

Αξιοποίηση Αποβλήτων Κοπής Μαρμάρου στην Παραγωγή Σύνθετων Τσιμέντων

Δέσποινα Κουτρομπή
Μεταπτυχιακή Φοιτήτρια ΔΙΑ/ΣΘΕΤ, ΕΑΠ
des.koutroumpi@gmail.com, std122886@ac.eap.gr

Δρ. Πέτρος Τσακιρίδης
Σχολή Μηχ. Μεταλλείων-Μεταλλουργών, Ε.Μ.Π.
Μέλος ΣΕΠ ΔΙΑ/ΣΘΕΤ ΕΑΠ
ptsakiri@central.ntua.gr

Περίληψη – Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση της καταλληλότητας του αποβλήτου της σκόνης μαρμάρου που παράγεται κατά τις διεργασίες κοπής, για την παραγωγή σύνθετων τσιμέντων. Η μελέτη της συμπεριφοράς του Αποβλήτου Κοπής Μαρμάρου (ΑΚΜ), πραγματοποιήθηκε πειραματικά με την δημιουργία δοκιμών σύνθετων τσιμέντων με περιεκτικότητα 5%, 10%, 15% & 20% σε πρόσμικτο ΑΚΜ προς αντικατάσταση του αντίστοιχου ποσοστού τσιμέντου CEM I 52.5, τα οποία ελέγχθηκαν ως προς τις φυσικές, χημικές και μηχανικές τους ιδιότητες σε σύγκριση με το δείγμα αναφοράς.

Λέξεις-Κλειδιά: Τσιμέντο «Portland», απόβλητο σκόνης από κοπή μαρμάρου, θλιπτική αντοχή, σύνθετα τσιμέντα

I. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η τσιμεντοβιομηχανία αποτελεί σημαντικό παράγοντα έκλυσης ρύπων προς την ατμόσφαιρα και υποβάθμισης του περιβάλλοντος. Η διαδικασία παραγωγής του τσιμέντου, απαιτεί σημαντικά ποσά ενέργειας και Α' υλών ενώ ευθύνεται για την παραγωγή ρύπων όπως διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), μονοξείδιο του άνθρακα (CO) διοξείδιο του θείου (SO₂), οξειδίων του αζώτου (NO_x) και σωματιδίων σκόνης (Ekinici, Kazancoglu, & Mangla, 2020). Το τσιμέντο αποτελεί έως σήμερα το κύριο δομικό υλικό του κατασκευαστικού τομέα. Η τρέχουσα κατανάλωση τσιμέντου υπολογίζεται στα 4,6 δισεκατομμύρια τόνους ανά έτος, ενώ το ποσό αυτό εκτιμάται πως θα φτάσει περίπου τα 6 δισεκατομμύρια τόνους μέχρι το 2050. Οι ανθρωπογενείς εκπομπές CO₂ οι οποίες οφείλονται στην τσιμεντοβιομηχανία αποτελούν το 7% των ετήσιων εκπομπών, ενώ για την παραγωγή του κλίνκερ καταναλώνονται μεγάλα ποσά μη ανανεώσιμων πρώτων υλών (Singh & Subramaniam, 2019). Το τσιμέντο συνεχίζει να αυξάνει το περιβαλλοντικό του αποτύπωμα ακόμα και μετά τη χρήση του. Οι κατασκευές των οποίων ο φέρων οργανισμός αποτελείται από οπλισμένο σκυρόδεμα, χρειάζονται συχνά επισκευές και ενισχύσεις λόγω βλαβών που οφείλονται σε εξωγενείς παράγοντες (σεισμικές δράσεις, διαβρωτικό περιβάλλον κλπ) ή ενδογενείς παράγοντες (αστοχία μελών, ρηγματώσεις λόγω κατασκευαστικών λαθών). Η επιστημονική κοινότητα έχει στραφεί προς τη δημιουργία νέων βελτιωμένων υλικών τσιμέντου, τα οποία να παρουσιάζουν μικρότερες εκπομπές ρύπων κατά την παραγωγή τους αλλά και βελτιωμένες ιδιότητες ώστε να επιβραδύνεται η φθορά των κατασκευών. Η προσπάθεια βελτίωσης της γραμμής παραγωγής και των ιδιοτήτων του συμβατικού τσιμέντου έχουν αποφέρει σημαντικά

αποτελέσματα, ωστόσο η προσέγγιση αυτή δεν μπορεί να αποδώσει πλέον. Η επιστημονική κοινότητα πλέον στρέφεται προς την δημιουργία σύνθετων τσιμέντων με πρόσμιξη υλικών τα οποία χαρακτηρίζονται ως απόβλητα άλλων βιομηχανιών, μειώνοντας την παραγωγή κλίνκερ και κατά συνέπεια την έκλυση ρύπων ενώ ταυτόχρονα απορροφάται προς χρήση ένα απόβλητο υλικό.

Η σκόνη που παράγεται από τις διεργασίες κοπής και επεξεργασίας του μαρμάρου αποτελεί ένα απόβλητο του οποίου η χρήση ως πρόσμικτο για την παραγωγή σύνθετων τσιμέντων βρίσκεται υπό διερεύνηση. Το συγκεκριμένο απόβλητο χαρακτηρίζεται ως αδρανές, είναι λεπτόκοκκο και ευάλεστο και η βασική του σύσταση αποτελείται από CaO υπό μορφή CaCO₃. Συγκριτικά με το τσιμέντο περιέχει μικρότερες ποσότητες SiO₂, Al₂O₃ και Fe₂O₃ και έχει μικρότερο ειδικό βάρος (περίπου 2,7g/m³). Στα ερευνητικά δεδομένα της βιβλιογραφίας το ΑΚΜ έχει χρησιμοποιηθεί ως πρόσμικτο στην παραγωγή σύνθετων τσιμέντων σε ποσοστά από 2,5% έως 40% και έχει παρατηρηθεί η δράση του ως filler στα σύνθετα μείγματα (El-Didamony et al., 2019), (Selim et al., 2020) και η συμβολή του στην ανάπτυξη των πρώιμων αντοχών των σύνθετων δοκιμών και βελτίωση της μικροδομής του όταν τα ποσοστά του πρόσμικτου φτάνουν έως το 10%, ενώ για προσθήκη του αποβλήτου στο μείγμα μεγαλύτερη του 10% παρατηρείται μείωση των αντοχών η οποία η αποδίδεται στο υψηλό ποσοστό αντικατάστασης του τσιμέντου με ΑΚΜ, προκαλώντας σημαντική μείωση των φάσεων C2S και C3S στο μίγμα, η οποία καλείται ως διάλυση των ποζολανικών αντιδράσεων (dilution of pozzolanic reactions) (Mashaly A. O., 2016).

II. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΑΠΟΒΛΗΤΟΥ ΚΟΠΗΣ ΜΑΡΜΑΡΟΥ

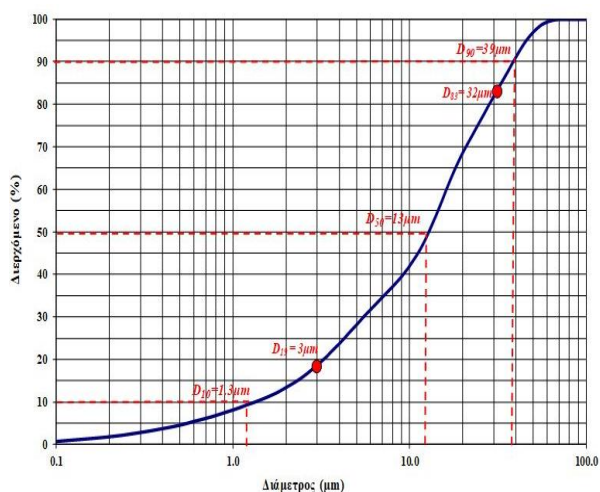
A. Μεθοδολογία

Το ΑΚΜ ξηράθηκε σε κλίβανο ξήρανσης στους 110°C για 24h. Στη συνέχεια αλέστηκε σε σφαιρόμυλο τύπου Bond με επανάληψη των αλέσεων ανά διαστήματα των 5min. Ο προσδιορισμός κατανομής του μεγέθους των κόκκων του υλικού πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο σκέδασης ακτινών laser μικρής γωνίας (Low Angle Laser Light Scattering) και η ανάλυση των αποτελεσμάτων έγινε βάσει ISO13320. Η χημική ανάλυση του ΑΚΜ πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο φθορισμού ακτίνων X (XRF) και η ορυκτολογική ανάλυση του υπο εξέταση υλικού πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο της περίθλασης των ακτινών X.

B. Αποτελέσματα

1) Χαρακτηρισμός δειγμάτων με αναλυτικές μεθόδους:

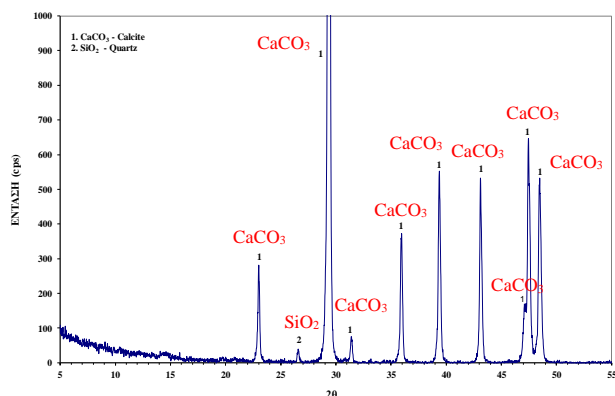
Η κοκκομετρική κατανομή της σκόνης κοπής μαρμάρου περιγράφεται σύμφωνα με την καμπύλη κατανομής του Σχήματος 1:



Σχήμα 1. Κοκκομετρική κατανομή δείγματος AKM

Το υπό εξέταση δείγμα του AKM παρουσίασε ένα εύρος τιμών από 0,1μm – 60μm. Εκ του οποίου το 80% αποτελεί το κλάσμα με τιμές μεγέθους από 1,3μm έως 32μm. Το κλάσμα των σωματιδίων με μέγεθος μικρότερο των 1,3μm αποτελεί το 10% του υλικού και το υπόλοιπο 10% αποτελείται από σωματίδια μεγέθους >39μm.

Η ορυκτολογική ανάλυση του AKM έδειξε πως το συγκεκριμένο υλικό αποτελείται κυρίως από ασβεστίτη (CaCO₃). Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2 εκτός από τον ασβεστίτη το υλικό περιέχει μικρή ποσότητα χαλαζία.



Σχήμα 2. Ορυκτολογική ανάλυση δείγματος AKM

Από τα αποτελέσματα της χημικής ανάλυσης με τη μέθοδο XRF τα οποία παρουσιάζονται στον Πίνακα 1 φαίνεται η υψηλή περιεκτικότητα του AKM σε CaO (53.4%). Συγκριτικά με το CEMI 52.5 το AKM παρουσιάζει μικρά ποσοστά σε οξείδια των μετάλλων (SiO₂: 2.31% κ.β., Al₂O₃: 0.85% κ.β., Fe₂O₃: 0.3% κ.β.). Η ειδική επιφάνεια του AKM μετά την άλεση προσδιορίστηκε στα 3950cm²/g, τιμή μεγαλύτερη από του CEM I (3550 cm²/g). Το ειδικό βάρος του AKM προσδιορίστηκε στα 2.68g/cm³ και του CEMI στα 3.14g/cm³.

Πίνακας 1. Χημική ανάλυση του AKM σε σύγκριση με την χημική σύσταση του CEMI52.5

ΧΗΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ		
ΟΞΕΙΔΙΑ	CEMI-52.5	AKM
SiO ₂	19.96	2.31
Al ₂ O ₃	5.45	0.85
Fe ₂ O ₃	3.31	0.3
CaO	62.83	53.4
MgO	1.98	0.24
Na ₂ O	0.25	0.04
K ₂ O	1.03	0.13
SO ₃	3.35	0.03
TiO ₂	0.15	0.04
MnO	-	0.02
free CAO	0.85	-
Cr ₂ O ₃	-	0.01
LOI ₁₀₀₀	1.15	42.35

Τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων των αντίστοιχων AKM που παρουσιάζονται στη βιβλιογραφία (Πίνακας 2) παρουσίασαν παρόμοια σύσταση με το υπό εξέταση AKM με κύριο χαρακτηριστικό την υψηλή περιεκτικότητα σε CaO.

Πίνακας 2. Χημική ανάλυση πρόσμικτων AKM προς παραγωγή σύνθετων τσιμεντών από τη βιβλιογραφία.

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	TiO ₂	MnO	free Ca	Cr ₂ O ₃	LOI1000
(Alfado et.al,2014)	1.12	0.73	0.05	83.22	0.52	1.12	0.09	0.56	-	-	0.15	-	-
(Seghir T., et.al, 2019)	0.05	0.05	0.02	56.94	0.92	-	0.009	0.32	-	-	-	-	41.63
(Ruiz-Sanchez A., et.al,	0.08	0.31	0.14	54.8	0.89	0.05	0.04	0.16	-	-	-	-	46.65
(Mashaly et.al, 2016)	0.15	0.1	0.04	55.32	0.11	0.07	0.01	0.13	-	-	-	-	43.4
(Bostanci, 2020)	5.1	0.5	0.7	43.5	14.6	-	0.03	0.04	-	-	-	-	33.5
(Shukla A. et.al, 2020)	0.8	0.1	0.2	58.1	0.1	-	0.1	0.1	-	-	-	-	-
(Aruntas et.al., 2010)	0.67	0.12	0.08	54.43	0.59	0.14	-	-	-	-	-	-	43.4
(Selim et.al., 2020)	31.79	12.9	5.9	35.47	0.44	4.18	4.06	1.15	0.67	0.17	-	-	2.5
(El-Sayed et.al., 2018)	0.79	0.21	0.06	55.42	0.25	0.1	0.02	0.24	-	-	-	-	42.28
(Kirgiz et.al., 2016)	0.388	0.11	0.04	53.79	0.77	0.34	0.01	0.05	-	-	-	-	44.15
(El-Didamony et.al., 20	2.22	0.78	0.86	52.67	0.84	0.1	0.14	0.51	0.07	0.03	-	-	41.5
(Khichi et.al., 2017)	0.77	-	0.19	55	1.3	-	-	-	-	-	-	-	39
(Khichi et.al., 2017)	3.81	-	0.54	31.5	20.5	-	-	-	-	-	-	-	40

ΠΙ. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΤΣΙΜΕΝΤΩΝ ΜΕ ΠΡΟΣΘΗΚΗ AKM

A. Παραγωγή δειγμάτων σύνθετων τσιμεντών – Πειραματικές Συνθήκες:

Για την πειραματική διαδικασία δημιουργήθηκαν δείγματα σύνθετων τσιμεντών με περιεκτικότητα σε AKM 5%, 10%, 15% και 20% καθώς και ένα δείγμα αναφοράς με περιεκτικότητα σε AKM 0%. Ο προσδιορισμός του ειδικού βάρους των δειγμάτων προσδιορίστηκε με χρήση φιάλης Le Chatelier χωρητικότητας 250ml, και ορίστηκε ως ο λόγος της μάζας του υπό εξέταση δείγματος που εισέρχεται στη φιάλη προς τη διαφορά όγκου που παρατηρείται κατά την εισαγωγή του δείγματος σε αυτή. Η ειδική επιφάνεια των δειγμάτων προσδιορίστηκε με τη μέθοδο της αεροδιαπερατότητας με χρήση συσκευής Blaine βάσει του προτύπου ΕΛΟΤ EN 196-6, 2000. Οι χρόνοι αρχικής και τελικής πήξης των δειγμάτων και το νερό κανονικής πλαστικότητας προσδιορίστηκαν με χρήση συσκευής Vicat. Η δοκιμή σταθερότητας του όγκου των δειγμάτων πραγματοποιήθηκε με χρήση δακτυλίων Le Chatelier βάσει του προτύπου ΕΛΟΤ EN 196-3,2000.

Για τον προσδιορισμό της αντοχής των δειγμάτων σε θλίψη παρασκευάστηκε τσιμεντόπαστα σύμφωνα με το πρότυπο EN 196-1, 2000 με ΑΚΜ προς αντικατάσταση του τσιμέντου CEM I 52.5 σε ποσοστά 5%, 10%, 15% και 20%. Τα δοκίμια που προέκυψαν από τα μείγματα καταπονήθηκαν σε θλίψη, μετά την τοποθέτησή τους σε

μηχανή άσκησης θλιπτικής φόρτισης με ρυθμό 2400±200N/sec. Καταγράφηκε η τιμή φόρτισης στην οποία αστόχησαν και στη συνέχεια υπολογίστηκε η θλιπτική αντοχή τους η οποία εκφράζεται ως ο λόγος του φορτίου αστοχίας σε Ν προς την επιφάνεια φόρτισης του δοκιμίου σε mm.

B. Αποτελέσματα πειραματικού μέρους:

Τα αποτελέσματα του προσδιορισμού της ειδικής επιφάνειας και του ειδικού βάρους των μειγμάτων με πρόσμιξη ΑΚΜ σε ποσοστά 5%, 10%, 15% και 20% παρουσιάζονται στον Πίνακα 3. Η ειδική επιφάνεια των δειγμάτων παρουσιάζει αύξηση όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα σε ΑΚΜ. Το φαινόμενο αυτό αποδίδεται στην μεγαλύτερη ειδική επιφάνεια του αποβλήτου σε σύγκριση με του τσιμέντου. Αντίθετα το ειδικό βάρος των δειγμάτων παρουσιάζει μείωση όσο αυξάνεται το ΑΚΜ στη σύσταση των δειγμάτων λόγω μειωμένου ειδικού βάρους του αποβλήτου συγκριτικά με του τσιμέντου.

Πίνακας 3. Προσδιορισμός της Ειδικής Επιφάνειας και του Ειδικού Βάρους των σύνθετων μειγμάτων τσιμέντου με πρόσμιχτο ΑΚΜ.

Δείγμα	CEM I 52.5 (wt%)	ΑΚΜ (wt%)	Ειδική Επιφάνεια (cm ² /g)	Ειδικό Βάρος (g/cm ³)
C _{Ref}	100	0	3550	3.14
C ₅	95	5	3580	3.12
C ₁₀	90	10	3600	3.09
C ₁₅	85	15	3610	3.07
C ₂₀	80	20	3640	3.05

Το νερό κανονικής πλαστικότητας (Πίνακας 4) δεν παρουσιάζει σημαντικές μεταβολές με τη προσθήκη ΑΚΜ συγκριτικά με το δείγμα αναφοράς C_{ref}, ωστόσο παρατηρείται μία τάση μείωσης όσο αυξάνει το ποσοστό του αποβλήτου στο μείγμα, η οποία παρατηρείται και στη βιβλιογραφία (Aruntas et.al, 2010), (Ruiz-Sanchez et. al., 2019), (Aliabdo A. et.al., 2014).

Οι χρόνοι αρχικής και τελικής πήξης (Πίνακας 4) παρουσίασαν επίσης μικρές μεταβολές. Συγκεκριμένα, ο χρόνος αρχικής και τελικής πήξης των δειγμάτων έδειξε να αυξάνεται με την προσθήκη ΑΚΜ, με το δείγμα C₂₀ να εμφανίζει τις μεγαλύτερες καθυστερήσεις στον χρόνο αρχικής πήξης με απόκλιση από το C_{ref} κατά 30%. Η παρατήρηση αυτή παρουσιάζεται και στα πειραματικά αποτελέσματα της βιβλιογραφίας και αποδίδεται στη μείωση των φάσεων C₃S και C₃A οι οποίες κατά την ενυδάτωση τους επιταχύνουν την πήξη (Aruntas et.al., 2010).

Ο έλεγχος μεταβολής όγκου (Πίνακας 4) των δειγμάτων δεν παρουσίασε καμία αξιόλογη μεταβολή σε κανένα από τα σύνθετα μείγματα. Το δείγμα με ΑΚΜ 5% παρουσίασε τη μικρότερη τιμή διόγκωσης 0.7mm ενώ τη μεγαλύτερη τιμή παρουσίασαν τα δείγματα με περιεκτικότητα 15% & 20% ΑΚΜ, για τα οποία καταγράφηκε διόγκωση 1,00mm. Η προσθήκη ΑΚΜ δεν

φαίνεται να επηρεάζει την διόγκωση του μείγματος, όπως επαληθεύεται και από την βιβλιογραφία (Ruiz-Sanchez A., 2019), (Aruntas H. Y., 2010), (Aliabdo Ali A., 2014).

Πίνακας 4. Προσδιορισμός του νερού κανονικής πλαστικότητας, των χρόνων αρχικής και τελικής πήξης και της μεταβολής του όγκου των σύνθετων μειγμάτων τσιμέντου με πρόσμιχτο ΑΚΜ.

Δείγμα	ΑΚΜ (wt%)	Νερό Κανονικής Πλαστικότητας (wt%)	Χρόνοι Πήξης (min)		Διόγκωση Κατά Le Chatelier (mm)
			Αρχή	Τέλος	
C _{Ref}	-	27.7	150	200	0.8
C ₅	5	26.3	155	210	0.7
C ₁₀	10	26.1	170	220	0.9
C ₁₅	15	25.7	180	230	1.0
C ₂₀	20	25.5	195	245	1.0

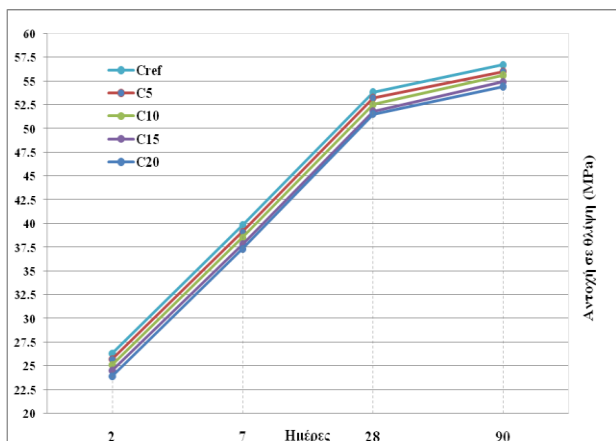
Η δοκιμή σε θλίψη των σύνθετων δοκιμίων περιεκτικότητας 5%, 10%, 15% και 20% σε ΑΚΜ έδειξε ότι σε σχέση με το δοκίμιο αναφοράς οι αντοχές είναι μικρότερες. Οι αποκλίσεις μεταξύ των σύνθετων δοκιμίων και του δοκιμίου αναφοράς αυξάνονται όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα του αποβλήτου. Τα μεγαλύτερα ποσοστά απόκλισης εμφανίζονται στα δοκίμια 2 ημερών με τιμές 2,28% για C₅, 4,56% για C₁₀, 6,84% για C₁₅ και 9,13% για C₂₀. Οι αποκλίσεις των αντοχών σε θλίψη μειώνονται με την πάροδο των ημερών ενυδάτωσης των δοκιμίων καθώς τα μείγματα αναπτύσσουν την αντοχή τους όσο αυξάνονται τα προϊόντα ενυδάτωσης. Οι ελάχιστες αποκλίσεις εμφανίζονται στις 90 ημέρες με τιμές 1,23% για C₅, 1,94% για C₁₀, 3,17% για C₁₅ και 4,06 για C₂₀. Τα δοκίμια των 28 ημερών με προσθήκη ΑΚΜ σε ποσοστά 5% και 10% ανέπτυξαν την αντοχή του τσιμέντου αναφοράς CEM I (≥52,5MPa) σε αντίθεση με τα δοκίμια περιεκτικότητας 15% και 20% τα οποία στις 28 ημέρες ανέπτυξαν αντοχές 51,8MPa και 51,5MPa αντίστοιχα.

Από τις τιμές των θλιπτικών αντοχών όλων των δοκιμίων παρατηρείται πως η θλιπτική αντοχή αυξάνεται στις μεταγενέστερες ηλικίες, με μέγιστες τιμές στην ηλικία των 90 ημερών. Τα αποτελέσματα συμφωνούν με αυτά της βιβλιογραφίας όπου αναφέρεται η συμμετοχή του ΑΚΜ στις αντιδράσεις ενυδάτωσης. Η ιδιότητα του αποβλήτου να δρα ως filler εμφανίζεται στις πρώιμες ηλικίες ενυδάτωσης, όπου οι θλιπτικές αντοχές είναι αυξημένες για τα δοκίμια με ποσοστό σε ΑΚΜ 5%. Η πτώση των αντοχών κάτω των 52.5MPa για τα δοκίμια με προσθήκη ΑΚΜ 15% και 20%, πιθανώς οφείλεται στην σημαντική έλλειψη των φάσεων C₃S, C₂S, C₃A και C₄AF, οι οποίες περιέχονται στο τσιμέντο, όπως αναφέρεται στις σχετικές αναφορές της βιβλιογραφίας και στην μειωμένη πυκνότητα που ενδεχομένως εμφανίζουν τα δοκίμια λόγω της μειωμένης περιεκτικότητας σε C₃S, C₂S (Seghir N., 2018).

Πίνακας 5. Προσδιορισμός των αντοχών σε θλίψη για 2, 7, 28 και 90 ημέρες ενυδάτωσης, των σύνθετων μειγμάτων τσιμέντου με πρόσμιχτο ΑΚΜ.

Ημέρες Ενυδάτωσης	Αντοχές σε Θλίψη (MPa)				
	C _{Ref}	C ₅	C ₁₀	C ₁₅	C ₂₀
2	26.3	25.7	25.1	24.5	23.9
7	39.8	39.1	38.5	37.8	37.3
28	53.8	53.2	52.5	51.8	51.5
90	56.7	56.0	55.6	54.9	54.4

Ο ρυθμός ανάπτυξης των αντοχών των σύνθετων δοκιμίων είναι όμοιος με του δοκιμίου αναφοράς για τις πρώιμες και μεταγενέστερες ηλικίες και δεν φαίνεται να επηρεάζεται από το ΑΚΜ (Σχήμα 3).



Σχήμα 4. Προσδιορισμός των αντοχών σε θλίψη για 2, 7, 28 και 90 ημέρες ενυδάτωσης, των σύνθετων μειγμάτων τσιμέντου με πρόσμικτο ΑΚΜ.

IV. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το απόβλητο της σκόνης που προέρχεται από τις διεργασίες κοπής μαρμάρου είναι ένα υλικό το οποίο δεν θεωρείται επικίνδυνο και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πρόσμικτο για την παραγωγή σύνθετου τσιμέντου. Η χρήση του στην τσιμεντοβιομηχανία έρχεται να μειώσει το κόστος παραγωγής του τσιμέντου, καθώς και την ρύπανση που προκαλεί η παραγωγική διαδικασία με τους εκλυόμενους ρύπους και την σκόνη καθώς και την κατανάλωση ενέργειας, ενώ ταυτόχρονα μπορεί να συντελέσει στην εξοικονόμηση των πρώτων υλών του τσιμέντου.

Το ΑΚΜ της παρούσας πειραματικής διαδικασίας, παρουσίασε αρκετά μεγάλη περιεκτικότητα σε CaO και μικρές ποσότητες SiO₂, Al₂O₃ και Fe₂O₃, βάσει των ορυκτολογικών και χημικών αναλύσεων. Η χημική και ορυκτολογική του σύσταση είναι παραπλήσια με τα ΑΚΜ της βιβλιογραφίας, ενώ οι διαφορές που παρατηρούνται αποδίδονται στο διαφορετικό μητρικό πέτρωμα από το οποίο προέρχεται το εκάστοτε απόβλητο. Η λεπτότητα του ΑΚΜ, παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές από του τσιμέντου σε ορισμένα βιβλιογραφικά πειραματικά δεδομένα για το σύνολο των κόκκων του υλικού, ενώ σε άλλα μικρότερη. Η ίδια παρατήρηση ισχύει και για την ειδική επιφάνεια του υλικού. Το ΑΚΜ της παρούσας πειραματικής εμφάνισε μεγαλύτερη ειδική επιφάνεια από του τσιμέντου. Το ειδικό βάρος του ΑΚΜ είναι μικρότερο από του τσιμέντου, ενώ τόσο το ειδικό βάρος όσο και η ειδική επιφάνεια του αποβλήτου δεν θεωρείται ότι έχουν μεγάλες αποκλίσεις από τις αντίστοιχες τιμές του τσιμέντου. Τα μείγματα τσιμέντου με ΑΚΜ φαίνονται να μην επηρεάζουν σημαντικά τους χρόνους πήξης του τσιμέντου, ενώ δεν παρουσιάζουν αρνητικά αποτελέσματα στον έλεγχο σταθερότητας του όγκου των δοκιμίων, συμφωνώντας με τα αποτελέσματα των αντίστοιχων ελέγχων των βιβλιογραφικών ερευνών. Το νερό κανονικής πλαστικότητας παρουσίασε μικρή μείωση με την αύξηση του ποσοστού του ΑΚΜ στο

δείγμα, φαινόμενο το οποίο συναντάται και στην βιβλιογραφία, χωρίς όμως να παρατηρούνται σημαντικές διαφορές.

Η συμπεριφορά των δοκιμίων σε θλίψη, έδειξε θετικά αποτελέσματα για τα δοκίμια με περιεκτικότητα σε ΑΚΜ 5% και 10%, παρατήρηση η οποία επιβεβαιώνεται και από τη βιβλιογραφία. Τα δοκίμια με ποσοστό προσθήκης ΑΚΜ έως 10% ανέπτυξαν τις απαιτούμενες από τον κανονισμό αντοχές του τσιμέντου αναφοράς CEM I 52,5, στις 28 ημέρες καθιστώντας το εν λόγω απόβλητο ικανό να αντικαταστήσει τη ποσότητα τσιμέντου σε ποσοστό έως 10%, η οποία από την βιβλιογραφία αποδίδεται στην δράση του ΑΚΜ να πληρώνει τους πόρους του υλικού ως filler κάνοντας την δομή του τσιμέντου πιο συμπαγή, ενώ φαίνεται να επιταχύνει και τις αντιδράσεις ενυδάτωσης όπως υποστηρίζεται σε ορισμένες βιβλιογραφικές έρευνες. Ωστόσο, η χρήση του πρόσμικτου ΑΚΜ είναι δυνατή και σε μεγαλύτερα ποσοστά 15% και 20% προς παρασκευή σύνθετων τσιμέντων αντοχής 42,5MPa.

Τέλος επισημαίνεται μέσα από την βιβλιογραφία, η καταλληλότητα των σύνθετων τσιμέντων για τη παρασκευή σκυροδέματος, προσδίδοντας βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες στο υλικό ενώ δεν φαίνεται να επηρεάζεται αρνητικά το ΡΗ του.

Ανακεφαλαιώνοντας τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τα πειραματικά δεδομένα συνοψίζονται ως εξής:

- i. Η προσθήκη ΑΚΜ αυξάνει την ειδική επιφάνεια των μινεμάτων σύνθετου τσιμέντου.
- ii. Η προσθήκη ΑΚΜ μειώνει το ειδικό βάρος των μινεμάτων σύνθετου τσιμέντου.
- iii. Οι χρόνοι πήξης των δοκιμίων με προσθήκη ΑΚΜ, μειώνουν ελαφρά το νερό κανονικής πλαστικότητας (filler effect), και αυξάνουν (καθυστερούν) τους χρόνους αρχικής και τελικής πήξης.
- iv. Η προσθήκη ΑΚΜ δεν φαίνεται να επηρεάζει την σταθερότητα του όγκου των δοκιμίων.
- v. Οι θλιπτικές αντοχές των σύνθετων δοκιμίων είναι μικρότερες από του δοκιμίου αναφοράς. Για προσθήκη ΑΚΜ 5% και 10% παρατηρήθηκαν οι υψηλότερες τιμές θλιπτικής αντοχής μεταξύ των σύνθετων δοκιμίων, ενώ για όλα τα δοκίμια φαίνεται πως η αντοχή αυξάνει με τον χρόνο ενυδάτωσης μειώνοντας την διαφορά με το δοκίμιο αναφοράς από το 9,12% στις 2 ημέρες ενυδάτωσης, στο 4,06% στις 90 ημέρες ενυδάτωσης, για το δοκίμιο με προσθήκη ΑΚΜ 20% το οποίο παρουσίασε και τις μικρότερες τιμές αντοχής.
- vi. Η μέγιστη δυνατή προσθήκη σε ΑΚΜ στα δοκίμια σύνθετου τσιμέντου τα οποία ανέπτυξαν την απαιτούμενη από τα πρότυπα θλιπτική αντοχή στις 28 ημέρες του τσιμέντου αναφοράς με το οποίο συγκρίθηκαν (CEM I 52,5MPa), είναι σε ποσοστό έως 10%.
- vii. Τα σύνθετα τσιμέντα που προέκυψαν με πρόσμικτο ΑΚΜ σε ποσοστά 15% & 20%

μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως σύνθετα τσιμέντα αντοχής 42,5MPa βάσει του προτύπου EN 197-1.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Aliabdo Ali A., E. M. (2014). Re-use of waste marble dust in the production of cement and concrete. *Construction and Building Materials*, σσ. 28-41.
- Aruntas H. Y., G. M. (2010). Utilization of waste marble dust as an additive in cement production. *Materials and Design*, σσ. 4039–4042.
- Bostanci, S. (2020). Use of waste marble dust and recycled glass for sustainable concrete production. *Cleaner Production*, σσ. 1-14.
- BS EN 196-1:2005. (n.d.).
- Ekinci, E., Kazancoglu, Y., & Mangla, S. K. (2020). Using system dynamics to assess the environmental management of cement industry in streaming data context. *Science of the Total Environment*, σσ. 1-12.
- El-Didamony, H., Hafez, A. I., Mohammed, M. S., & Sabry, R. (2019). Prepared and properties of filled and pozzolanic-filled cements from marble dust waste and granulated slag. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, σσ. 1-9.
- El-Sayed, H. A., Farag, A., Kandeel, A., Younes, A. A., & Yousef, M. M. (2018). Characteristics of the marble processing powder waste at Shaq El-Thoaban industrial area, Egypt, and its suitability for cement manufacture. *Housing and Building National Research Center - HBRC Journal*, σσ. 171-179.
- Khichi, E. S. (2017, Ιούλιος). Effect of Dolomitic Marble Dust Powder and Calcitic Marble Dust Powder On Cement Concrete Strength. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, σσ. 592-596.
- Kirgiz, M. S. (2016). Advancements in mechanical and physical properties for marble powder–cement composites strengthened by nanostructured graphite particles. *Mechanics of Materials*, σσ. 223–234.
- Mashaly A. O., E.-K. B. (2016). Effects of marble sludge incorporation on the properties of cement composites and concrete paving blocks. *Cleaner Production*, σσ. 731-741.
- Ruiz-Sanchez A., S.-P. M. (2019). Waste Marble Dust: An interesting residue to produce cement. *Construction and Building Materials*, σσ. 99-108.
- Seghir N., M. M. (2018). The Effect of Curing Cindition on the Properties of Cement-Based Composites Blended with Waste Marble Dust. *Effective Production and Recycling of Powder Materials*, σσ. 1002-1015.
- Selim, F., Hashem, F., & Amin, M. (2020). Mechanical, microstructural and acid resistance aspects of improved hardened Portland cement pastes incorporating marble dust and fine kaolinite sand. *Construction and Building Materials*, σσ. 1-13.
- Singh, B., & Subramaniam, K. V. (2019). Production and characterization of low-energy Portland composite cement from post-industrial waste. σσ. 1-11.