμέντου τα οποία συνήθως παρουσιάζουν αυξημένη εργασιμότητα σε σύγκριση με σκυροδέματα χωρίς πυριτική παιπάλη λόγω της δράσης αυτής της πυριτικής παιπάλης η οποία έχει συνήθως μέση διάσταση κόκκου το 1/100 περίπου της μέσης διάστασης του τσιμέντου.

Θα πρέπει να τονιστεί ότι τα πολύ λεπτά υλικά δεν πρέπει να περιέχουν κόκκους αργίλου οι οποίοι είναι μεν πολύ μικρού μεγέθους αλλά το σχήμα τους – μορφή φύλλου με τη μία διάσταση εξαιρετικά μικρή μέχρι και 3nm- είναι ιδιαίτερα επιβλαβείς για το σκυρόδεμα (μειώνουν δραστικά την συνάφεια τσιμέντου αδρανών).

Παρατηρείται επίσης ότι τα χονδρότερα αδρανή (σκύρα) έχουν συχνά επικολλημένα στην επιφάνειά τους λεπτόκοκκα υλικά τα οποία δεν απομακρύνονται εύκολα από τις επιφάνειες και έχουν ως συνέπεια την σημαντική αύξηση της εργασιμότητας σε σύγκριση με εκείνη σκυροδεμάτων με τα ίδια υλικά της ίδιας ακριβώς διαβάθμισης αλλά λόγω μεθόδου παραγωγής δεν έχουν μεγάλη ποσότητα λεπτόκοκκων υλικών επικολλημένη στην επιφάνεια των χονδρών αδρανών

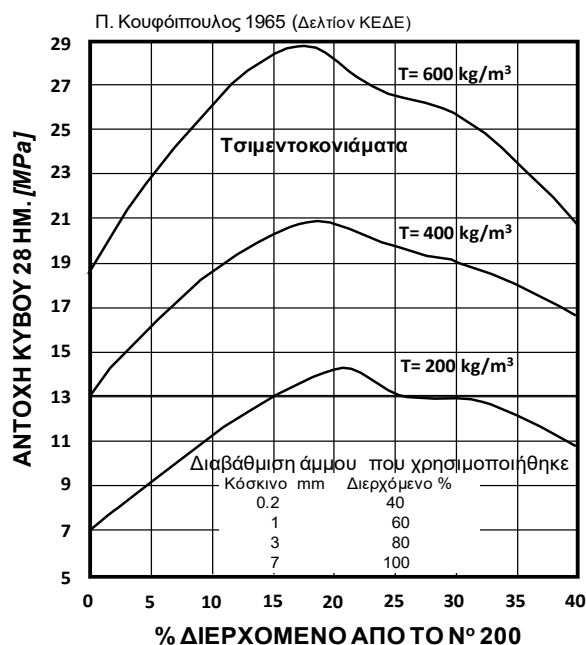
Θα πρέπει επίσης να αναφερθεί ότι η αύξηση των λεπτόκοκκων υλικών στο σκυρόδεμα ελαττώνει την εξίδρωση.

#### Επιρροή στην αντοχή

Το πολύ λεπτόκοκκο υλικό μέσα στο μίγμα- ιδιαίτερα δε αν είναι λεπτότερο από το τσιμέντο - συμβάλλει στην μείωση των κενών, στην αύξηση της πυκνότητας του μίγματος και στην αύξηση της αντοχής λόγω αυτής της "πληρωτικής" δράσης.

Στο Σχ. 5.10 φαίνονται τα αποτελέσματα έρευνας με ελληνικά θραυστά ασβεστολιθικά αδρανή σε τσιμεντοκονιάματα στα οποία αυξάνεται η ποσότητα του λεπτού υλικού που διέρχεται από

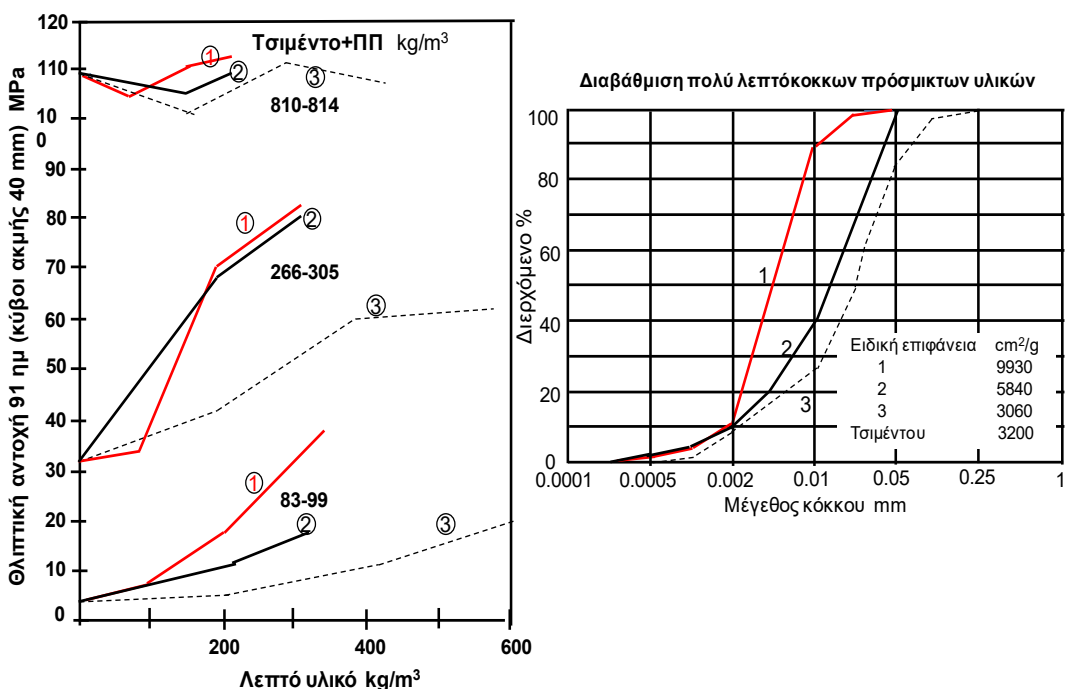
το κόσκινο 0.075 mm (κόσκινο ASTM No 200, παιπάλη). Παρατηρείται ότι αύξηση της αντοχής για ποσοστά παιπάλης (<0.075m) 17%, 18% 21% για ποσότητες τσιμέντου στο κονίαμα  $T=600\text{kg/m}^3$ ,  $400\text{kg/m}^3$ ,  $200\text{kg/m}^3$  αντίστοιχα. Τονίζεται ότι το λεπτόκοκκο υλικό είναι υλικό που προέρχεται από τη θραύση των ασβεστολιθικών κόκκων και δεν περιέχει άργιλο. Σημειώνεται επίσης ότι στον ΚΤΣ/95 το ανώτατο όριο διερχόμενου ποσοστού από το κόσκινο 0.075 mm είναι 16%.



Σχ. 5.10: Επίδραση του υλικού < 0.075 mm στην αντοχή τσιμεντοκονιάματος με ελληνικά ασβεστολιθικά αδρανή (Κουφόπουλος 1965).

Το 1994 ο Kronlöf (Materials & Structures 27,1994) παρουσίασε τα αποτελέσματα εκτεταμένης έρευνας πάνω στην επίδραση λεπτόκοκκων χαλαζιακών πρόσμικτων στην εργασιμότητα και την αντοχή κονιαμάτων με  $D_{max}=6$  mm. Χρησιμοποίησε 3 είδη πυριτικών πρόσμικτων, η διαβάθμιση και η ειδική επιφάνεια των οποίων παρουσιάζεται στο Σχ.5.11, καθώς και πυριτική παιπάλη(ΠΠ) σε αναλογία 10%ΠΠ και 90% τσιμέντο. Επίσης χρησιμοποιήθηκε υπερ-ρευστοποιητικό πρόσθετο (ναφθαλενικής βάσης) σε ποσοστό 2% κ.μ του συνδετικού μέσου (τσιμέντο + ΠΠ). Στο ίδιο σχήμα φαίνεται ότι η αντοχή αυξάνει σημαντικά με την αύξηση της ποσότητας των πρόσμικτων για σχετικώς μικρές και μέσες ποσότητες συνδετικού μέσου (τσιμέντο +ΠΠ) ενώ για μεγαλύτερες ποσότητες συνδετικού μέσου ( $810-814$   $\text{kg/m}^3$ ) η αντοχή δεν φαίνεται να αυξάνει. Την μεγαλύτερη επίδραση στην αντοχή έχει το λεπτότερο πρόσμικτο No1 με ειδική επιφάνεια  $9930$   $\text{cm}^2/\text{g}$ , ενώ την μικρότερη το πρόσμικτο με ειδική επιφάνεια  $3060$   $\text{cm}^2/\text{g}$  η οποία δεν διαφέρει σημαντικά από την ειδική επιφάνεια του τσιμέντου  $3200$   $\text{cm}^2/\text{g}$ . Με βάση την ειδική επιφάνεια (γιατί στο άρθρο δεν δίνεται η διαβάθμιση του τσιμέντου) εξάγεται το συμπέρασμα ότι όσο λεπτότερη είναι η διαβάθμιση των προσμίκτων από εκείνη του τσιμέντου τόσο η δράση τους είναι εντονότερη. Πράγματι όσο η σύνθεση του μίγματος ακολουθεί πιστότερα τις αρχές για επίτευξη της μέγιστης δυνατής πυκνότητας κατά τις αρχές για βέλτιστο στοιβάγμα αδρανών (παρ4) τόσο τα αποτελέσματα είναι καλύτερα. Η αύξηση της ανοχής που προκαλούν τα λεπτόκοκκα πρόσμικτα αποδίδεται εκτός από τη

μείωση του νερού που επιτυγχάνεται –και επομένως στη μείωση του Ν/Τ- στην μείωση του πορώδους του μίγματος και στην βελτίωση των ιδιοτήτων της μεταβατικής ζώνης.



Σχ.5.11: Επίδραση λεπτόκοκκων πυριτικών πρόσμικτων στην αντοχή κονιαμάτων.(Kronlöf)

Έχει παρατηρηθεί ότι οι λεπτοί κόκκοι των πρόσμικτων αποτελούν σημεία καταβύθισης CSH που με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται η περιεκτικότητα σε CSH της μεταβατικής ζώνης και επομένως και η πυκνότητα η ομοιομορφία και η αντοχή της. Οι κόκκοι αυτοί γίνονται ένα μέρος του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού και συναποτελούν ένα στερεό υλικό. Η δράση αυτή προκαλεί επίσης και μία επιτάχυνση στην ανάπτυξη της αντοχής.

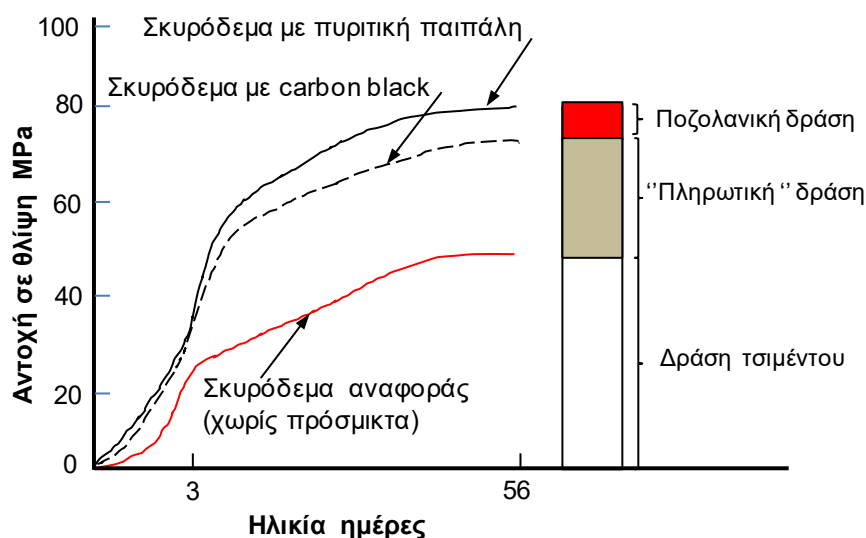
Ειδικότερα τα ασβεστολιθικά κυρίως, αλλά και τα χαλαζιακά πολύ λεπτόκοκκα πρόσμικτα εκτός από τις παραπάνω δράσεις, αναπτύσσουν και κάποια χημική επιφανειακή δράση με την αργιλική φάση του τσιμέντου που αυξάνει περαιτέρω την αντοχή.

Θα πρέπει να τονιστεί ότι η δράση γενικά των λεπτόκοκκων προσμικτων στο σκυρόδεμα δεν έχει επαρκώς ακόμη μελετηθεί και πολλά σημεία πρέπει να διερευνηθούν περισσότερο. Το θέμα όμως παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον όχι μόνο από την άποψη της βελτίωσης των χαρακτηριστικών και της οικονομικότητας του σκυροδέματος αλλά και από περιβαλλοντική άποψη. Ως γνωστόν το τσιμέντο, παρ'όλο το σχετικά χαμηλό κόστος του, εκτός από ενεργοβόρο υλικό, είναι υλικό που η παραγωγή του επιβαρύνει την ατμόσφαιρα με σημαντικές ποσότητες CO<sub>2</sub>. Εκτός από την μείωση που επιτεύχθηκε με τα νέα Ευρωπαϊκά πρότυπα τσιμέντου με την εισαγωγή της χρήσης ποζολανών και άλλων κατάλληλων υλικών μαζί με το κλίνκερ, η αντικατάσταση ποσοστού του τσιμέντου με πολύ λεπτόκοκκα πρόσμικτα αποτελεί μία ενδιαφέρουσα προοπτική. Βέβαια μία τέτοια λύση για την ώρα προσκρούει στο αυξημένο κόστος και την αυξημένη ενέργεια που απαιτείται για την παραγωγή των λεπτόκοκκων αυτών υλικών (πολύ αυξημένο κόστος άλεσης). Εκτός όμως από αυτές τις δυσκολίες θα πρέπει να επιλυθούν και θέματα υγιεινής και ασφάλειας του προσωπικού γιατί

τα πολύ λεπτόκοκκα υλικά είναι ιδιαίτερα επικίνδυνα για την υγεία και απαιτούν ιδιαίτερα μέτρα διαχείρισης.

Ορισμένα πρόσθετα υλικά όπως ποζολάνες (φυσικές ή τεχνητές) ιπτάμενες τέφρες, πυριτική παιπάλη κ.α ως λεπτόκοκκα υλικά έχουν τη δράση που περιγράφηκε παραπάνω αλλά επιπρόσθετα αναπτύσσουν και μία χημική συνδετική δράση που βελτιώνει περαιτέρω το σκυρόδεμα. Η βελτίωση αυτή είναι μεγαλύτερη όταν η διαβάθμιση των υλικών αυτών μαζί με την διαβάθμιση του τσιμέντου και των αδρανών συνδυάζονται έτσι ώστε να πληρούνται οι αρχές των θεωριών βέλτιστου στοιβάγματος αδρανών (βλ παρ 4) και είναι στο πεδίο αυτό που βρίσκουν ευρεία εφαρμογή οι θεωρίες και τα λογισμικά που έχουν αναπτυχθεί.

Στο Σχ. 5.12 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα διερεύνησης της σχετικής συμβολής της ποζολανικής και της "πληρωτικής" δράσης των λεπτόκοκκων πρισμιγμάτων στην αντοχή του σκυροδέματος. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε εκτός της πυριτικής παιπάλης (που ως γνωστόν αποτελείται από πολύ μεγάλο ποσοστό ποζολάνη) και της ίδιας λεπτότητας (<0.5μm) carbon black που θεωρείται ότι δεν αναπτύσσει χημική δράση (αδρανές) σε σκυροδέματα με  $N/T=0.46$ . Η σημαντική συμβολή στην αύξηση της αντοχής είναι εμφανής αλλά επίσης είναι ενδιαφέρον να παρατηρηθεί ότι η συμβολή της ποζολανικής δράσης (μετά από 56 ημέρες) είναι συγκριτικά με την "πληρωτική" δράση σχετικώς μικρή.



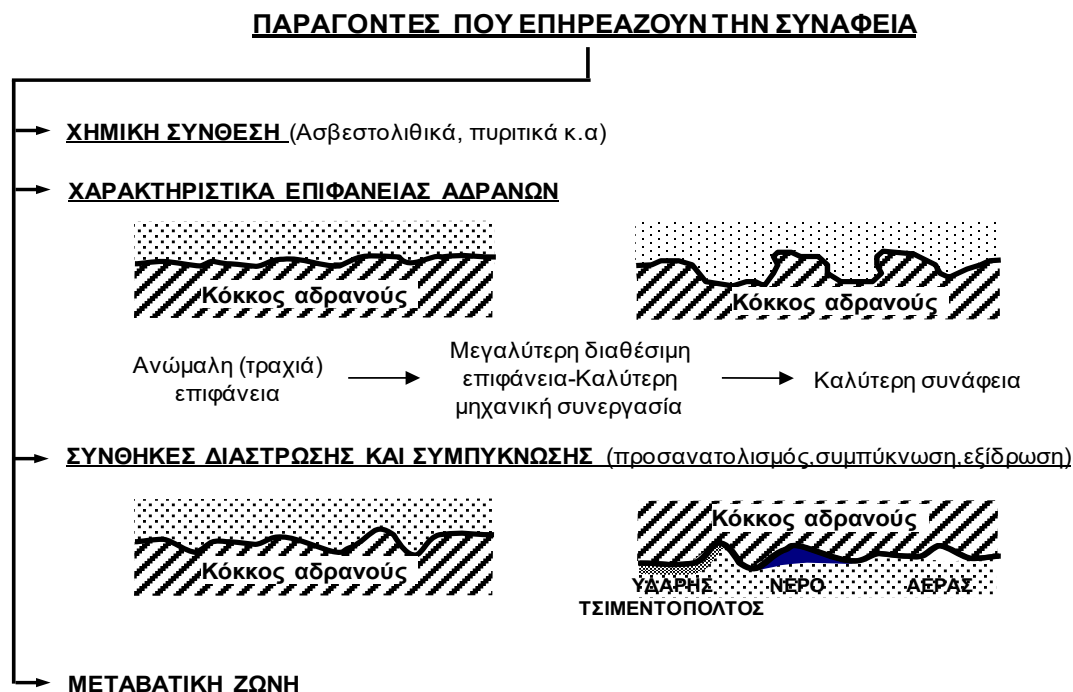
Σχ. 5.12: Μεταβολή της αντοχής με την ηλικία σε σκυρόδεμα με πυριτική παιπάλη σε σύγκριση με εκείνη σκυροδέματος με carbon black και σκυροδέματος χωρίς πρόσμικτα με τον ίδιο λόγο  $N/T$ . (Goldan & Bentur 1993)

#### 4.4 Συνάφεια –Μεταβατική ζώνη- Παράγοντες που επηρεάζουν

Η συνάφεια αδρανών και τσιμεντοπολτού/τσιμεντοκονιάματος είναι φαινόμενο πολύπλοκο που πολλά σημεία του είναι άγνωστα ή αδιευκρίνιστα. Καταρχήν η συνάφεια βασίζεται σε

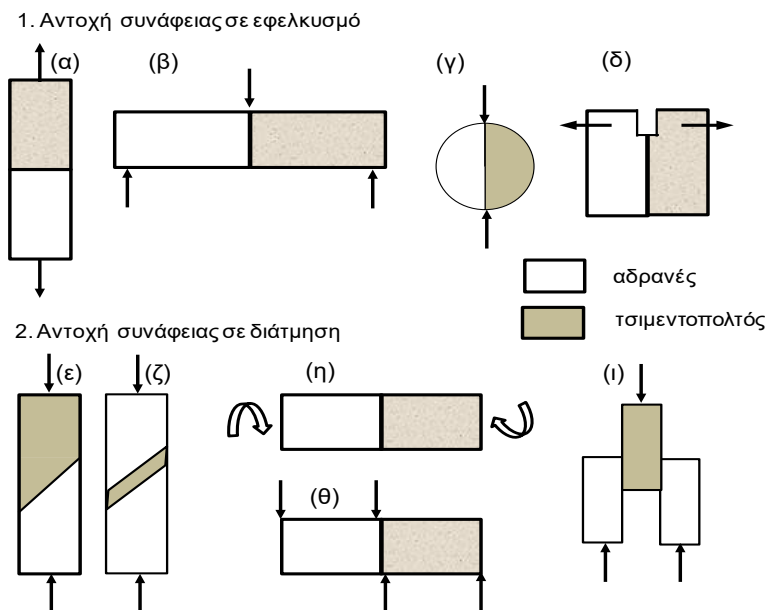
φυσικά – μηχανικά αίτια και λιγότερο σε χημικά αίτια αλλά σε όλα αυτά συνυπάρχει το φαινόμενο της μεταβατικής ζώνης και οι πολυπλοκότητές του. Οι δυσκολίες στη διερεύνηση του φαινομένου οφείλονται κατά κύριο λόγο σε δυσκολίες αναπαραγωγής του φαινομένου υπό εργαστηριακές συνθήκες. Αυτό αποδίδεται κυρίως στο ότι ο τσιμεντοπολτός που παρασκευάζεται στο εργαστήριο δεν είναι ο ίδιος με εκείνον που βρίσκεται μέσα στη μάζα του σκυροδέματος (καίτοι οι αναλογίες σύνθεσής του είναι οι ίδιες) καθώς τα φαινόμενα της μεταβατικής ζώνης της εξίδρωσης αλλά και της τοπικής ανομοιομορφίας πιστεύεται ότι μεταβάλλουν σημαντικά τις συνθήκες επαφής τσιμεντοπολτού και αδρανών και η μεταβατική ζώνη είναι διαφορετική από εκείνη των πραγματικών συνθηκών μέσα στη μάζα του σκυροδέματος.

Στο Σχ. 5.13 παρουσιάζονται οι βασικές παράμετροι της συνάφειας και οι παράγοντες που την επηρεάζουν και στο Σχ. 5.14 μερικές από τις μεθόδους δοκιμών που έχουν χρησιμοποιηθεί για την διερεύνησή των. Σημειώνεται ότι ακόμη δεν υπάρχουν τυποποιημένες εργαστηριακές μέθοδοι δοκιμής για συνάφεια.



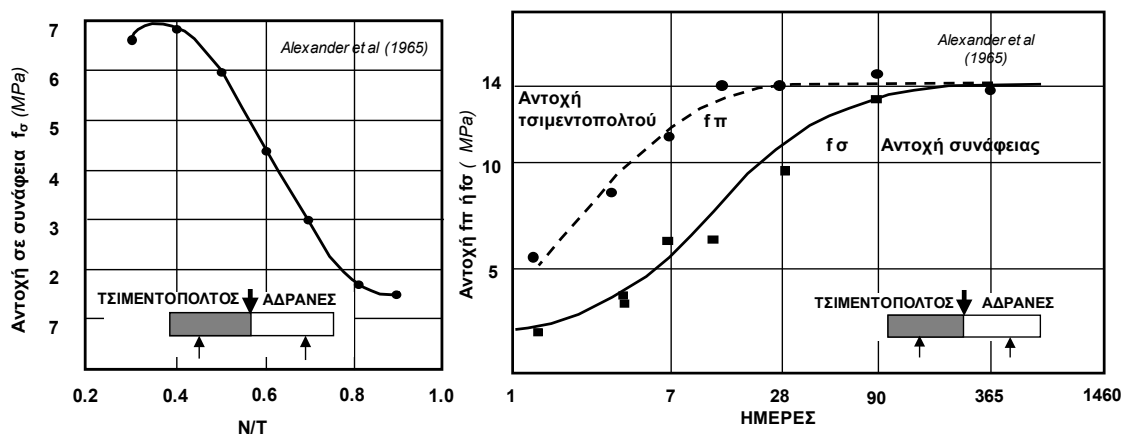
Σχ. 5.13: Παράγοντες που επηρεάζουν την συνάφεια

Σε όλες τις δοκιμές που φαίνονται στο Σχ23 θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι παρουσιάζουν σημαντικές δυσκολίες λόγω της εξίδρωσης και του διαχωρισμού που υφίστανται ορισμένες συνθέσεις τσιμεντοπολτών με σχετικώς μεγάλες τιμές του λόγου N/T, της επίδρασης του προσανατολισμού της επιφάνειας σε σχέση με τη βαρύτητα και της συστολής ξήρανσης του τσιμεντοπολτού



Σχ. 5.14: Δοκιμές για την διερεύνηση των παραμέτρων της συνάφειας 1. Συνάφεια σε εφελκυσμό (καθαρό (α), σε κάμψη (β), σε διάρρηξη (γ), σε σχάση (δ)) 2. Αντοχή διάτμησης σε διάτμηση (λοξή διάτμηση (ε) & (ζ), στρέψη (η), δοκός με 4 φορτία (θ), σάντουιτς (ι))

Η αντοχή σε συνάφεια εξαρτάται από την μορφή και την τραχύτητα της επιφάνειας καθώς και από την φύση (ορυκτολογική) του αδρανούς με την μεταβατική ζώνη να παίζει κυρίαρχο αλλά όχι πλήρως διερευνημένο ρόλο. Στο Σχ. 5.15 φαίνεται (με τις επιφυλάξεις που διατυπώθηκαν παραπάνω ως προς την αντιπροσωπευτικότητα του τσιμεντοπολτού και των συνθηκών συνάφειας) ότι η αντοχή σε συνάφεια ακολουθεί τη γνωστή σχέση "αντοχής-N/T" και επίσης έχει παρόμοια αλλά κάπως καθυστερημένη αύξηση με τον χρόνο.



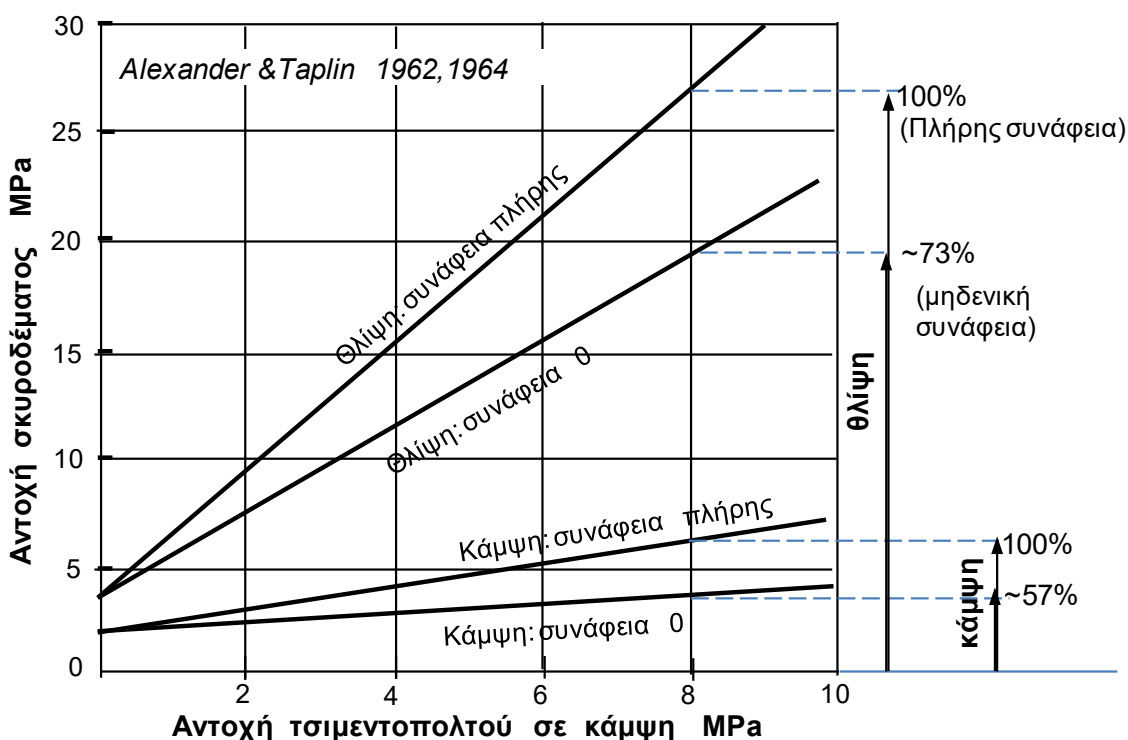
Σχ.5.15 : Επίδραση του λόγου N/T και της ηλικίας στην ανάπτυξη της αντοχής σε συνάφεια

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η συμβολή της συνάφειας στη αντοχή του σκυροδέματος (σε θλίψη ή κάμψη) και αυτό αποτελεί άλλο ένα θέμα που δεν έχει ακόμη διερευνηθεί επαρκώς. Στο Σχ. 5.16 φαίνεται ότι η συμβολή αυτή στη αντοχή σε θλίψη δεν είναι τόσο σημαντική καθώς η αντοχή για μηδενική συνάφεια μειώνεται στο 70% περίπου της αντοχής



για πλήρη συνάφεια. Στη αντοχή όμως σε κάμψη η μείωση της αντοχής για μηδενική συνάφεια είναι σημαντικότερη γιατί μειώνεται στο 50%-60% της αντοχής με πλήρη συνάφεια.

Αυτή η διαφορά μεταξύ αντοχής σε θλίψη και κάμψη θα μπορούσε να αποδοθεί στις εγγενείς διαφορές των δύο δοκιμών. Η αστοχία σε θλίψη προκαλείται μετά από τη δημιουργία πολύπλοκου δικτύου ρωγμών από αστοχία σε συνάφεια και έμμεσο εφελκυσμό όπου η εμπλοκή των αδρανών παίζει σημαντικό ρόλο (βλ κεφ 1), ενώ στην περίπτωση της κάμψης το δίκτυο ρωγμών είναι μικρότερο προκαλούμενο άμεσα από εφελκυσμό με πολύ μικρότερη συμβολή της εμπλοκής των αδρανών .



Σχ. 5 16 : Επίδραση της συνάφειας στην αντοχή του σκυροδέματος (Alexander & Taplin 1962,1964)

#### 4.5 Επιρροή της αντοχής των αδρανών

Εφόσον η αντοχή του σκυροδέματος δεν είναι μεγαλύτερη εκείνης των αδρανών δεν αναμένεται να επηρεάζεται σημαντικά η αντοχή του από την αντοχή των αδρανών. Αυτό συμβαίνει στις συνήθεις περιπτώσεις με συνήθη αδρανή, όπου η αντοχή του σκυροδέματος δεν υπερβαίνει τα 60 MPa και των αδρανών τα 80 MPa περίπου. Σε ακραίες όμως περιπτώσεις όπως πχ σε περιπτώσεις ελαφροσκυροδέματος με πορώδη αδρανή μικρής αντοχής ή σε περιπτώσεις σκυροδέματος πολύ υψηλής αντοχής ο κανόνας αυτός δεν ισχύει. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι ως αντοχή θραυστών αδρανών (λατομείου) θεωρείται η αντοχή πυρήνων που λήφθηκαν από το μητρικό πέτρωμα, αν και αυτή η αντοχή έχει πολύ μεγάλη μεταβλητότητα, λόγω των εγγενών ρωγμών και ασθενών επιπέδων που παρουσιάζουν συνήθως τα πετρώματα. Λαμβάνοντας δε υπόψη τον μηχανισμό θραύσης των αδρανών, είναι

αμφίβολο αν μπορεί να θεωρηθεί ότι η αντοχή των πυρήνων αντιπροσωπεύει σωστά την αντοχή των αδρανών που προήλθαν από μία τέτοια διαδικασία κατά την οποία η θραύση επέρχεται κυρίως στα ασθενέστερα σημεία του πετρώματος. Για τον λόγο αυτό η εισαγωγή σε προδιαγραφές ορίου αντοχής μητρικού πετρώματος έχει εγκαταλειφτεί. Για τα συλλεκτά αδρανή ή τα αδρανή που προέρχονται από θραύση συλλεκτών αδρανών μεγάλου σχετικά μεγέθους δεν είναι δυνατόν να προσδιοριστεί αντοχή του υλικού. Για τους λόγους αυτούς χρησιμοποιούνται άλλες δοκιμές (πχ Los Angeles EN 1097-2, ή/και micro-Deval EN 1097-1) οι οποίες κατά έμμεσο τρόπο δίνουν μία "εικόνα" της αντοχής του αδρανούς. Έχουν αναπτυχθεί και τυποποιηθεί μέθοδοι δοκιμής (BS 812 part 110<sup>28</sup> και part 111<sup>29</sup>) οι οποίες προσομοιάζουν την εντατική κατάσταση του αδρανούς μέσα στο σκυρόδεμα με το να εξετάζουν τη συμπεριφορά του αδρανούς σε θλίψη μέσα σε ένα χαλύβδινο κυλινδρικό δοκίμιο.

Για τα σκυροδέματα με υψηλή ή πολύ υψηλή αντοχή η χρήση αδρανών με μεγάλη αντοχή είναι απαραίτητη ενώ για τα ελαφροσκυροδέματα το γεγονός ότι τα ελαφρά αδρανή έχουν χαμηλή αντοχή δημιουργεί ένα "άνω όριο" στην αντοχή του σκυροδέματος που μπορεί να επιτευχθεί χωρίς την προσφυγή σε υπερβολική αύξηση της αντοχής του κονιάματος με μείωση του N/T σε βαθμό που επιφέρει δυσκολίες στην εργασιμότητα.

#### 4.6 Επιρροή του μέτρου ελαστικότητας των αδρανών

Το σκυρόδεμα είναι σύνθετο υλικό αποτελούμενο από

- αδρανή τα οποία στις συνήθεις περιπτώσεις έχουν υψηλό μέτρο ελαστικότητας ,
- τσιμεντοπολτό/τσιμεντοκονιάματος με μικρότερο συνήθως μέτρο ελαστικότητας που περιβάλλει τα αδρανή και
- την διεπιφανειακή μεταβατική ζώνη η οποία καθορίζει τις συνθήκες συνεργασίας των δύο υλικών -την συνάφεια μεταξύ των- και αποτελεί το ασθενέστερο συστατικό του σύνθετου υλικού

Είναι επομένως αναμενόμενο το μέτρο ελαστικότητας, ως ένας βασικός παράγων της κατανομής των τάσεων μέσα στο σύνθετο υλικό, να παίζει σημαντικό ρόλο στην αντοχή διότι όσο υψηλότερο είναι, τόσο μεγαλύτερο μέρος των τάσεων αναλαμβάνεται από τη φάση των αδρανών και τόσο μικρότερο μέρος από τη φάση του τσιμεντοπολτού/τσιμεντοκονιάματος που αποτελεί και το ασθενέστερο συστατικό. Πράγματι η πρωτοπόρος εργασία του Karlap καταδεικνύει αυτό με τις ακόλουθες εμπειρικές σχέσεις που προέκυψαν με στατιστική παλινδρόμηση των πειραματικών αποτελεσμάτων του:

$$\text{Αντοχή σε κάμψη } f_b = 18.1 * E + 9.1 * \Delta\Gamma + 3.85 * T + 375 \quad [\text{psi}]$$

$$\text{Αντοχή σε θλίψη } f_c = 64 * E + 35 * \Delta\Gamma + 25 * T + 5400 \quad [\text{psi}]$$

Όπου:

E το μέτρο ελαστικότητας σε θλίψη των αδρανών

$\Delta\Gamma$  ο δείκτης γωνιώδους των αδρανών (βλ 2.2.3)

T δείκτης τραχύτητας επιφάνειας των αδρανών

Παρατηρείται ότι ο συντελεστής παλινδρόμησης για το μέτρο ελαστικότητας είναι περίπου διπλάσιος του αμέσως επόμενου σε σπουδαιότητα παράγοντα δηλ του Δείκτη γωνιώδους.

<sup>28</sup> aggregate crushing value

<sup>29</sup> ten percent fines value

