

Υλικά Σκυροδέματος Οδοστρωμάτων – Δαπέδων: Αδρανή και Εναλλακτικές Κονίες

Ελ. Αναστασίου
Πολιτικός Μηχανικός MSc

ΕΠΙΜΟΡΦΩΤΙΚΟ ΣΕΜΙΝΑΡΙΟ ΓΙΑ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥΣ

ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΑ ΑΠΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

ΟΙ ΔΡΟΜΟΙ ΤΟΥ ΜΕΛΛΟΝΤΟΣ

3 – 6 Νοεμβρίου, 2008, Αθήνα



Το Κανονιστικό Πλαίσιο

Σκοπός:

- Ασφάλεια κατασκευών
- Αποφυγή αστοχιών
- Προώθηση δομικών υλικών
- Ειδικές απαιτήσεις / έλεγχοι ανάλογα με τη φύση των υλικών
- Εναρμόνιση με τις συνθήκες της αγοράς



Κανονισμοί και οδηγίες σχετικά με οδοστρώματα από σκυρόδεμα

- EN 13877: Concrete Pavements
- AASHTO: Guide for design of pavement structures
- TM 5-822-7/AFM 88-6: Standard practice for concrete pavements
- BS 4987: Coated macadam (asphalt concrete) for roads and other paved areas. Specifications for constituent materials and mixtures.
- ΠΕΤΕΠ 05-03-07-00: Κυλινδρούμενο σκυρόδεμα οδοστρωμάτων



Κανονισμοί σχετικά με τη χρήση αδρανών

- EN 12620: Αδρανή για σκυρόδεμα
- EN 13242: Aggregates for unbound and hydraulically bound materials for use in civil engineering work and road construction
- EN 13043: Αδρανή για ασφαλτομίγματα οδοστρωμάτων
- ASTM C33: Concrete Aggregates
- ΕΛΟΤ 408: Θραυστά αδρανή για συνήθη σκυροδέματα
- BS 63: Road aggregates



Κανονισμοί σχετικά με τη χρήση αδρανών

- EN 932: Δειγματοληψία για γενικό έλεγχο ιδιοτήτων αδρανών
- EN 933: Δοκιμές γεωμετρικών ιδιοτήτων αδρανών
- EN 1097: Δοκιμές μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων αδρανών
- EN 1744: Δοκιμές για τον προσδιορισμό των χημικών ιδιοτήτων των αδρανών
- EN 1367: Δοκιμές έναντι καιρικών και θερμικών μεταβολών των αδρανών
- ΕΛΟΤ 747: Έλεγχος φυσικών λίθων και αδρανών υλικών



Γενικές απαιτήσεις αδρανών κατά EN 12620 και EN 13242

Ως αδρανή ορίζονται:

«τα κοκκώδη υλικά που προκύπτουν από την επεξεργασία φυσικών ή βιομηχανικά παρασκευασμένων ή και ανακυκλωμένων υλικών που έχουν ξηρή πυκνότητα μεγαλύτερη από $2,0 \text{ kg/m}^3$ »

και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε σκυρόδεμα συνήθων κατασκευών που εμπίπτουν στο πρότυπο EN 206-1



Ειδικές απαιτήσεις αδρανών κατά EN 12620 και EN 13242

- Κοκκομετρία
- Μορφολογικά χαρακτηριστικά
- Φυσικές ιδιότητες
- Χημικές ιδιότητες
- Απαιτήσεις ανθεκτικότητας



Κοκκομετρικές απαιτήσεις

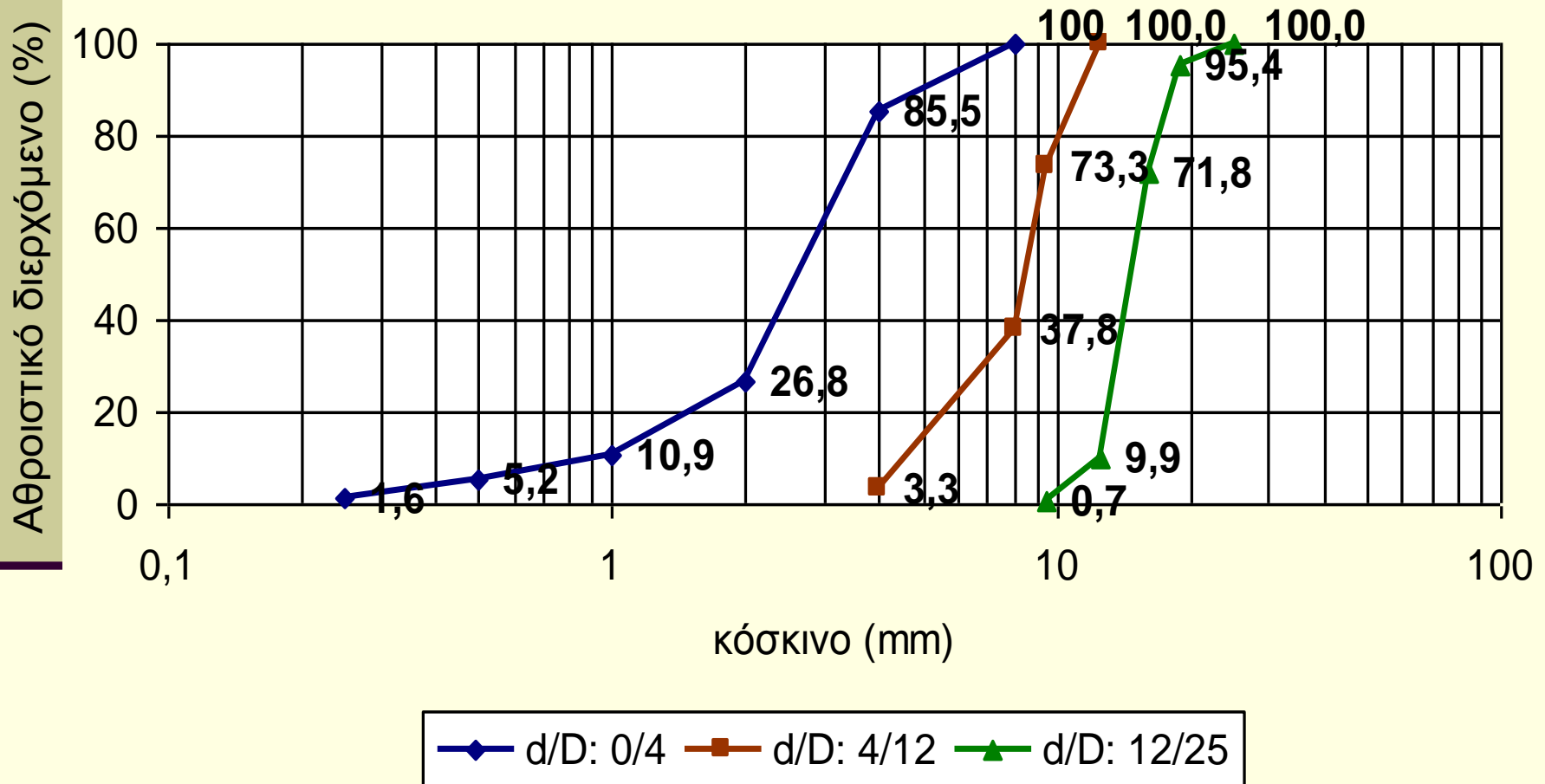
■ Κατάταξη αδρανών σε κατηγορίες κατά EN 13242

Aggregate	Size mm	Percentage passing by mass					Category G
		$2 D^a$	$1,4 D^{b c}$	D^d	$d^{c e}$	$d/2^{b c}$	
Coarse	$d \geq 1$	100	98 to 100	85 to 99	0 to 15	0 to 5	$G_C 85-15$
	and $D > 2$	100	98 to 100	80 to 99	0 to 20	0 to 5	$G_C 80-20$
Fine	$d = 0$	100	98 to 100	85 to 99	–	–	$G_F 85$
	and $D \leq 6,3$	100	98 to 100	80 to 99	–	–	$G_F 80$
All-in	$d = 0$	–	100	85 to 99	–	–	$G_A 85$
	and $D > 6,3$	100	98 to 100	80 to 99	–	–	$G_A 80$
		100	–	75 to 99	–	–	$G_A 75$



Κοκκομετρικές απαιτήσεις

■ Κατάταξη αδρανών σε κατηγορίες των κανονισμών



Κοκκομετρικές απαιτήσεις

- Κατάταξη αδρανών ανάλογα με την περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκα

Aggregate	Mass fraction of passing 0,063 mm sieve, %	Category f
Coarse	≤ 2	f_2
	≤ 4	f_4
	> 4	f_{Declared}
	No requirement	f_{NR}
Fine	≤ 3	f_3
	≤ 7	f_7
	≤ 10	f_{10}
	≤ 16	f_{16}
	≤ 22	f_{22}
	> 22	f_{Declared}
	No requirement	f_{NR}
All-in	≤ 3	f_3
	≤ 5	f_5
	≤ 7	f_7
	≤ 9	f_9
	≤ 12	f_{12}
	≤ 15	f_{15}
	> 15	f_{Declared}
	No requirement	f_{NR}



Μορφολογικά χαρακτηριστικά

- Κατάταξη αδρανών ανάλογα με το δείκτη πλακοειδούς

Flakiness index	Category Fl
≤ 20 ≤ 35 ≤ 50 > 50	Fl_{20} Fl_{35} Fl_{50} $Fl_{Declared}$
No requirement	Fl_{NR}



Μορφολογικά χαρακτηριστικά

- Κατάταξη αδρανών ανάλογα με το ποσοστό θραυστών και στρογγυλεμένων κόκκων

Mass fraction of crushed or broken particles %	Mass fraction of totally rounded particles %	Category C
90 to 100	0 to 3	$C_{90/3}$
50 to 100	0 to 10	$C_{50/10}$
50 to 100	0 to 30	$C_{50/30}$
-	0 to 50	$C_{NR/50}$
-	0 to 70	$C_{NR/70}$
Declared value	Declared value	$C_{Declared}$
No requirement	No requirement	C_{NR}



Φυσικά χαρακτηριστικά

- Αντοχή σε τριβή και κρούση
 - Αντοχή κατά Los Angeles

Los Angeles coefficient	Category <i>LA</i>
≤ 15	<i>LA</i> ₁₅
≤ 20	<i>LA</i> ₂₀
≤ 25	<i>LA</i> ₂₅
≤ 30	<i>LA</i> ₃₀
≤ 35	<i>LA</i> ₃₅
≤ 40	<i>LA</i> ₄₀
≤ 50	<i>LA</i> ₅₀
> 50	<i>LA</i> _{Declared}
No requirement	<i>LA</i> _{NR}

Polished stone value	Category <i>PSV</i>
≥ 68 ≥ 62 ≥ 56 ≥ 50 ≥ 44 Intermediate values and those < 44	<i>PSV</i> ₆₈ <i>PSV</i> ₆₂ <i>PSV</i> ₅₆ <i>PSV</i> ₅₀ <i>PSV</i> ₄₄ <i>PSV</i> _{Declared}
No requirement	<i>PSV</i> _{NR}

Aggregate abrasion value	Category <i>AAV</i>
≤ 10 ≤ 15 ≤ 20 Intermediate values and those > 20	<i>AAV</i> ₁₀ <i>AAV</i> ₁₅ <i>AAV</i> ₂₀ <i>AAV</i> _{Declared}
No requirement	<i>AAV</i> _{NR}

β) Αντοχή σε στίλβωση (PPV)

γ) Αντοχή σε απότριψη (AAV)



Φυσικά χαρακτηριστικά

■ Αντοχή σε φθορά (micro-Deval)

micro-Deval coefficient	Category M_{DE}
≤ 10	$M_{DE}10$
≤ 15	$M_{DE}15$
≤ 20	$M_{DE}20$
≤ 25	$M_{DE}25$
≤ 35	$M_{DE}35$
> 35	$M_{DE}Declared$
No requirement	$M_{DE}NR$

■ Πρόσθετοι έλεγχοι φυσικών χαρακτηριστικών:

- Πυκνότητα
- Υδαταπορροφητικότητα



Χημικά χαρακτηριστικά

- Περιεκτικότητα σε θειικά διαλυτά σε οξέα και σε συνολική περιεκτικότητα σε θείο

Aggregate	Acid soluble sulfate content %	Category AS	Aggregate	Total sulfur content %	Category S
Aggregates other than air-cooled blastfurnace slag	$\leq 0,2$	$AS_{0,2}$	Aggregates other than air-cooled blastfurnace slag	≤ 1	S_1
	$\leq 0,8$	$AS_{0,8}$		> 1	$S_{Declared}$
	$> 0,8$	$AS_{Declared}$		No requirement	S_{NR}
Air-cooled blastfurnace slag	No requirement	AS_{NR}	Air-cooled blastfurnace slag	≤ 2	S_2
	$\leq 1,0$	$AS_{1,0}$		> 2	$S_{Declared}$
	$> 1,0$	$AS_{Declared}$		No requirement	S_{NR}
No requirement	AS_{NR}				

- Δεν πρέπει να περιέχονται ουσίες που να επηρεάζουν το χρόνο πήξης και σκλήρυνσης και την τελικά αντοχή ώστε:
 - α) να αυξάνεται ο χρόνος πήξης περισσότερο από 120 λεπτά
 - β) να μειώνονται οι αντοχές περισσότερο από 20% στις 28 ημέρες



Απαιτήσεις ανθεκτικότητας

■ Αντοχή σε ψύξη-απόψυξη

Freeze-thaw Percentage loss of mass ^a	Category F
≤ 1	F_1
≤ 2	F_2
≤ 4	F_4
> 4	F_{Declared}
No requirement	F_{NR}

^a In extreme situations of cold weather and/or salt or de-icing salt saturation, then tests using a salt solution or urea as detailed in EN 1367-1:1999, annex B, may be more appropriate. The limits in this table would not apply.

■ Πρόσθετοι έλεγχοι ανθεκτικότητας:

- Έλεγχος θειικού μαγνησίου
- Σταθερότητα όγκου – συστολή ξήρανσης
- Αλκαλιοπυριτική αντίδραση



Απαιτήσεις ανθεκτικότητας

- Έλεγχος υδαταπορροφητικότητας

Water absorption Percentage by mass %	Category WA_{24}
≤ 1	$WA_{24} 1$
≤ 2	$WA_{24} 2$

NOTE The water absorption test as a screening test is not applicable for blastfurnace slag.

- Σύμφωνα με τον EN 13242 αν ένα αδρανές έχει υδαταπορροφητικότητα $< 0,5\%$ θεωρείται ανθεκτικό σε ψύξη-απόψυξη



Δυνατότητα χρήσης εναλλακτικών αδρανών

- Διαθεσιμότητα
- Συνθήκες αγοράς
- Κυβερνητική πολιτική
- Εκπλήρωση απαιτήσεων κανονισμών
- Εκπλήρωση ειδικών απαιτήσεων κανονισμών (αντιολισθηρότητα, μεγάλο ειδικό βάρος κτλ.)
- Παραδείγματα:
 - Ανακυκλωμένο σκυρόδεμα
 - Αδρανή σκωρίας
 - Γυαλί



Ανακυκλωμένο σκυρόδεμα

- Ομοιογένεια
- Απομάκρυνση οπλισμών
- Έλεγχος παιπάλης
- Χρήση σε συνδυασμό με συμβατικά αδρανή (φυσική άμμος)
- Φθηνή πρώτη ύλη



Σκωρία χαλυβουργίας

- Διαφορετικό προϊόν ανάλογα με το εργοστάσιο και τις συνθήκες παραγωγής
- Μεγάλο ειδικό βάρος
- Μεγάλη υδαταπορροφητικότητα
- Μεγάλη σκληρότητα-ανθεκτικότητα
- Αντιολισθηρότητα
- Έλεγχος περιεκτικότητας σε ανεπιθύμητες ουσίες
- Έλεγχος αλκαλιοπυριτικής αντίδρασης



Υλικά που συνεργάζονται με το σκυρόδεμα

- Ανόργανα υλικά που διακρίνονται σε ποζολανικές και υδραυλικές κονίες, αναφέρονται και ως πρόσθετα
- Χρησιμοποιούνται με μερική αντικατάσταση (συνήθως κατά βάρος) του τσιμέντου
- Επίσης χρησιμοποιούνται με συνάλεση στο κλίνκερ του τσιμέντου (σύνθετα τσιμέντα)
- Μπορούν να βελτιώσουν την αντοχή, την εργασιμότητα και την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος
- Γενικά είναι φθηνότερα από το τσιμέντο



Το περιβαλλοντικό όφελος

- Η χρήση των πρόσθετων υλικών μειώνει την κατανάλωση ενέργειας και την έκλυση CO₂ όταν αντικαθιστά τσιμέντο (Συνθήκη του Κυότο, Ευρωπαϊκές οδηγίες)
- Δίνει χρήση σε βιομηχανικά παραπροϊόντα που εναποτίθενται στο περιβάλλον
- Βελτιώνουν την ανθεκτικότητα των κατασκευών στο χρόνο, άρα μειώνουν το κόστος μελλοντικών επισκευών ή ανακατασκευών



Τύποι προσθέτων

- Ο EN 206 διαχωρίζει δύο τύπους
- Πρόσθετο τύπου I (πρακτικά αδρανές)
 - Ασβεστολιθική παιπάλη (EN 12620)
 - Βαφές (EN 12878)
- Πρόσθετο τύπου II (με υδραυλικές ή ποζολανικές ιδιότητες)
 - Ιπτάμενη τέφρα (EN 450)
 - Silica fume (EN 13263)



Κριτήρια επιλογής πρόσθετου υλικού

Οικονομικοί λόγοι:

- Να μην αναστέλλει την ενυδάτωση του τσιμέντου
- Να μην επιβαρύνει το περιβάλλον
- Να μη θέτει σε κίνδυνο την υγεία των εργατών
- Να βελτιώνει κάποια από τις ιδιότητες του σκυροδέματος (εργασιμότητα, αντοχή)
- Να βελτιώνει την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος

Ειδικοί λόγοι:

- Να βελτιώνει κάποια από τις ιδιότητες του σκυροδέματος σε μεγάλο βαθμό
- Να δίνει κάποια πρόσθετη ιδιότητα στο σκυρόδεμα (αντιολισθηρότητα)



Τύποι

- Φυσικά υλικά (ASTM C618 τύπου N)
 - Από φυσικές εναποθέσεις, όπως οι ηφαιστειακές τέφρες
 - Μετά από θερμική επεξεργασία, όπως ο μετακαολίνης και η τέφρα από την αποφλοίωση του ρυζιού (rice husk ash)
- Παραπροϊόντα
 - Silica fume
 - Ιπτάμενη τέφρα
 - Σκωρία



Προέλευση των υλικών - Ποζολάνες

- Οι Ρωμαίοι χρησιμοποίησαν πρώτοι ηφαστειακή τέφρα μαζί με άσβεστο (CaO) σαν τσιμέντο
- Η λέξη ποζολάνη προέρχεται από το χωριό Pozzuoli κοντά στη Νάπολη
- Σήμερα η λέξη “ποζολάνη” αναφέρεται για να περιγράψει όλα τα υλικά που περιέχουν οξειδία του πυριτίου και αντιδρούν με το CaO παρουσία νερού

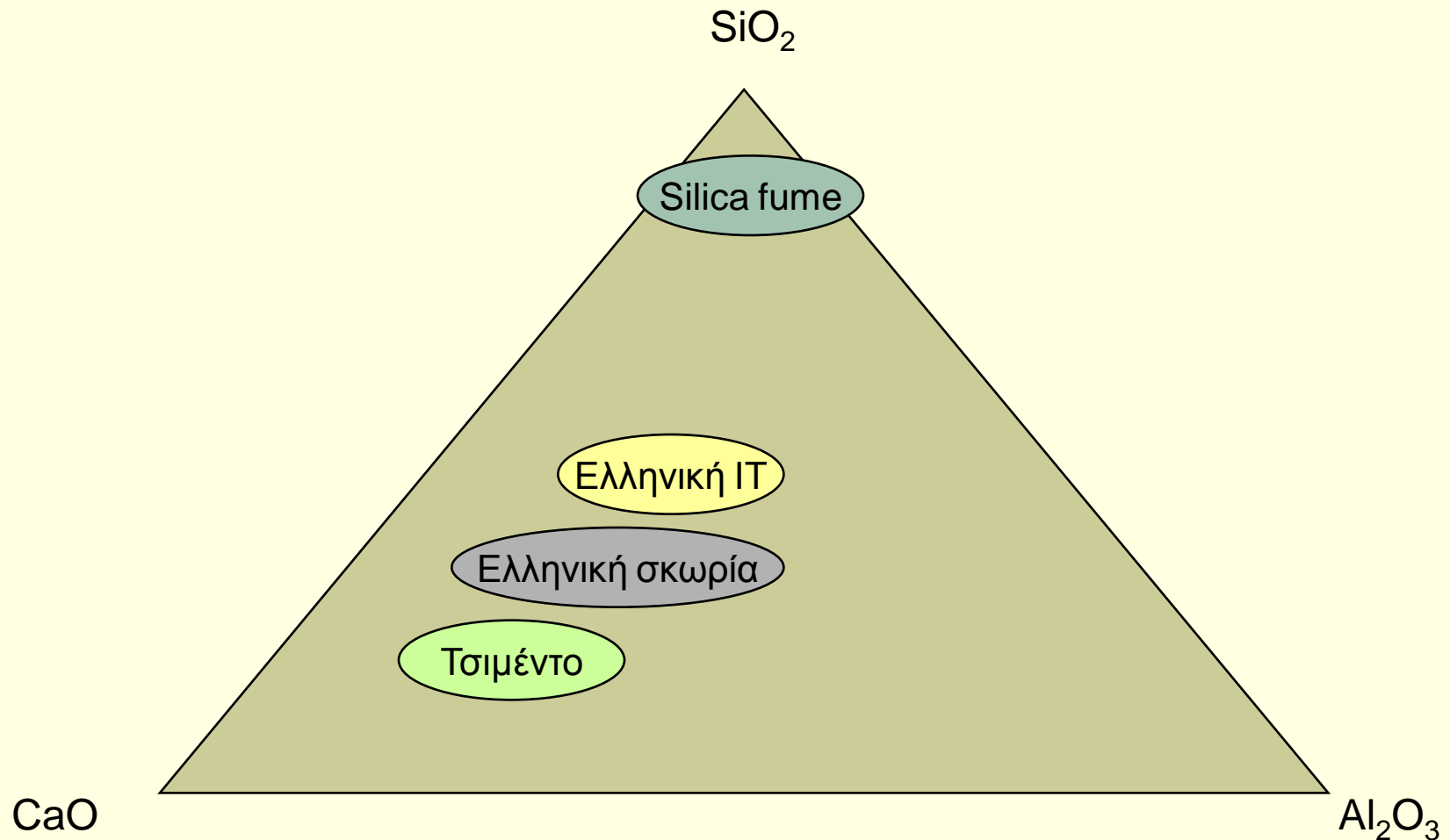


Ενδεικτική Χημική σύσταση

	Τσιμέντο Πόρτλαντ	Ιπτάμενη τέφρα (Class C)	Ιπτάμενη τέφρα (Ελληνική)	Ελληνική σκωρία	Μετακαολίνης
SiO ₂	20	37	31	16	48
Al ₂ O ₃	5	16	15	5	38
Fe ₂ O ₃ FeO	4	7	4	25	1
CaO	65	16	33	39	~0
MgO	2	7	3	5	~0



Ενδεικτική Χημική σύσταση

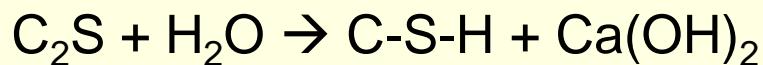
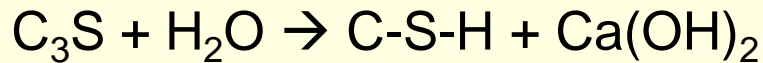


Η ενυδάτωση του τσιμέντου

- Βασικά συστατικά του τσιμέντου:

- C_3S (58%)
- C_2S (18%)
- C_3A (6%)
- C_4AF (12%)

- Η αντίδραση:

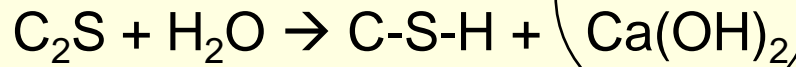
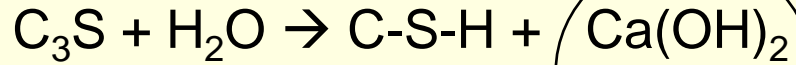


Ανάπτυξη αντοχής

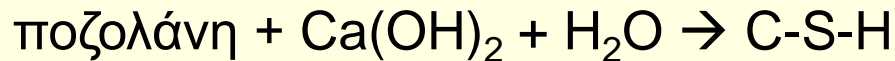
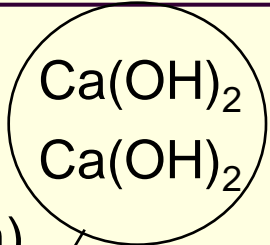
Δεν προσδίδει αντοχή, διαρρέει εύκολα



Η ποζολανική αντίδραση



(ταχεία αντίδραση)



(αργή αντίδραση)

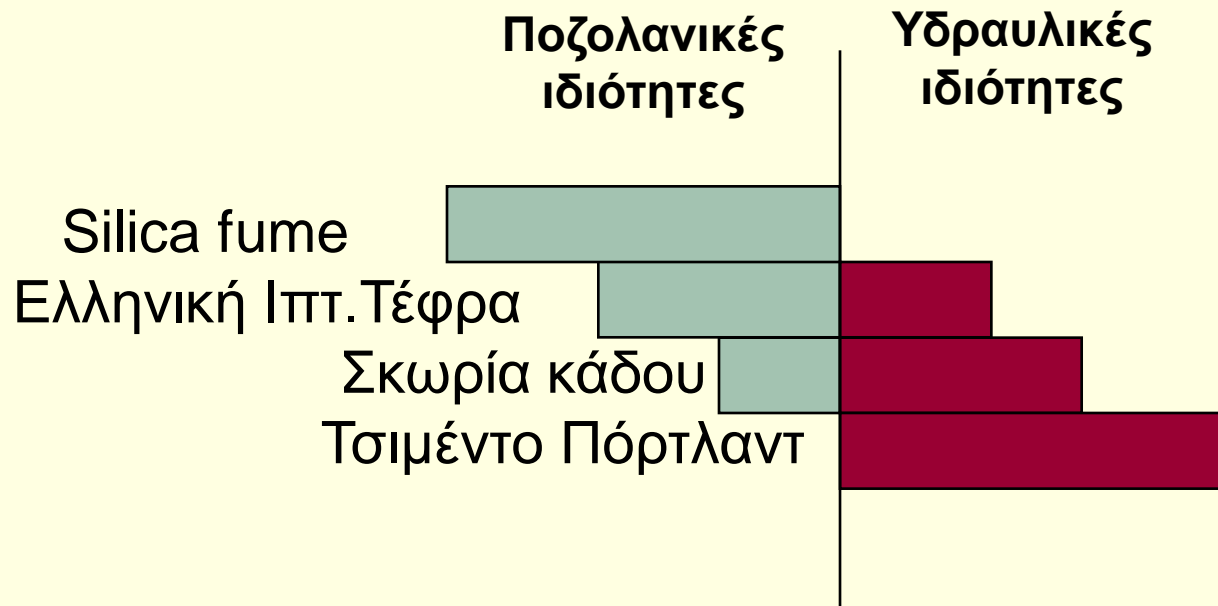


Υδραυλικές – ποζολανικές κονίες

- Οι υδραυλικές κονίες αντιδρούν χημικά με το νερό με αποτέλεσμα τη σταθεροποίηση και τη σκλήρυνσή τους
- Οι ποζολανικές κονίες (ποζολάνες) αντιδρούν χημικά με το υδροξείδιο του ασβεστού και με το νερό και δίνουν προϊόντα με τσιμεντοειδείς ιδιότητες



Υδραυλικότητα – ποζολανικότητα κονιών



Ιπτάμενη Τέφρα

- Το γνωστότερο και συνηθέστερο πρόσθετο υλικό παγκοσμίως
- Χρησιμοποιείται πάνω από 50 χρόνια στο σκυρόδεμα
- Ορισμός: «Το λεπτά διαμερισμένο υλικό που παράγεται από την καύση του κάρβουνου (λιγνίτη) και μεταφέρεται με τα καυσαέρια από την περιοχή καύσης στα φίλτρα, από όπου και συλλέγεται»
- Ανόργανο, άκαυστο υλικό
- Περίπου το 1/20 του κόστους του τσιμέντου
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ποσοστό αντικατάστασης του τσιμέντου μέχρι 50% ή και παραπάνω
- Αντιδρά αργότερα από τα περισσότερα πρόσθετα



Ιπτάμενη Τέφρα



Ο μύλος κατεργασίας τέφρας της ΔΕΗ



Δύο κατηγορίες Ιπτάμενης Τέφρας

- Class F
 - $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 70\%$
 - Ποζολανική κονία
 - Παράγεται από την καύση ανθρακίτη
 - Δεν παράγεται στην Ελλάδα
- Class C
 - $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 50\%$
 - Ποζολανική και υδραυλική κονία
 - Παράγεται από την καύση λιγνίτη
 - Η ελληνική ΙΤ δεν εντάσσεται στην κατηγορία γιατί δεν πληροί το πρώτο κριτήριο (υπό ένταξη)



Silica fume (Πυριτική παιπάλη)

- Πολύ αντιδραστική ποζολάνη λόγω μεγάλης περιεκτικότητας σε άμορφο πυρίτιο και πολύ μικρού μέγεθος κόκκων (μεγάλη ειδική επιφάνεια)
- Παραπροϊόν της διαδικασίας παραγωγής πυριτικών και σιδηροπυριτικών κραμάτων
- Γνωστό επίσης με την ονομασία microsilica
- Ετήσια παραγωγή στις ΗΠΑ 200.000 τόνοι/έτος
- Στην Ελλάδα δεν παράγεται και εισάγεται σε μικρές ποσότητες
- Αντικαθιστά το τσιμέντο σε ποσοστό 5-15%
- Περίπου τετραπλάσιο κόστος από το τσιμέντο

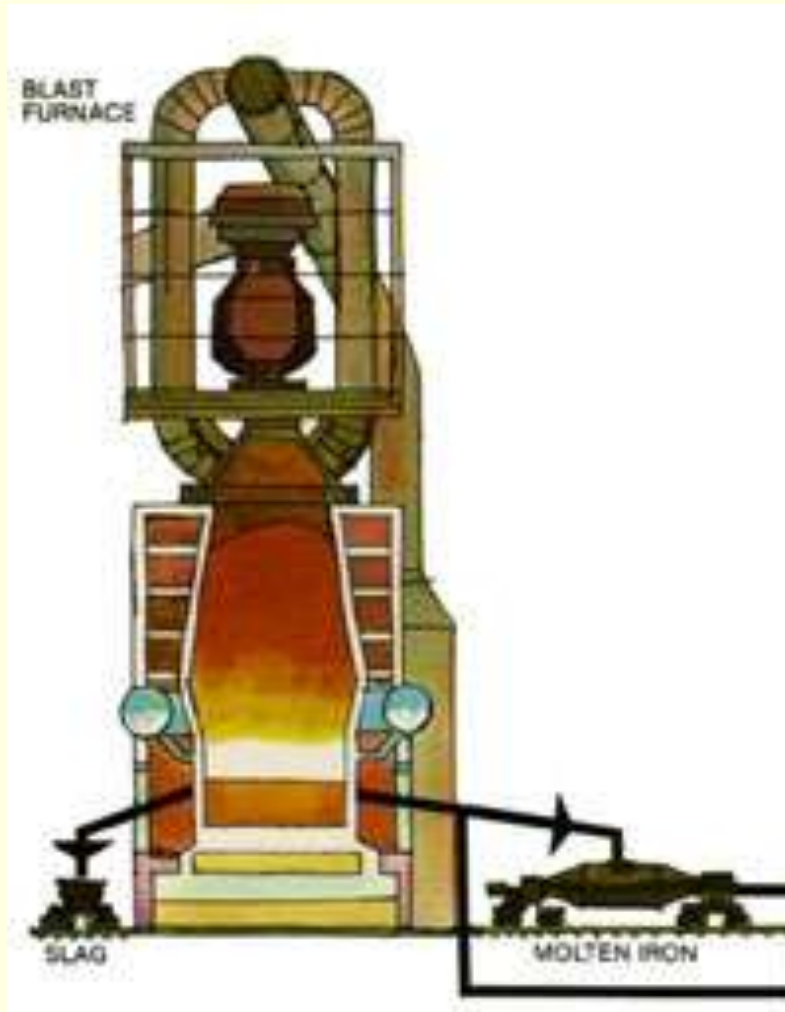


Σκωρία

- Παραπροϊόν της διαδικασίας παραγωγής χάλυβα
- Χρησιμοποιείται στο σκυρόδεμα για πάνω από 100 χρόνια
- Διακρίνεται ανάλογα με τον τρόπο παραγωγής και τον τρόπο ψύξης (αερόψυκτη-υδρόψυκτη) σε
 - Σκωρία υψικαμίνου – ggbs (δεν παράγεται στην Ελλάδα)
 - Σκωρία κάδου (παράγεται στην Ελλάδα – αερόψυκτη)
- Κόστος περίπου 70-80% του τσιμέντου
- Η σκωρία υψικαμίνου αντικαθιστά το τσιμέντο σε ποσοστά 20-70% (ανάλογα με την ποιότητα)



Διαδικασία παραγωγής σκωρίας



Άλλα υλικά

Φυσικές ποζολάνες

- Ηφαιστειακές τέφρες (Θηραϊκή γη, Μηλαϊκή γη)
- Χρησιμοποιούνται εδώ και 3000 χρόνια
- Δίνουν πολύ καλές μακροπρόθεσμες ιδιότητες
- Κόστος μεγαλύτερο του τσιμέντου
- Σήμερα χρησιμοποιούνται κυρίως σε επισκευές μνημείων και παραδοσιακών κτιρίων



Άλλα υλικά

Metakaolin

- Παράγεται με θερμική επεξεργασία (700-900°C) του καολίνης (πηλός)
- Υπάρχει στην Ελλάδα
- Αντικατάσταση τσιμέντου σε ποσοστό 5-15%

Rice Husk Ash (παιπάλη φλοιού ρυζιού)

- 90 εκατομμύρια τόνοι ετήσια παγκόσμια παραγωγή
- Πολύ ενεργή ποζολάνη (SiO_2)
- Απαιτείται κατεργασία (καθαρισμός)



Επιπτώσεις πρόσθετων υλικών στο σκυρόδεμα

Νωπό σκυρόδεμα

- Απαίτηση νερού
- Εργασιμότητα
- Εξίδρωση
- Θερμότητα ενυδάτωσης
- Χρόνος πήξης

Σκληρυμένο σκυρόδεμα

- Μηχανικές ιδιότητες
- Ανθεκτικότητα



Επιπτώσεις πρόσθετων υλικών στην απαίτηση νερού/εργασιμότητα

Ιπτάμενη Τέφρα (ελληνική)

- Απαιτεί περισσότερο νερό, μειώνει την εργασιμότητα
- Πρέπει να ληφθεί υπόψη η απαιτούμενη ποσότητα νερού στη μελέτη σύνθεσης

Σκωρία κάδου

- Δεν απαιτεί περισσότερο νερό, μπορεί να βελτιώσει την εργασιμότητα ανάλογα με το μέγεθος κόκκων

Silica fume

- Μειώνει το απαιτούμενο νερό, αλλά μειώνει και την εργασιμότητα (χρήση ρευστοποιητή)



Επιπτώσεις πρόσθετων υλικών στην εξίδρωση

Ιπτάμενη Τέφρα (ελληνική)

- Μειώνει την εμφάνιση του φαινομένου

Σκωρία

- Μειώνει την εμφάνιση του φαινομένου όταν είναι σε λεπτό διαμερισμό

Silica fume

- Μειώνει πάρα πολύ την εξίδρωση, μπορεί και να την εξαφανίσει τελείως, κάνοντας δύσκολη το τελείωμα επιφανειών



Επιπτώσεις πρόσθετων υλικών στη θερμότητα ενυδάτωσης

- Όλα τα πρόσθετα υλικά μειώνουν σημαντικά τη θερμότητα ενυδάτωσης λόγω της ποζολανικής αντίδρασης
- Πολύ χρήσιμα για περιπτώσεις:
 - Μεγάλης μάζας σκυροδέματος (φράγματα, μπλόκια)
 - Μεγάλων διατομών
 - Σκυροδέτησης σε υψηλή θερμοκρασία



Επιπτώσεις πρόσθετων υλικών στο χρόνο πήξης

Ιπτάμενη Τέφρα (ελληνική)

- Αυξάνει το χρόνο έναρξης πήξης του σκυροδέματος κατά 15-60 λεπτά

Σκωρία κάδου

- Ανάλογα με το μέγεθος κόκκων

Silica fume

- Μειώνει το χρόνο πήξης (επιταχυντική ιδιότητα)



Επιπτώσεις πρόσθετων υλικών στη θλιπτική αντοχή σκυροδέματος

Ιπτάμενη Τέφρα

- Πρόωρες αντοχές και αντοχή 28 ημερών μικρότερες από αυτές του καθαρού τσιμέντου
- Μακροπρόθεσμα (90 ημέρες) μεγαλύτερη αντοχή από το καθαρό τσιμέντο

Σκωρία κάδου

- Μειωμένες πρόωρες αντοχές (ενεργοποίηση)
- Αντοχή 28 ημερών ίση με το καθαρό τσιμέντο

Silica fume

- Αυξάνει τόσο τις πρόωρες όσο και τη μακροπρόθεσμη αντοχή μέχρι και 20%



Επιπτώσεις πρόσθετων υλικών στην ανθεκτικότητα

Όλα τα ποζολανικά υλικά βελτιώνουν την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος λόγω:

- Καλύτερη κατανομή πόρων (λόγω κοκκομετρίας και ταχύτητας αντίδρασης)
- Καλύτερη διεπιφανειακή ζώνη αδρανών-τσιμεντοπήγματος
- Μειωμένη διαπερατότητα
- Μείωση των υδατοδιαλυτών προϊόντων της ενυδάτωσης του τσιμέντου ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)



Μίγματα με πάνω από δύο κονίες

- Τσιμέντο + 2 ή 3 διαφορετικές κονίες
- Αντιμετωπίζονται τα προβλήματα εργασιμότητας και χαμηλών πρόωρων αντοχών
- Αντιμετωπίζονται καλύτερα προβλήματα ανθεκτικότητας (αλκαλιοπυριτική αντίδραση, ενανθράκωση)

