



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**Σχεδιασμός ποιότητας ειδικών δομικών στοιχείων
βασισμένων σε υπερλεπτομερή λατομικά παραπροϊόντα.**

Λεβεντάκης Κωνσταντίνος

Διπλ. Μηχ. Ορυκτών Πόρων

Εξεταστική Επιτροπή

Επικ. Καθ. Μιχάλης Γαλετάκης (επιβλέπων)

Καθ. Ζαχαρίας Αγιουτάντης

Καθ. Βασίλειος Περδικάτσης

Χανιά, Αύγουστος 2009

Στη μάνα και τον δάσκαλό μου

που με το παράδειγμά τους

συνεχίζουν να μου μαθαίνουν πολλά.

Περίληψη

Τα λεπτομερή ασβεστολιθικά λατομικά παραπροϊόντα, σαν το ογκωδέστερο των απορριμμάτων της βιομηχανίας εξόρυξης – παραγωγής αδρανών υλικών στην χώρα μας, συσσωρεύετε εδώ και δεκαετίες, λόγω απουσίας ουσιαστικών προτάσεων για την ταυτοποίηση, διαχείριση και ακόλουθη εκμετάλλευσή του. Η αδυναμία αυτή έχει δημιουργήσει στις λατομικές επιχειρήσεις πλειάδα χρόνιων διαχειριστικών, νομικών και ως εκ τούτου και οικονομικών προβλημάτων, οδηγώντας την πλειοψηφία αυτών σε παράνομες και περιβαλλοντικά ανεπίτρεπτες ευκαιριακές λύσεις (απόρριψη σε απομακρυσμένες περιοχές, στην θάλασσα, ρέματα κ.τ.λ.).

Στα πλαίσια διερεύνησης του προβλήματος, για την εξεύρεση μιας κατάλληλης και άμεσα εφαρμόσιμής στο περιβάλλον της ελληνικής λατομικής επιχείρησης, λύσης, διεξήχθει εκτενές πρόγραμμα δειγματοληψίας και εργαστηριακού χαρακτηρισμού δειγμάτων ασβεστολιθικής παιπάλης καθώς και μητρικού πετρώματος, που συνελλέγησαν από λατομική επιχείρηση της περιοχής Ηρακλείου Κρήτης, καθώς και επιχείρηση παραγωγής ετοίμου σκυροδέματος και ασφαλτομίγματος που αυτή τροφοδοτεί. Στην συνεχεία διερευνήθηκαν, με την διαδικασία του παραγοντικού σχεδιασμού, δυο τεχνολογίες διαμόρφωσης δομικών στοιχείων με κύριο συστατικό το λεπτομερές λατομικό απόρριμμα.

Η διαδικασία του εργαστηριακού χαρακτηρισμού (Galetakis & Leventakis, 2009), περιελάμβανε κοκκομετρική ανάλυση με την βοήθεια καταμετρητή laser, μέτρηση της αεροπερατότητας κατά Blaine, μέτρηση της φαινόμεντης πυκνότητας πρωτογενούς δείγματος παιπάλης και χύδην υλικού, μορφολογική ανάλυση κόκκων με οπτική (στερεοφωτογραφίες) και ηλεκτρονική (SEM) μικροσκοπία, χημικές, ορυκτολιγικές και θερμοβαρικές αναλύσεις, απέδειξε δε:

- ✓ την κοκκομετρική αλλά και χημική/ορυκτολογική διακύμανση των δειγμάτων παιπάλης λόγω διαφορών στην τεχνική απαγωγής της από τα αδρανή υλικά, αλλά και στις συνθήκες συλλογής αποθήκευσης και μηχανικής σταθεροποίησής της.
- ✓ την, παρά ταύτα, σαφή οπτική διάκριση μεταξύ ποσοτήτων παιπάλης διαφορετικής μεθόδου συλλογής και ακόλουθα διαφορετικών φυσικών και χημικών ιδιοτήτων.

- ✓ την επιμόλυνση του λεπτομερούς υλικού κατά τις διαδικασίες συλλογής, αποκομιδής, μηχανικής σταθεροποίησης και αποθήκευσής του κατά περίπτωση:
- Από ίχνη NaCl, λόγω της διαβροχής της εν λόγω ποσότητας παιπάλης με νερό αντλούμενο από περιοδικά υφάλμυρο υδροφόρο ορίζοντα. Η παρουσία των ποσοτήτων αυτών NaCl θα μπορούσε να βλάψει σημαντικά την πιθανή μελλοντική προώθηση του λεπτομερούς παραπροϊόντος προς την κατασκευαστική βιομηχανία, η οποία και επιβάλει αυστηρά όρια της συγκέντρωσης NaCl στις πρώτες ύλες τις.
- Από αργιλικά ορυκτά τα οποία έως και διπλασιάζουν τις συγκεντρώσεις Si, Fe και Al στο λεπτομερές κλάσμα σε σύγκριση με το μητρικό πέτρωμα. Ο εμπλουτισμός των στοιχείων αυτών σε ψιλά κλάσματα παρατηρείτε συχνά και οφείλετε στην μηχανική αντοχή των ορυκτών που τα περιέχουν. Αυτός είναι όμως και ο λόγος που αυξημένες συγκεντρώσεις των στοιχείων αυτών χαρακτηρίζονται ιδιαιτέρως φθοροποιές για τον μηχανολογικό εξοπλισμό εν γένει και αποτελούν λόγω απόρριψης πιθανών πρώτων υλών από διαδικασίες παραγωγής δομικών υλικών.
- Από βαριά πετρελαιϊκά κλάσματα πετρελαίου βιομηχανικής καύσης (mazut), λόγω της διαδικασίας αέριου διαχωρισμού της λεπτομερούς παιπάλης από την άμμο με αεροκυκλώνα εντός του κλιβάνου ανάμιξης του ασφαλτομίγματος. Ο διαχωρισμός αυτός γίνεται με την βοήθεια των καυσερίων θέρμανσης του ασφαλτομίγματος τα οποία περιέχουν όλα τα υπολείμματα καύσης του βιομηχανικού καυσίμου. Η πιθανή παρουσία όμως αυτών των βαρέων οργανικών ενώσεων, σε αυξημένες συγκεντρώσεις, εντός της ασβεστολιθικής παιπάλης μετά την συλλογή της, καθιστά προβληματική τη χρήση της για την παρασκευή τσιμεντοειδών κονιαμάτων υποβιβάζοντας, την γωνία εσωτερικής τριβής των παραγομένων υλικών και άρα την τελική αντοχή τους.

Για την αντιμετώπιση των προβλημάτων αυτών προτείνεται (Galetakis & Leventakis, 2009):

- ✓ Η παγίωση της ξηρής αέριας απαγωγής της παιπάλης από τα αδρανή υλικά με αναρρόφηση, στα διάφορα στάδια επεξεργασίας τους.
- ✓ Η οργάνωση και λειτουργία ενός συστήματος διαχείρισης της χύδην, ξηρής παιπάλης με την αποθήκευσή της σε σιλό και την μεταφορά της από αντίστοιχα αυτοκίνητα πνευματικής μεταφόρτωσης. Έτσι, θα ήταν δυνατή η οργάνωση σε τοπικό επίπεδο ενός συστήματος συλλογής της παιπάλης από τις διάφορες επιχειρήσεις του κλάδου και η συνολική επεξεργασία της από επιχειρήσεις που θα έχουν έτσι σημαντικό όφελος από τα παραγόμενα προϊόντα ανακύκλωσης της λατομικής διεργασίας. Τέτοιο σύστημα ξηρής, χύδην διακίνησης και εμπορίας λεπτομερούς υλικού εφαρμόζετε διεθνώς σήμερα στην αγορά τσιμέντου.
- ✓ Σε μικρότερο βαθμό θα μείωνε τα προβλήματα ομογενοποίησης και επιμόλυνσης του συλλεχθέντος λεπτομερούς υλικού η αποκονίωση των χονδρομερών αδρανών υλικών («γαρμπίλι»), τα οποία συμμετέχουν στο ασφαλτόμιγμα προ της εισόδου τους στον κλίβανο ανάμιξης, με στόχο την ποσοστιαία μείωση των ζημιογόνων προσμίξεων πριν την τελική ομογενοποίηση των ποσοτήτων παιπάλης.

Αυτή η τελευταία θα μπορούσε να αποτελέσει μια μερισματική, παροδική λύση μέχρι την οργάνωση και εφαρμογή των δύο ως άνω συνολικών προτάσεων.

Κατά την φάση διερεύνησης παραγωγής δομικών στοιχείων από τσιμέντοειδή κονιάματα ασβεστολιθικής παιπάλης, ο πρώτος παραγοντικός σχεδιασμός πειραμάτων αφορούσε στην τεχνική διαμόρφωσης υφυγρών μιγμάτων παιπάλης και κοινού τσιμέντου τύπου Portland CEM II 32.5 υπό πίεση (Galetakis & Raka, 2004a).

- Δοκιμάστηκε η αύξηση του περιεχομένου τσιμέντου (15,79%κ.β.) σε σύγκριση με προηγούμενες προσπάθειες, ενώ χρησιμοποιήθηκε ισόποσο μίγμα όλων των ποιοτήτων παιπάλης που συλλέγονται. Ο εργαστηριακός έλεγχος των σκληρημένων δοκιμών έδειξε ακατάλληλα χαμηλές τιμές αντοχής σε μονοαξονική θλίψη και ανεπίτρεπτα υψηλή υδατοαπορρόφηση για χρήση δομικών στοιχείων. Σαν κυριότερα αίτια εμφανίζεται η πλημμελής αποσυσωμάτωση/ομογενοποίηση των στερεών φάσεων καθώς και η ατελής διασπορά της προστιθέμενης υγρασίας. Το πρώτο φαινόμενο γίνεται μακροσκοπικά αντιληπτό στις επιφάνειες θραύσης, όπου

παρατηρούνται διακριτές φάσεις (νησίδες), ενώ το δεύτερο γίνεται ορατό από την αναπόφευκτη δημιουργία «σβώλων» (pelletising) κατά την φάση της ανάμιξης.

- Κατά την εκτενή φάση διερεύνησης και σε μια προσπάθεια να αντιμετωπιστεί το αναφερόμενο και στην διεθνή βιβλιογραφία πρόβλημα της πλημμελούς ενυδάτωσης του τσιμέντου αυξανομένου του βάθους από την εξωτερική επιφάνεια του δοκιμίου, δοκιμάστηκε η σταδιακή μείωση της πίεσης διαμόρφωσης με ταυτόχρονη αύξηση του περιεχόμενου νερού στο ανάμιγμα. Σε κάθε τιμή πίεσης αναζητούνταν η οριακή περιεκτικότητα νερού στο προς συμπίεση ανάμιγμα, πέρα της οποίας η συμπίεση οδηγούσε σε απώλεια περίσσειας νερού για την εκάστοτε πίεση. Από τα αποτελέσματα των εργαστηριακών ελέγχων των σκληρημένων δοκιμών έγινε άμεσα αντιληπτό πως η πίεση συμπύκνωσης παιζει πολύ σημαντικότερο ρόλο στην διαμόρφωση της τελικής αντοχής, από αυτόν του πιθανώς υψηλότερου βαθμού ενυδάτωσης του τσιμέντου στις περιοχές γύρω από το κέντρο μάζας του δοκιμίου. Άρα οι πιέσεις διαμόρφωσης κάτω των 75bar εγκαταλείφθηκαν και συγκεκριμένα, για λόγους κατανάλωσης ενέργειας κατά την πιθανή μελλοντική εφαρμογή της μεθόδου σε βιομηχανική κλίμακα, υιοθετήθηκε η πίεση των 75bar που αντιστοιχεί σε τάση συμπύκνωσης επί του δοκιμίου ίση με 43,5 MPa περίπου.

Οι μηχανική αντοχή καθώς και η υδατοαπορρόφηση δεν κρίνονται ούτε εδώ ικανοποιητικές για χρήση δομικών στοιχείων, σύμφωνα με διεθνείς προδιαγραφές (BS 6073, (1981), BS 6717, (1993)), ενώ η πλημμελής αποσυσσωμάτωση / ομογενοποίηση των στερεών φάσεων, καθώς και η ατελής διασπορά της υγρής φάσης παραμένουν ως προβλήματα.

- Κατά την τελική φάση διερεύνησης, δοκιμάστηκαν σε μίγματα με τις τρεις ποιότητες ασβεστολιθικής παιπάλης, δύο λεπτομερέστερα παραπροϊόντα κοπής/λείανσης μαρμάρου, καθώς και λατομική (θραυστή) άμμος. Προηγήθηκε ο γραφικός υπολογισμός «συνθετικών» κατανομών κοκκομετρίας μιγμάτων παιπάλης με άμμο ή/και μαρμαρόσκονη, από τις κοκκομετρίες των υλικών αυτών με την βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή. Υιοθετήθηκε γραφικό κριτήριο κοκκομετρικής διαβάθμισης κατασκευάστριας εταιρίας μηχανημάτων διαμόρφωσης δομικών στοιχείων, και επελέγησαν για παρασκευή τα μίγματα βέλτιστης κοκκομετρικής συναρμογής (granular packing). Η βέλτιστη ποσότητα προστιθέμενου νερού προσδιορίστηκε, σύμφωνα με τα ευρήματα της εκτενούς φάσης διερεύνησης, σαν η ποσότητα για την οποία παρατηρήθηκε ελάχιστη ανέξοδος νερού από την μήτρα κατά

την συμπύκνωση (κορεσμός πορώδους για την δεδομένη πίεση). Οι μηχανικές αντοχές και η υδατοαπορρόφηση παρουσιάζονται ικανοποιητικές. Στην προσπάθεια απορρόφησης όσο το δυνατόν περισσότερου παραπροϊόντος (βλ. παιπάλη), ευνοείται η λόση του αναμίγματος 15.79Σ43.33Λ/A10.30, για την παρασκευή κυβολίθων και στοιχείων διάστρωσης εξωτερικού χώρου. Για χρήση εσωτερικών χώρων προτείνεται η διερεύνηση χρήσης λεπτομερών ορυκτών (π.χ. silica fume) ή οργανικών (π.χ. οργανικά ελαστομερή) υπερλεπτομερών πληρωτικών μέσων που διατίθενται στην αγορά δομικών υλικών για την παρασκευή ειδικών κονιαμάτων ή υπερισχυρών σκυροδεμάτων.

Ο δεύτερος παραγοντικός σχεδιασμός πειραμάτων αφορούσε στην τεχνική παρασκευής πλαστικών μαζών με ανάμιξη τσιμέντου και ασβεστολιθικής παιπάλης και η διαμόρφωση δομικών στοιχείων με τεχνικές εξώθησης (Galetakis, Leventakis & Alevizos, 2009).

- Στη διερευνητική φάση του σχεδιασμού δοκιμάστηκε κατ'αρχήν η παρασκευή αναμίγματος τσιμέντου και ασβεστολιθικής παιπάλης που να επιδεικνύει ικανοποιητικές ιδιότητες συνοχής, πλαστικότητας και συνολικής εργασιμότητας, ώστε να καθιστά δυνατή τη μετέπειτα εξώθησή της. Κρίθηκε απαραίτητη η χρήση χημικών πρόσμικτων σκυροδέματος, τόσο για την μείωση του νερού και την αύξηση των μηχανικών αντοχών, όσο και για την επίτευξη πλαστικής συμπεριφοράς από τα μίγματα. Οι μηχανικές ιδιότητες των σκληρημένων δοκιμών ήταν ιδιαίτερα φτωχές, έγινε όμως εμφανές πως έπρεπε να προσδιοριστούν τα πρότυπα ποσοστά συμμετοχής τόσο του νερού, όσο και των χημικών πρόσμικτων στα μίγματα. Αυτό υπαγορεύτηκε από την άμεση επίδραση που έχει η αύξηση του λόγου Νερού/Τσιμέντο στην αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, κάτι που είναι ευρέως γνωστό από την τεχνολογία σκυροδέματος. Το ποσοστό συμμετοχής των πρόσμικτων σκυροδέματος αποδείχθηκε πως δεν επηρεάζει μόνον την ιξώδη συμπεριφορά της πλαστικής μάζας, κατά την φάση της επεξεργασίας, αλλά και την τελική αντοχή. Αυτό συμβαίνει λόγω της μείωσης του περιεχόμενου νερού που επιτρέπει η δράση του υπερευστοποιητή αλλά και την καλύτερη ομογενοποίηση και ισότροπη συμπεριφορά της πλαστικής μάζας που επιφέρει η χρήση του πλαστικοποιητή.
- Κατά την εκτενή φάση διερεύνησης, τα πρόσμικτα σκυροδέματος δοκιμαστήκαν σε δύο επίπεδα δοσολογίας. Από τον εργαστηριακό έλεγχο των σκληρημένων δοκιμών που παρασκευάστηκαν έγινε άμεσα αντιληπτό πως η χρήση και των δυο

πρόσμικτων στο μέγιστο επίπεδο δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα και κατά συνέπεια υιοθετήθηκε για τη συνέχεια. Με δεδομένο όμως πως η αλλαγή του ποσοστού συμμετοχής του νερού έχει άμεσο αντίκτυπο στις τελικές αντοχές του αναμίγματος, λόγω αύξησης του λόγου νερού/τσιμέντου, αποφασίστηκε να προεπιλεγεί μια «πρότυπη» πλαστικότητα η οποία να μπορεί να προσδιορισθεί ποσοτικά και με την σειρά της να προσδιορίσει το ιδανικό ποσοστό νερού για την παρασκευή μιας τέτοιας πλαστικής μάζας.

- Στη τελική φάση επιλέγη σαν αποδεκτή τιμή εργασιμότητας/πλαστικότητας η τιμή 2 της δοκιμής Pfeffer-Korn. Η τιμή αυτή είναι κοινώς αποδεκτή για την επεξεργασίας κεραμικών μαζών από τις συνήθεις μηχανές εξώθησης. Όμως η παρουσία του τσιμέντου που καθιστά χρονικά πιεστική την επεξεργασία των δοκιμών δεν επέτρεπε μια τόσο χρονοβόρα δοκιμή πλαστικότητας. Επελέγη λοιπόν αντ' αυτής η ευρέως δεδομένη στην βιομηχανία του τσιμέντου δοκιμή Vicat. Επειδή στην περιοχή πλαστικότητας του Pfeffer-Korn=2 η δοκιμή Normal Consistency Vicat Test (ASTM C 187 – 98), δεν έδινε αποτελέσματα, λόγω αδυναμίας εισχώρησης του κυλινδρικού άκρου της συσκευής στα τσιμεντοειδή κονιάματα, αυτό αντικαταστάθηκε από το κωνικό άκρο εισχώρησης της δοκιμής DIN 1168 για τον προσδιορισμό χρόνου πήξης γυψοκονιαμάτων. Η πρωτότυπη αυτή δοκιμή (Μεταποιημένη Δοκιμή Πλαστικότητας Vicat, Modified Vicat Plasticity test ή MVP test), όπως διαμορφώθηκε, έκανε δυνατή την ποσοτικοποίηση της πλαστικότητας/εργασιμότητας των παρασκευαζόμενων μιγμάτων.

Στη συνέχεια παρασκευάστηκε πρότυπη αργιλική μάζα γνωστής σύστασης και συμπεριφοράς, η οποία με την προσθήκη δεδομένης υγρασίας έδινε τιμή κατά την δοκιμή Pfeffer-Korn ίση με 2. Με την βοήθεια της κεραμικής μάζας που παρασκευάστηκε με αυτόν τον τρόπο έγινε δυνατό να προσδιορισθεί η τιμή εισχώρησης Vicat (MVP test) για λόγο Pfeffer-Korn ίσο με 2. Η τιμή αυτή μετρήθηκε ίση με 10,2mm.

Ακολούθησε η κατασκευή νομογράμματος για την περιγραφή της μεταβολής της πλαστικότητας (MVP test) μιγμάτων με τέσσερις περιεκτικότητες σε τσιμέντο (15, 20, 30 και 45%) με την μεταβολή της περιεχόμενης υγρασίας. Η συμπεριφορά των μιγμάτων στην περιοχή πλαστικότητας που ενδιέφερε αποδείχθηκε γραμμική. Από τα σημεία τομής των ευθειών μεταβολής της πλαστικότητας με την περιεχόμενη υγρασία, με την ευθεία MVP test value=10.2mm (η οποία αντιστοιχεί σε τιμή Pfeffer-

Korn=2) προσδιορίστηκε η ποσοστιαία προσθήκη νερού που θεωρείτε πρότυπη για μηχανές εξώθησης της κεραμικής βιομηχανίας.

Χρησιμοποιώντας μέγιστες κατά τον κατασκευαστή δοσολογίες υπερρευστοποιητή και πλαστικοιητή, έγινε δυνατή η παραγωγή πλαστικών τσιμεντοειδών αναμιγμάτων με ικανοποιητικές ιδιότητες σκληρημένου προϊόντος. Ευνοϊκότερες εμφανίζονται οι συνθέσεις 30% και 45% σε τσιμέντο, αν και ανάλογα την χρήση μπορεί να καθίστανται ικανοποιητικές και χαμηλότερες τιμές αντοχών, άρα και περιεκτικότητες σε τσιμέντο. Προτείνεται η χρήση εξώθητήρα κενού ο οποίος θα μείωνε σημαντικά το πορώδες του τελικού προϊόντος με προφανή αποτελέσματα στην μηχανικές ιδιότητες των παρασκευαζομένων δομικών στοιχείων. Οι τιμές υδατοαπορρόφησης θα μπορούσαν να υποβιβαστούν περαιτέρω με την προσθήκη στην υγρή φάση του μίγματος στεγανωτικού μάζας από την αγορά χημικών πρόσμικτων σκυροδέματος. Οι συνθέσεις 30ΠΜ(Μ/Μ)Ε17.46 και 45ΠΜ(Μ/Μ)Ε16.88 κρίνονται ικανές να βρούν εμπορική εφαρμογή για την παραγωγή εμφανών διακοσμητικών στοιχείων με πολύπλοκη γεωμετρία, καθώς και φέροντων δομικών στοιχείων, δεδομένης της υψηλής μηχανικής αντοχής τους.

Ακολούθησε δοκιμή τεχνητής γήρανσης των πλέον υποσχόμενων συνθέσεων που παρασκευάστηκαν. Σχεδιάστηκε ειδικό προφίλ ψύξης/θέρμανσης το οποίο να ανταποκρίνεται στις κλιματικές αλλαγές της Κρήτης, βασισμένο στο πρότυπο EN12371. Για σύγκριση της συμπεριφοράς των συνθέσεων με αντίστοιχο φυσικό δομικό υλικό παρόμοιας υφής και χρήσης, μεταξύ των δοκιμών τοποθετήθηκαν και δοκίμια μικριτικού ασβεστολίθου («Αλφόπετρα Ρεθύμνου»), υλικό που χρησιμοποιείται ευρύτατα ως φυσικός δομικός λίθος. Συμπερασματικά:

- ✓ Τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν με συμπίεση σε υψηλή πίεση (κωδικός 15.79Σ43.33Λ/Α10.20) παρουσιάζουν διαφορετική συμπεριφορά κατά τη δοκιμή σε σχέση με τα υπόλοιπα και την αλφόπετρα, αφού αυξάνουν το βάρος τους με σχετικά υψηλότερο ρυθμό. Το γεγονός σχετίζεται με το πολύ μικρότερο λόγο νερού/τσιμέντου που χρησιμοποιήθηκε στην τεχνική αυτή που σε συνδυασμό με την πολύ υψηλή συμπίεση αυξάνουν πολύ το χρόνο ωρίμανσης του δοκιμίου.
- ✓ Τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν με τη διαδικασία της δημιουργίας πλαστικών μαζών (κωδικοί 45ΠΜ(Μ/Μ)Ε16.88 και 30ΠΜ(Μ/Μ)Ε17.46)

αύξησαν την αντοχή τους (ιδιαίτερα στη σύνθεση με το υψηλό ποσοστό τσιμέντου) σε μονοαξονική θλίψη λόγω ωρίμανσης ενώ η διαδικασία της γήρανσης δεν φάνηκε στους 25 κύκλους να επηρεάζει καθόλου τις μηχανικές τους ιδιότητες. Η υδατοαπορρόφηση παρέμεινε και αυτή στα ίδια επίπεδα.

- ✓ Μετά την συμπλήρωση των 25 κύκλων που αναφέρονται βιβλιογραφικά ως ο ελάχιστος προτεινόμενος αριθμός για έλεγχο, δεν παρατηρείται υποβιβασμός των κύριων φυσικομηχανικών ιδιοτήτων των δοκιμών που ελέγχθηκαν. Οι παρατηρούμενες αλλαγές του βάρους και των αντοχών βιβλιογραφικά αποδίδονται στην δημιουργία δευτερογενών φάσεων αλάτων, εντός των πόρων, αλλά και στην εξέλιξη, σε περίσσεια ύδατος, των αντιδράσεων ενυδάτωσης της φάσης του τσιμέντου, η οποίες δεν είχαν τερματιστεί μετά την συμβατική περίοδο ωρίμανσης των 28 ημερών.

Η παρούσα εργασία ολοκληρώθηκε με την σύνταξη πρώιμης οικονομοτεχνικής μελέτης για τις τρεις προαναφερθείσες συνθέσεις. Αυτή κατέδειξε ότι τα προτεινόμενα προς παραγωγή προϊόντα, κυβόλιθοι, πλάκες δαπεδόστρωσης, τούβλα με εξώθηση για εσωτερική τοιχοποιία και τούβλα διακοσμητικά με εξώθηση για εξωτερική τοιχοποιία μπορούν να παραχθούν με σημαντικά ανταγωνιστικό κόστος.

Πρόλογος

Θα ήθελα πρώτα από όλους να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Μιχάλη Γαλετάκη για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο άτομό μου, την αμέριστη συμπαράστασή του, την πίστη στις κατά καιρούς ιδέες μου και την υπομονή που έδειξε στις προσωπικές μου δυσχερείς συγκυρίες.

κ. Μιχάλη ευχαριστώ.

Τους επιβλέποντες καθηγητές κ.κ. Z. Αγιουτάντη και B. Περδικάτση για τις παρατηρήσεις και διορθώσεις τους στο κείμενο της παρούσας διατριβής.

Την επισκέπτρια ερευνήτρια Alba Scioti από το πολυτεχνείο του Bari, για την βοήθειά της στην κοκκομετρική διερεύνηση βέλτιστων αναλογιών των συνθέσεων των δοκιμών διαμόρφωσης υπό πίεση.

Την τότε επί πτυχίω φοιτήτρια και σήμερα Μηχανικό Ορυκτών Πόρων Σοφία Ασπρούδη για την βοήθεια της στον προσδιορισμό φυσικών ιδιοτήτων της παιπάλης.

Τα εργαστήρια περιθλασιμετρίας ακτίνων X, εμπλουτισμού μεταλλευμάτων, μηχανικής πετρωμάτων για την αγόγγυστη βοήθεια που προσέφεραν με τον εξοπλισμό αλλά και την εμπειρία τους.

Την εταιρεία ΑΣΦΑΛΤΙΚΗ ΑΕ, για την άψογη συνεργασία της, το ασυνήθιστο για ελληνική επιχείρηση νεωτεριστικό της πνεύμα και την εμπιστοσύνη που έδειξε στο άτομό μου.

Περιεχόμενα

<i>Εισαγωγή</i>	14
1. ΤΑ ΥΠΕΡΛΕΠΤΟΜΕΡΗ ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΑ ΤΗΣ ΛΑΤΟΜΙΚΗΣ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑΣ	16
<i>1.1 Φύση και έκταση του προβλήματος</i>	16
<i>1.2 . Λύσεις που έχουν προταθεί διεθνώς για την αξιοποίηση των λεπτομερών λατομικών παραπροϊόντων</i>	18
<i>1.2.1 Χρήση των λεπτομερών στον τομέα των κατασκευών – ανταγωνισμός με άλλα υλικά</i>	18
<i>1.2.2 Αποκατάσταση χώρων λατομείων</i>	19
<i>1.2.3 Χαλαρά υλικά για επιχώσεις σε έργα οδοποιίας και θεμελιώσεων</i>	20
<i>1.2.4 Εφαρμογές χαλαρών λεπτόκοκκων λατομικών υλικών στη διαμόρφωση τοπίου</i>	22
<i>1.2.5 Εφαρμογές λεπτομερών λατομικών προϊόντων ως συστατικό σε ασφαλτοσκυροδέματα και σε άλλα υλικά οδοποιίας</i>	22
<i>1.2.6 Λεπτομερή που χρησιμοποιούνται ως αδρανή στο σκυρόδεμα</i>	23
<i>1.2.7 Λεπτομερή για παραγωγή συνθετικών και ελαφροβαρών αδρανών</i>	33
<i>1.2.8 Λεπτομερή που χρησιμοποιούνται ως αδρανή σε τούβλα και άλλα δομικά στοιχεία (block)</i>	
<i>35</i>	
2. ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ ΚΑΙ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΠΡΩΤΗΣ ΥΛΗΣ	38
<i>2.1 Εισαγωγή</i>	38
<i>2.2 Δειγματοληψία</i>	41
<i>2.2.1 Λευκή (ζηρή) παιπάλη</i>	42
<i>2.2.2 Μαύρη παιπάλη</i>	42
<i>2.2.3 Φαία παιπάλη</i>	43
<i>2.3 Μετρήσεις φυσικομηχανικών ιδιοτήτων</i>	43
<i>2.3.1 Μετρήσεις της αεροπερατότητας κατά Blaine</i>	43
<i>2.3.2 Μετρήσεις της φαινόμενης πυκνότητας</i>	43
<i>2.3.3 Αναλύσεις παιπάλης για κοκκομετρία με laser</i>	44
<i>2.4 Αναλύσεις παιπάλης για μορφολογία κόκκων με οπτική και ηλεκτρονική μικροσκοπία</i>	45
<i>2.5 Χημικές αναλύσεις</i>	46
<i>2.6 Ορυκτολογικές αναλύσεις</i>	47
<i>2.7 Θερμοβαρυτομετρικές αναλύσεις</i>	49
<i>2.8 Επεξεργασία και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων</i>	51
3. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΣΥΝΘΕΣΕΩΝ - ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	52
<i>3.1 Πειραματικός σχεδιασμός συνθέσεων δοκιμίων παιπάλης/τοιμέντου.</i>	52
<i>3.2 Διαμόρφωση δοκιμίων παιπάλης/τοιμέντου υπό πίεση</i>	53
<i>3.2.1 Διερευνητική φάση</i>	54
<i>3.2.2 Εκτενής φάση</i>	57
<i>3.2.3 Τελική φάση</i>	59
<i>3.3 Διαμόρφωση δοκιμίων με εξώθηση μιγμάτων παιπάλης/τοιμέντου</i>	66
<i>3.3.1 Διερευνητική φάση</i>	66
<i>3.3.2 Εκτενής φάση</i>	67
<i>3.3.3 Τελική φάση</i>	68
<i>3.4 Προσδιορισμός αντοχής σε τεχνητή γήρανση</i>	76
<i>3.4.1 Εργαστηριακός εξοπλισμός - Διαδικασία μέτρησης</i>	76
<i>3.4.2 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων</i>	80
4 ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΗ ΟΙΚΟΝΟΜΟΤΕΧΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΩΝ ΧΡΗΣΕΩΝ ΤΗΣ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΙΚΗΣ ΠΑΙΠΑΛΗΣ	83
<i>4.1 Προτεινόμενη χρήση: Δαπεδόστρωση υψηλής αντοχής - χαμηλής υδατοαπορρόφησης (προϊόν προς παραγωγή: κυβόλιθοι)</i>	83

<i>4.2 Προτεινόμενη χρήση: Δαπεδόστρωση υψηλής αντοχής - χαμηλής υδατοαπορρόφησης (προϊόν προς παραγωγή: πλάκες εξωτερικής διάστρωσης)</i>	<i>85</i>
<i>4.3 Προτεινόμενη χρήση: Εμφανής φέρουσα εσωτερική τοιχοποιία (προϊόν προς παραγωγή: τούβλα εξωθούμενα με 30% τσιμέντο)</i>	<i>87</i>
<i>4.4 Προτεινόμενη χρήση: Εμφανής φέρουσα εξωτερική τοιχοποιία (προϊόν προς παραγωγή: τούβλα εξωθούμενα, 45% τσιμέντο).....</i>	<i>89</i>
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	91

Εισαγωγή

Αναζητώντας μια εφικτή για τα ελληνικά δεδομένα λύση, στο πρόβλημα της συσσώρευσης της ασβεστολιθικής παιπάλης, που παράγεται από τα λατομεία εξόρυξης αδρανών υλικών, έγινε αρχικά μια εκτενής βιβλιογραφική έρευνα για τις διεθνώς προτεινόμενες μεθόδους διαχείρισης του παραπροϊόντος αυτού. Ως πλέον υποσχόμενη λύση για την αξιοποίηση του παραπροϊόντος αυτού εκτιμήθηκε η χρήση του για την παραγωγή ειδικών δομικών στοιχείων. Η απόφαση αυτή στηρίχθηκε στο γεγονός πως τα λατομεία αδρανών υλικών αποτελούν στην Ελλάδα μέλος του κατασκευαστικού τομέα και η αγορά των δομικών υλικών είναι άμεσα συνδεδεμένη με την κατασκευαστική δραστηριότητα. Έτσι, δομικά προϊόντα παραγόμενα από την ανακύκλωση της ασβεστολιθικής παιπάλης μέσα στους χώρους των επιχειρήσεων παραγωγής ή/και χρήσης των αδρανών υλικών (λατομεία, επιχειρήσης παραγωγής και εμπορίας ετοίμου σκυροδέματος ή/και ασφαλτομίγματος), θα παρουσίαζαν χαμηλότερο κόστος, θα βασίζονταν σε υπάρχουσα τεχνογνωσία και εξοπλισμό και θα διατίθεντο στην αγορά που ήδη δραστηριοποιούνται οι επιχειρήσεις αυτές.

Αρχικά κρίθηκε απαραίτητος ο χαρακτηρισμός του λεπτομερούς υλικού με την διεξαγωγή εκτενούς προγράμματος εργαστηριακών ελέγχων, που είχαν σαν στόχο τον προσδιορισμό των κρίσιμων παραμέτρων για την περαιτέρω χρήση του υλικού, το εύρος διακύμανσης των ιδιοτήτων αυτών στην μάζα της συσσωρευόμενης παιπάλης, και πιθανές διακριτές ποιότητες που παράγονται σε όλη την βιομηχανική περιοχή του Ήρακλείου.

Η ταυτοποίηση του υλικού οδήγησε στην επιλογή δύο τεχνολογιών παραγωγής δομικών στοιχείων, με κυρίαρχο συστατικό το λεπτομερές ασβεστολιθικό παραπροϊόν: την διαμόρφωση δομικών στοιχείων με την συμπίεση ύφυγρων μιγμάτων τσιμέντου παιπάλης, τεχνολογία που χρησιμοποιείται διεθνώς με άλλες όμως πρώτες ύλες και την διαμόρφωση δομικών στοιχείων με εξώθηση αναμιγμάτων τσιμέντου παιπάλης και κατάλληλων χημικών πρόσμικτων σκυροδέματος.

Οι παραπάνω διερευνηθείσες τεχνολογίες καθόρισαν και τον γενικότερο σχεδιασμό της πειραματικής διερεύνησης. Η κάθε τεχνολογία διερευνήθηκε σε τρεις φάσεις: στην διερευνητική φάση, όπου προσδιορίσθηκαν οι παράμετροι σχεδιασμού και ελέγχου (ή απόκρισης) της διεργασίας διαμόρφωσης, στην εκτενή φάση, όπου προσδιορίσθηκε το πεδίο τιμών των παραπάνω παραμέτρων εντός του οποίου θα

αναζητούνταν η βελτιστοποίηση του παραγόμενου προϊόντος και στην τελική φάση, όπου έγινε πύκνωση των πειραματικών δοκιμών για την ανάδειξη της βέλτιστης σύνθεσης και διαδικασιών παραγωγής.

Σε κάθε φάση της πειραματικής διερεύνησης προσδιορίζονταν οι συσχετίσεις των παραμέτρων σχεδιασμού και απόκρισης του συστήματος και καθορίζονταν το επόμενο πειραματικό στάδιο. Στόχος της διαδικασίας αυτής ήταν η πειραματική παραγωγή δομικών στοιχείων, που να ικανοποιούν τις υπάρχουσες προδιαγραφές. Με τον σχεδιασμό έγινε δυνατή η παραγωγή στη τελική φάση μικρού αριθμού εργαστηριακών δοκιμών που πέραν των συνήθων ελέγχων (αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, κάμψη και υδατοαπορρόφηση) υποβλήθηκαν και σε δοκιμή τεχνητής γήρανσης κατάλληλα προσαρμοσμένης στις κλιματικές συνθήκες της Κρήτης. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα φυσικομηχανικά χαρακτηριστικά των εργαστηριακά παραχθέντων δοκιμών πληρούν τις προδιαγραφές που απαιτούνται για δομικά στοιχεία διαφόρων χρήσεων (διακοσμητικά, φέροντα κ.α.).

Τέλος, για την διερεύνηση της οικονομικής βιωσιμότητας μιας τέτοιας επένδυσης στην σημερινή αγορά δομικών υλικών, συντάχθηκε προκαταρκτική οικονομοτεχνική μελέτη.

1. ΤΑ ΥΠΕΡΛΕΠΤΟΜΕΡΗ ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΑ ΤΗΣ ΛΑΤΟΜΙΚΗΣ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑΣ

1.1 Φύση και έκταση του προβλήματος

Στην βιομηχανία παραγωγής αδρανών υλικών και κατά τις διαδικασίες εξόρυξης, μεταφοράς και θραύσης, παράγονται μεγάλες ποσότητες λεπτομερών ασβεστολιθικών υλικών, κοινά αποκαλούμενες «ασβεστολιθική παιπάλη». Ιδιαίτερα κατά τις φάσεις θραύσης και κοσκίνησης μπορούν να απελευθερωθούν και να διασπαρούν στην ατμόσφαιρα ή τα επιφανειακά ύδατα λεπτομερή υλικά όπως η ιλύς και η παιπάλη θραύσης.

- Ιλύς αποκαλείται το λεπτομερές υλικό μεταξύ 2 και 60 μμ που μειώνονται σε αυτό το μέγεθος με φυσικές διαδικασίες και βρίσκεται σε υπό εκμετάλλευση γεωλογικούς σχηματισμούς.
- Παιπάλη θραύσης αποκαλείται το λεπτομερές υλικό που παράγεται κατά τις διαδικασίες μείωσης μεγέθους του μητρικού πετρώματος.

Στο σκυρόδεμα η παιπάλη συναντάται με την μορφή λεπτού επιστρώματος επί των χονδρομερών αδρανών, το οποίο παρεμβαίνει στον δεσμό μεταξύ του αδρανούς και υδραυλικής φάσης του τσιμέντου.

Με βάση τον Κανονισμό Τεχνολογίας Σκυροδέματος ως παιπάλη ορίζεται το μέρος του αδρανούς που περνάει από το Αμερικάνικο πρότυπο κόσκινο No 200 (75μμ) και προσδιορίζεται σύμφωνα με τη μέθοδο ΣΚ-305. Η παιπάλη της άμμου δεν πρέπει να υπερβαίνει το 16% του ξηρού βάρους της και η παιπάλη των πιο χονδρόκοκκων κλασμάτων («ρυζάκι», «γαρμπίλι», χαλίκι) δεν πρέπει να υπερβαίνει το 1% του εν ξηρώ βάρους του. Για άοπλα σκυροδέματα χωρίς ειδικές απαιτήσεις επιτρέπεται παιπάλη στην άμμο μέχρι 20% του εν ξηρώ βάρους της.

Η συσσώρευση των λεπτομερών παραπροϊόντων που προέρχονται από την παραγωγή αδρανών υλικών αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα της βιομηχανίας των αδρανών. Τα προϊόντα αυτά, που σε μεγάλο ποσοστό παραμένουν ανεκμετάλλευτα, θα μπορούσαν να είναι σημαντική πηγή πρώτης ύλης για τον κατασκευαστικό τομέα. Η αξιοποίηση του λεπτομερούς υλικού είτε ως έχει υπό τη μορφή πληρωτικού είτε μετά από επεξεργασία του για την παρασκευή νέων προϊόντων, μπορεί να παρατείνει τη διάρκεια ζωής των αποθεμάτων ασβεστόλιθου

και κατά συνέπεια των λατομείων. Επιπλέον, απορρόφηση μεγάλων ποσοτήτων λεπτομερών θα έχει οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη λόγω μειωμένων εξόδων για απόθεση ή απόρριψη και πρόσθετων εσόδων από την πώληση των νέων προϊόντων. Το μέγεθος του προβλήματος που δημιουργούν τα λεπτομερή είναι χαρακτηριστικό στην Ελλάδα, όπου η παραγωγή αδρανών για το έτος 2008 υπολογίζεται στα 100 εκατομμύρια τόνους, εκ των οποίων 10-15 εκατομμύρια τόνοι είναι τα λεπτομερή παραπροϊόντα (ποσοστό 10-15%) (Τζεφέρης, 2009). Λαμβάνοντας υπόψη και τους κανονισμούς που περιορίζουν ολοένα και περισσότερο το ποσοστό παιπάλης στα διάφορα προϊόντα όπου συμμετέχουν τα αδρανή, γίνεται αντιληπτή η ανάγκη για εξεύρεση λύσεων.

Μέχρι σήμερα τα λεπτομερή ασβεστολιθικά προϊόντα έχουν περιορισμένη χρήση ως γεωργικά πρόσθετα ή πληρωτικά υλικά σε άλλους τομείς της βιομηχανίας. Η διεύρυνση των πεδίων χρήσης προϋποθέτει εκτενή μελέτη ώστε οι προτάσεις που θα προκύψουν να είναι τεχνικά και οικονομικά εφαρμόσιμες. Σε πολλές περιπτώσεις το κόστος μεταφοράς καθιστά απαγορευτική τη διάθεση της παιπάλης σε άλλες βιομηχανίες, ενώ σε κάποιες άλλες η επεξεργασία του υλικού ώστε να καταστεί σε μορφή κατάλληλη για να συμμετέχει σε ένα προϊόν είναι αρκετά δύσκολη ή αρκετά δαπανηρή. Πριν αναζητηθεί λοιπόν οποιαδήποτε λύση θα πρέπει να γίνει η αξιολόγηση των χαρακτηριστικών της παιπάλης ώστε οι ιδιότητες του υλικού να αποτελέσουν έναν αρχικό οδηγό για τους πιθανούς τομείς απορρόφησής του. Στη συνέχεια πρέπει να λαμβάνονται υπόψη παράγοντες όπως η γεωγραφική θέση του λατομείου και η ύπαρξη βιομηχανιών που να ενδιαφέρονται για το νέο προϊόν, η οικονομική απόκτηση και συντήρηση του εξοπλισμού που θα απαιτηθεί για να παραχθεί το νέο προϊόν και η ικανότητα του ανθρώπινου δυναμικού να το υλοποιήσει. Τέλος, πρέπει να ελεγχθούν διάφορες παράμετροι του προϊόντος που θα παραχθεί για να εντοπιστούν τυχόν ατέλειες ή παραλείψεις στη φάση που το προϊόν βρίσκεται ακόμη σε πειραματικό στάδιο.

1.2 Λύσεις που έχουν προταθεί διεθνώς για την αξιοποίηση των λεπτομερών λατομικών παραπροϊόντων

1.2.1 Χρήση των λεπτομερών στον τομέα των κατασκευών – ανταγωνισμός με άλλα υλικά

Τα λεπτομερή προϊόντα χρησιμοποιούνται κυρίως στον κατασκευαστικό τομέα της βιομηχανίας, με αποτέλεσμα η ζήτηση να εξαρτάται άμεσα από την οικοδομική δραστηριότητα, τα έργα υποδομών (οδοποιία, λιμάνια, αεροδρόμια κ.α.) και άλλων συναφών δραστηριοτήτων. Ωστόσο, η πλήρης δυνατότητα χρήσης εναλλακτικών υλικών (δηλαδή άλλων από τα πρωτογενή αδρανή) στις κατασκευές δεν έχει ακόμη επιτευχθεί λόγω διαφόρων παραγόντων, όπως (i) η αβεβαιότητα σχετικά με τις φυσικές τους ιδιότητες και τον τρόπο με τον οποίο θα επιδράσουν στις ιδιότητες του τελικού προϊόντος, και (ii) ο κίνδυνος ρύπανσης του περιβάλλοντος (Hill et al., 2001). Ο Hill et al. έδειξε ότι τα εναλλακτικά υλικά, όπως τα απόβλητα των λατομείων, μπορούν να αποδώσουν το ίδιο καλά ή ακόμη και καλύτερα από τα συνήθη αδρανή που χρησιμοποιούνται για υποβάσεις δρόμων και επιχώσεις. Όπως υποστηρίχτηκε από τον Rockliff (1996), είναι σημαντικό η χρήση των αδρανών στις κατασκευές να κατευθύνεται από προδιαγραφές για την τελική απόδοση που μπορεί να εφαρμοστεί σε ένα εύρος υλικών διαφορετικής προέλευσης.

Σε τέτοιου είδους κατασκευές, η ικανότητα μιας επιχείρησης να διαθέσει τα λεπτομερή εξαρτάται από την τοπική ζήτηση και τον ανταγωνισμό με άλλα λατομεία με πρόσβαση στην ίδια αγορά. Λατομεία που απέχουν σημαντική απόσταση από βιομηχανικούς καταναλωτές μειονεκτούν οικονομικά. Σε αυτές τις περιπτώσεις, πρέπει να βρεθούν εναλλακτικές χρήσεις για τα λεπτομερή που δεν μπορούν να ανακυκλωθούν αλλά μπορούν να μειώσουν το κόστος μιας διαδικασίας και να αποφέρουν έσοδα. Μια πιθανή εφαρμογή είναι η ανάπτυξη υλικών για την αποκατάσταση εδαφών, ή σε συνεργασία με αγρότες της περιοχής, ιδιαίτερα για λατομεία σε περιοχές με περιορισμούς λόγω μορφολογίας.

Η επέκταση της χρήσης των λεπτομερών στην αγορά, πιθανότατα χαλαρώνοντας τις προδιαγραφές και τα πρότυπα στη βιομηχανία των κατασκευών, θα σημάνει αυτόματα μείωση της συμμετοχής στην αγορά των πρωτογενών αδρανών. Και ενώ κάτι τέτοιο συνεπάγεται περιβαλλοντικά οφέλη, δεν αποτελεί ελκυστική προοπτική για τους παραγωγούς αδρανών. Άλλα υλικά που ανταγωνίζονται με τα λεπτομερή

στον κατασκευαστικό τομέα είναι ανακυκλωμένα υλικά από απόβλητα κατασκευών και κατεδαφίσεων. Πιθανότατα τα λεπτομερή των λατομείων να είναι καλύτερης ποιότητας (ως προς τη σταθερότητα στη σύσταση, τις φυσικές ιδιότητες και τη διαθεσιμότητα) από τα ανακυκλωμένα απόβλητα και για τον λόγο αυτό έχουν αυστηρότερες προδιαγραφές.

1.2.2 Αποκατάσταση χώρων λατομείων

Η αποκατάσταση χώρων λατομείων αποτελεί ίσως την περισσότερο οικονομικά βιώσιμη λύση για τη χρήση αποβλήτων από υπερλεπτομερή (Harrison, 2003). Οι Fraser και McBride (2002) παρουσίασαν μια μελέτη σχετικά με τις ιδιαίτερες γεωτεχνικές ιδιότητες των λεπτομερών όταν χρησιμοποιούνται ως υλικό για επιχώσεις σε λατομεία δολομίτη. Λεπτομερή μετά από διαβροχή (pond fines) χρησιμοποιήθηκαν στην κατασκευή επικλινούς αναχώματος στη βάση της κάθετης περιμέτρου των τοίχων του λατομείου. Βρέθηκε ότι αύξηση της πυκνότητας επί ξηρού κατά 0.1 g/cm^3 πάνω από τη μέση πυκνότητα που μετρήθηκε επί τόπου, δεν βελτιώνει αρκετά τους συντελεστές ασφάλειας για την ευστάθεια των πρανών ώστε να εξασφαλιστεί αυξημένη μηχανική συμπύκνωση των λεπτομερών κατά τη διάρκεια της κατασκευής του αναχώματος.

Ο Huffman (2001) παρουσίασε μια μελέτη της προσέγγισης που γίνεται στην επίλυση του προβλήματος των λεπτομερών στο λατομείο ασβεστόλιθου SRM Tarrant στην Αλαμπάμα. Το πρόβλημα των λεπτομερών ήταν ιδιαίτερα οξύ για το συγκεκριμένο λατομείο σε μια μητροπολιτική περιοχή καθώς είχε περιορισμούς χώρου. Αξιόλογα αποθέματα πετρώματος έγιναν απρόσιτα έως ότου απομακρύνονταν τα τέλματα απόθεσης των λεπτομερών. Οκτώ χρήσεις αυτών των λεπτομερών προσδιορίστηκαν και σε έξι από αυτές τις περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκαν σε εμπορική βάση. Μέσα σε 1.5 έτος απομακρύνθηκαν από το λατομείο περίπου 250000 τόνοι ασβεστολιθικής λάσπης από τα τέλματα και χρησιμοποιήθηκαν κυρίως ως ειδικά εδαφικά καλύμματα ή στρώματα φιλτραρίσματος σε XYTA της περιοχής. Οι ιδιότητες των υλικών αυτών ήταν συγκρίσιμες, ή και ανώτερες πολλές φορές, από εκείνες τοπικών εδαφών που χρησιμοποιούνταν γενικότερα ως πληρωτικά. Η έρευνα έδειξε ότι οι λάσπες ασβεστολιθικής σύστασης φαίνεται να είναι κατάλληλες να χρησιμοποιηθούν για έλεγχο της διάβρωσης σε περιπτώσεις όξινης απορροής λατομείων.

Από την παραπάνω μελέτη συμπεραίνεται ότι τόσο ο οικονομικός τομέας όσο και οι τομείς της εκπαίδευσης και της έρευνας ήταν εξίσου σημαντικοί. Η καλή επικοινωνία και η υποστήριξη ήταν απαραίτητες για την εύκολη και ικανοποιητική εξυπηρέτηση του πελάτη, καθώς τα υλικά αυτά δεν είναι ένα συνηθισμένο προϊόν της αγοράς. Απαραίτητη θεωρήθηκε η γνώση των περιορισμών που συνοδεύουν τα λεπτομερή (μηχανικές ιδιότητες, υγρασία, σταθερότητα και κόστος διαχείρισης και μεταφοράς), καθώς και η ανάγκη για εκπαίδευση των μηχανικών σχετικά με τη διαχείριση των υλικών αυτών. Επίσης, στον τομέα της αποκατάστασης μπορούν να συμπεριληφθούν κάποιες, μάλλον ειδικές αλλά εν δυνάμει σημαντικές, χρήσεις των λεπτομερών που προκύπτουν ως απόβλητα λατομικών διαδικασιών:

Ο Amaralunga (1991) περιγράφει πως μπορεί να επιτευχθεί η συσσωμάτωση των λεπτομερών χρησιμοποιώντας κάποιο συνδετικό (όπως τσιμέντο, ασβέστη ή σκωρία από καμίνους σιδήρου) σε έναν δισκοειδή ή τυμπανοειδή συσσωματοποιητή. Αυτή η διαδικασία θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για τη διάθεση δραστικών, μη ασφαλών για το περιβάλλον λεπτομερών (στη μελέτη χρησιμοποιήθηκαν υπολείμματα χαλκού και νικελίου). Πιθανές εναλλακτικές τεχνικές συσσωμάτωσης είναι η πίεση, η μπρικετοποίηση και η συσσωμάτωση με διαδικασίες συμπίεσης και εξώθησης.

Με παρόμοια μοντέλα ο Marabini et al (1998) περιγράφει μια μέθοδο για παραγωγή κεραμικών καθώς και μονωτικών υλικών όπως υαλοβάμβακα και πετροβάμβακα (glass- and rock-wool fiber) από έναν συνδυασμό βιομηχανικών, μεταλλευτικών και λατομικών αποβλήτων (χρησιμοποιείται βασάλτης και σερπεντίνης, καθώς η χημική σύσταση είναι σημαντική για την εφαρμογή αυτή). Ο σκοπός της εργασίας αυτής είναι να δημιουργήσει νέα υλικά που να μπορούν να χρησιμοποιηθούν ή να αποτεθούν χωρίς να υπάρχει κίνδυνος για το περιβάλλον από βαρέα μέταλλα που υπάρχουν σε κάποιες πρώτες ύλες (αδρανοποίηση βαρέων τοξικών μετάλλων). Προτεινόμενες χρήσεις για τα κεραμικά είναι: πεζοδρόμια, αδρανή και θερμομονωτικά υλικά. Ο πετροβάμβακας προτείνεται για την αντικατάσταση του αμιάντου και σε όλα τα προϊόντα τα ενισχυμένα με ίνες.

1.2.3 Χαλαρά υλικά για επιχώσεις σε έργα οδοποιίας και θεμελιώσεων

Μια ευρεία χρήση των λατομικών λεπτομερών είναι ως υλικά επιχώσεων, που χρησιμοποιούνται κυρίως για έργα οδοποιίας (υποβάσεις δρόμων) συμπεριλαμβανομένων και των δρόμων μεταφοράς εντός των λατομείων.

Άρθρο του Touahamia et al. (2002) δείχνει ότι τα λατομικά λεπτομερή μπορεί να υποκαταστήσουν τα αδρανή υπόβασης για δρόμους και σιδηροδρομικές γραμμές, κλπ. Σε ξεχωριστές δοκιμές ξηρά λατομικά απόβλητα, μπάζα οικοδομών και θραυσμένο σκυρόδεμα συμπυκνώθηκαν σε στρώματα διαχωρισμένα με γεωυφάσματα. Οι αντοχές τους συγκρίθηκαν με θραυσμένο βασάλτη αντιπροσωπεύοντας ένα ‘παραδοσιακό αδρανές’. Τα λατομικά απόβλητα είχαν πολύ μικρότερη κατανομή μεγέθους σωματιδίων από άλλα υλικά ($<5\text{mm}$ σε αντίθεση με τα $<13\text{mm}$). Από τη μελέτη προέκυψε ότι η παρουσία γεωσυνθετικής ενίσχυσης αυξάνει κατά πολύ τη διατμητική αντοχή (έως 50%) και την πλευρική παραμόρφωση (restrained deformation).

Ο Parker, σε άρθρο του σε συνέδριο του International Center of Aggregate Research, των University of Texas και Texas A&M University (ICAR, 1996), αναφέρεται σε παρόμοια μελέτη που ερευνά τα πλεονεκτήματα των λεπτομερών που προκύπτουν από τα θραυστά πετρώματα για σταθεροποίηση πρανών. Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν υπολείμματα γρανίτη από κοσκίνιση (granite screenings), ασβεστολιθική ιλύς τελμάτων και λατομική άμμος και μελετήθηκαν ως προς την αντοχή, τη διαπερατότητα και τις χημικές ιδιότητες. Κατασκευάστηκε ένα γεωύφασμα ύψους 4m με ίνες για τη σταθεροποίηση τοίχου, λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω ιδιότητες και βρέθηκε ότι με τα λεπτομερή από θραυστό πέτρωμα απαιτείται λιγότερη ενίσχυση με ίνες από ότι με τη φυσική άμμο, με συνέπεια μειωμένο κόστος.

Οι Graves και Little σε άρθρο από τους στο ίδιο συνέδριο περιγράφουν τον τρόπο που τα ασβεστολιθικά αδρανή υπόβασης μπορούν να ενισχυθούν με την προσθήκη ανθρακικών λεπτομερών. Εργαστηριακές δοκιμές και δοκιμές πεδίου διεξήχθησαν στο Τέξας και στην Φλόριντα. Τα λεπτομερή ανέπτυξαν επιπλέον αντοχή, μέσω μιας διαδικασίας τσιμεντοποίησης, που μπορεί να επανέχθει με την προσθήκη υδροξειδίου του ασβεστίου στο μίγμα. Το κατά πόσο θα αυξηθεί η αντοχή εξαρτάται από την ορυκτολογία του ασβεστόλιθου και των λεπτομερών που χρησιμοποιούνται.

Μια άλλη μελέτη αφορά στην κατασκευή ενός δοκιμαστικού δρόμου από λατομικά απόβλητα (Rezende and Carvalho, 2003). Ο πειραματικός αυτός δρόμος, που είχε μήκος 80m και πλάτος 10m, κατασκευάστηκε και δοκιμάστηκε για περίοδο 3 ετών με χρήση όχι πολύ συχνή. Λατομικά απόβλητα με μέγεθος κόκκων $\leq 100\text{mm}$ χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή ενός στρώματος βάσης πάχους 20cm, το οποίο

καλύφθηκε από μια επιφάνεια πάχους 3cm. Τα αποτελέσματα επιβεβαίωσαν ότι τα λατομικά απόβλητα μπορούν να χρησιμοποιηθούν επιτυχώς ως υλικά βάσης ωστόσο αναφέρεται ότι η αντοχή και η ανθεκτικότητα της επιφάνειας καταστρέφονται από το νερό.

1.2.4 Εφαρμογές χαλαρών λεπτόκοκκων λατομικών υλικών στη διαμόρφωση τοπίου

Τα λατομικά αδρανή μπορούν ακόμη να χρησιμοποιηθούν ως επίστρωση ή υλικό βάσης σε δρόμους, μονοπάτια κήπων και αυλές παίρνοντας τη θέση της άμμου. Στο διαδίκτυο υπάρχουν πολλές εταιρείες (κυρίως στις ΗΠΑ, στην Αυστραλία και στη Νέα Ζηλανδία) που πωλούν λατομικά λεπτομερή για τις χρήσεις αυτές. Τα διακοσμητικά αδρανή είναι ιδιαίτερα εμπορεύσιμα σε ξηρές περιοχές όπου είναι δύσκολο να διατηρηθεί το γκαζόν στους κήπους.

Παραδείγματα εταιρειών αναφέρονται στη συνέχεια:

- Η landscape supplies company Nuway εμπορεύεται σκόνη από τον σπαστήρα ως υλικό πλήρωσης και συμπύκνωσης στην τιμή των AUS\$39 το κυβικό μέτρο (Manning, 2004).
- Η Canterbury Landscape Supplies (NZ) εμπορεύεται σκόνη από τον σπαστήρα προς NZ\$4.00 τα 25 λίτρα (Manning, 2004).
- Η Centenary landscaping supplies, στην Αυστραλία, χρεώνει AUS\$48.40 το κυβικό μέτρο για λεπτομερή από σπαστήρα (Manning, 2004).

1.2.5 Εφαρμογές λεπτομερών λατομικών προϊόντων ως συνστατικό σε ασφαλτοσκυροδέματα και σε άλλα υλικά οδοποιίας.

Ο Hill et al. (2001) υποστηρίζει ότι τα λεπτόκοκκα αδρανή είναι λιγότερο κατάλληλα σε σχέση με τα χονδρόκοκκα υλικά, όταν αφορά στην κατασκευή δρόμων, διότι δεν έχουν την απαραίμενη αντοχή. Ωστόσο, είναι κατάλληλα για χρήση στην κατασκευή συνδετικών υλικών με βάση την άσφαλτο και άλλα υλικά οδοποιίας. Το ορυκτό πληρωτικό υλικό που χρησιμοποιείται σε θερμά ασφαλτικά μίγματα είναι γνωστό ότι παίζει σημαντικό ρόλο στην σκλήρυνση (stiffness) του συνδετικού, ενώ αύξηση στην ανθεκτικότητα και την αντίσταση σε ρωγμές (toughness and fracture resistance) εξαιτίας ορυκτών πληρωτικών δεν είναι αρκετά τεκμηριωμένη. Άρθρο που παρουσιάστηκε το 1996 στο συνέδριο ICAR (Anderson, 1996) προτείνει ότι η δοκιμή

Rigden test να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη της επίδρασης των λεπτομερών ορυκτών υλών στις μηχανικές ιδιότητες των θερμών ασφαλτομιγμάτων.

Ένα άλλο άρθρο του συνεδρίου ICAR του 1999 αναφέρεται σε δοκιμές στη χρήση των λεπτομερών στην άσφαλτο (Collins, 1999). Νέα ανάμειξη των αδρανών σε συγκεκριμένες αναλογίες μπορεί να παράξει ασφαλτοσκυροδέματα με υψηλή αντοχή στη παραμόρφωση λόγω της πίεσης των ελαστικών από τα οχήματα. Ένα από τα συμπεράσματα που προέκυψαν ήταν ότι υψηλής συχνότητας κοσκίνιση των αδρανών και νέες στρατηγικές ανάμειξης μπορούν να μετατρέψουν τα επιπλέον ή απόβλητα λεπτομερή σε υλικό υψηλής απόδοσης και μεγάλης ζήτησης.

Αποτελεσματικές δοκιμαστικές μέθοδοι πρέπει να αναπτυχθούν ώστε να προκύψουν καλύτερες και καταλληλότερες προδιαγραφές και πρότυπα. Έκθεση του ICAR (ICAR, 201-1) περιγράφει την έρευνα για τις ιδιότητες και την απόδοση των ασφαλτικών μιγμάτων σε αντιστοιχία με τις υπάρχουσες προδιαγραφές για το κονχώδες των λεπτομερών αδρανών, που περιλαμβάνουν αρκετούς περιορισμούς. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι περιορισμοί στις προδιαγραφές δεν είναι απαραίτητοι για τον έλεγχο της διαβάθμισης.

Επίσης στις ΗΠΑ, η εταιρεία Luck Stone (Manning, 2004) ανέπτυξε και εμπορεύεται μια ποικιλία προϊόντων κάλυψης επιφανειών που φτιάχνονται από λεπτομερή, άμμο και συνδετικά. Περιλαμβάνονται επιφάνειες γηπέδων τένις και μπεζίμπολ, μονοπάτια και ειδικά τμήματα σε γήπεδα γκολφ. Το επιφανειακό υλικό φτιάχνεται από τα λεπτομερή της κοσκίνισης και συνδετικό σε διάφορα χρώματα με διαφορετική σκληρότητα, ελαστικότητα, τριβή και άλλες ιδιότητες.

1.2.6 Λεπτομερή που χρησιμοποιούνται ως αδρανή στο σκυρόδεμα

Στην περίπτωση του σκυροδέματος, η περιεκτικότητα σε λεπτομερή μπορεί να φτάνει το 40-50% και σε ορισμένες περιοχές να καταναλώνεται όλη η ποσότητα των λεπτομερών που παράγεται από τα τοπικά λατομεία. Τα έτοιμα μίγματα σκυροδέματος περιέχουν 30% λεπτομερή αδρανή, αποτελούμενα από ίσες ποσότητες λατομικών αδρανών (κυρίως ασβεστόλιθο) και άμμο. Οι ποσότητες λεπτομερών από ψαμμίτη και ιζηματογενή πετρώματα που χρησιμοποιούνται με αυτόν τον τρόπο είναι περιορισμένες, λόγω της υψηλής απαίτησης σε νερό η οποία δημιουργεί στη συνέχεια προβλήματα συρρίκνωσης, κλπ. Αυτά τα προβλήματα μπορούν να λυθούν μέσω της

χρήσης χημικών πρόσθετων, το κόστος των οποίων μπορεί υπό τις κατάλληλες συνθήκες να εξισορροπείται από το μειωμένο κόστος μεταφοράς.

Τόσο η έντυπη βιβλιογραφία όσο και η βιβλιογραφία στο διαδίκτυο αναφέρουν πολλές μελέτες με λατομικά λεπτομερή απόβλητα που χρησιμοποιούνται ως αδρανή στο σκυρόδεμα, αντικατοπτρίζοντας το εύρος τόσο του ακαδημαϊκού όσο και του βιομηχανικού ενδιαφέροντος για τον συγκεκριμένο τομέα. Οι ερευνητές μελετούν τρόπους για να βελτιστοποιήσουν διάφορες ιδιότητες του σκυροδέματος στο οποίο χρησιμοποιούνται λεπτομερή, καθώς επίσης και τρόπους για να χαρακτηρίσουν τις βασικές ιδιότητες που ενισχύονται ή υποβαθμίζονται σε σχέση με το σκυρόδεμα που παράγεται από υψηλής ποιότητας πρωτογενή αδρανή. Επιπρόσθετη δουλειά εστιάζεται στον χαρακτηρισμό των λεπτομερών αδρανών για να προκύψουν προδιαγραφές που συνδέουν την απόδοσή τους μέσα σε προϊόντα από σκυρόδεμα. Ο χαρακτηρισμός περιλαμβάνει ανάλυση του σχήματος των κόκκων, διαβάθμιση των κόκκων και ορυκτολογική σύσταση.

Στις επόμενες παραγράφους συνοψίζονται βασικά σημεία από τις προαναφερθείσες πηγές:

Δοκιμές και ταξινόμηση των λεπτομερών για χρήση στο σκυρόδεμα

Από το 1994 μέχρι σήμερα που διεξάγεται το συνέδριο ICAR, έχει σημειωθεί αύξηση στις ερευνητικές προσπάθειες προκειμένου να βρεθούν τρόποι χαρακτηρισμού, ελέγχου και εκτίμησης των ιδιοτήτων των αδρανών ώστε να μπορούν να προβλεφθούν οι ιδιότητες του σκυροδέματος (ή άλλων προϊόντων) που παρασκευάζονται με συμμετοχή των αδρανών. Πολλές από τις παραπάνω έρευνες αφορούν το κλάσμα που είναι μικρότερο από 75μμ. Ο Hudson (2003) αναφέρει ότι είναι σχεδόν αδύνατο να προβλεφθεί η απόδοση των άμμων σκυροδέματος με τις συνηθισμένες ή τις παραδοσιακές μεθόδους χαρακτηρισμού αυτών των υλικών. Οι επιπτώσεις της ανάμειξης λατομικής άμμου με φυσική άμμο πρέπει να γίνουν πλήρως κατανοητές ώστε η θετική συνεισφορά και των δύο τύπων άμμου να μεγιστοποιηθεί. Τονίζει ότι «η βιομηχανία των αδρανών θα πρέπει να καταλάβει πως λειτουργούν τα προϊόντα της προκειμένου να τα χρησιμοποιήσει στο σκυρόδεμα και να ανταμειφθεί για το προϊόν με αξιόλογες τιμές».

Το ICAR έχει κάνει προσπάθειες να αναπτύξει το πλαίσιο για την ταξινόμηση της χρήσης των λεπτομερών αδρανών στο σκυρόδεμα (ICAR 101-2F). Ο στόχος αυτού του προγράμματος ήταν να εξετάσει τις μεθόδους και τις δοκιμές που χρησιμοποιήθηκαν στο παρελθόν για να χαρακτηρίσουν τις ιδιότητες των λεπτομερών και να αναπτύξουν, σε αρχικά στάδια, ένα πλαίσιο για χαρακτηρισμό και κατηγοριοποίηση των ιδιοτήτων των λεπτομερών αδρανών. Επιπρόσθετα, νέες μέθοδοι και δοκιμές προτάθηκαν που μπορούν να αποτελέσουν έναν οδηγό για τη χρήση των λεπτομερών αδρανών σε σκυροδέματα με τσιμέντο Portland. Ως πιθανές μελλοντικές κατευθύνσεις έρευνας θεωρούνται εφαρμογές όπως το υψηλής απόδοσης σκυρόδεμα και προϊόντα σκυροδέματος χαμηλής αντοχής αλλά με θερμομονωτικές ιδιότητες.

Η ανάπτυξη προτύπων και ταξινόμησης για πρωτογενή υλικά κατασκευών είναι μια σημαντική περιοχή για κατάλληλη έρευνα και θέσπιση νέων προδιαγραφών. Πολύ παλιές ή ξεπερασμένες προδιαγραφές θα πρέπει να αλλάξουν ώστε να επιτραπεί η χρήση των λεγόμενων δευτερογενών υλικών όπου είναι απαραίτητο. Οι ακατάλληλες προδιαγραφές ή πρότυπα αποτελούν σημαντικό πρόβλημα στις ΗΠΑ, και υπάρχουν πολλά άρθρα του συνεδρίου ICAR που σχετίζονται με αυτό το θέμα. Για παράδειγμα, ένα πρόβλημα που προέκυψε είναι ότι οι προδιαγραφές έχουν συνταχθεί για χρήση φυσικής άμμου στο σκυρόδεμα και πλέον χρησιμοποιούνται σε πολλές πολιτείες και για την άμμο από θραυστό πέτρωμα. Στις φυσικές άμμους τα λεπτομερή που εμφανίζονται είναι συνήθως αργιλικά ορυκτά που μειώνουν την αντοχή του σκυροδέματος καθώς περιορίζουν το δεσμό μεταξύ αδρανών και τσιμεντοκονίας (Dukatz, 1995). Έτσι, προέκυψε ο περιορισμός για το ποσοστό των λεπτομερών υλικών που συμμετέχουν στο σκυρόδεμα. Όταν χρησιμοποιείται θραυστή άμμος, τα λεπτομερή δεν είναι κατά βάση αργιλικά. Μια χημική ανάλυση μπορεί να προσδιορίσει το ποσοστό των αργιλικών ορυκτών (π.χ. προσδιορισμός με τη μέθοδο του μπλε του μεθυλενίου).

Ο Dumitru et al. (2001) αναφέρει τα αποτελέσματα της μελέτης μιας εναλλακτικής ή προαιρετικής μεθόδου για την εκτίμηση των λεπτομερών αδρανών στο συνέδριο ICAR του 2001. Το συμπέρασμα που προέκυψε είναι ότι ορυκτολογικές αναλύσεις (όπως η X-ray diffraction) θα πρέπει να χρησιμοποιούνται για να επιβεβαιώσουν τη σύσταση των δευτερογενών ορυκτών και να προσδιορίσουν την ποσότητα των βλαβερών για κάποιες εφαρμογές ορυκτών (ειδικότερα ποσότητες αργιλικών

ορυκτών). Οι ορυκτολογικές αναλύσεις θα πρέπει να είναι μια εναλλακτική μέθοδος ως προς τη μέθοδο του μπλε του μεθυλενίου όταν πρόκειται για ποσοτικό προσδιορισμό αργιλικών ορυκτών σε λεπτομερή αδρανή. Έτσι, είναι δυνατό να διαφοροποιηθούν τα λατομικά λεπτομερή και να αρθεί η ανάγκη για περιορισμό του κλάσματος >75μm σε καλής ποιότητας θραυστή άμμο. Επιπλέον, βγήκε ως συμπέρασμα ότι η δοκιμή με τη μέθοδος κώνου κάθισης (ASTM C1252) θα πρέπει να τροποποιηθεί προκειμένου να αντισταθμιστεί η έλλειψη της μεθόδου, όπου μετρούνται δύο χαρακτηριστικά του υλικού χρησιμοποιώντας μία παράμετρο. Επίσης, προκειμένου να καλυφθεί ένα κενό μεταξύ των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων των λεπτομερών αδρανών και της πραγματικής τους απόδοσης στο σκυρόδεμα, παρουσιάζεται μια δοκιμή που βασίζεται στα κονιάματα ως μια αξιόπιστη και γρήγορη μικρής κλίμακας μέθοδος, για την αξιολόγηση της καταλληλότητας και της σχετικής απόδοσης των διάφορων λεπτομερών αδρανών που θα χρησιμοποιηθούν σε σκυρόδεμα.

Η προσέγγιση του θέματος των λεπτομερών από την πολιτεία της Georgia μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μελέτη αναφοράς.

Το 1997 η πολιτεία της Georgia άρχισε να επιτρέπει τη χρησιμοποίηση υψηλότερου ποσοστού λεπτομερών από θραυστά πετρώματα στην παραγωγή σκυροδέματος με τιμέντο Portland (Watson, 1999).

Η χαλάρωση των προδιαγραφών για τα λεπτομερή στην άμμο σκυροδέματος νιοθετήθηκε μετά από πιέσεις που άσκησε στο Υπουργείο Συγκοινωνιών μια επιτροπή από ερευνητές της βιομηχανίας, ακαδημαϊκούς και πολίτες, επιτροπή που συστήθηκε από την Georgia Crushed Stone Association (Machemal, 1997). Οι χρήσεις των λεπτομερών που προσδιορίστηκαν από την επιτροπή ήταν προσαρμοσμένες στις ανάγκες των παραγωγών αδρανών της Georgia. Αντίστοιχες επιτροπές μπορεί να είναι χρήσιμες οπουδήποτε αλλού. Ιστορικά, προτιμάται η φυσική άμμος λόγω των στρογγυλευμένων σωματιδίων που δίνουν καλύτερη εργασιμότητα. Στις βόρειες περιοχές της Georgia δεν υπάρχουν αποθέματα φυσικής άμμου και το μειωμένο κόστος μεταφοράς καθιστά την θραυστή άμμο ανταγωνιστική επιτρέποντας αυξημένο ποσοστό λεπτομερών για την επίτευξη της εργασιμότητας. Ωστόσο, οι προδιαγραφές της διαβάθμισης είναι ακόμη μη ικανοποιητικές ως δείκτης πρόβλεψης της ποιότητας του σκυροδέματος. Άλλες δοκιμές πρέπει να αναπτυχθούν ώστε να δημιουργηθούν προδιαγραφές που θα βασίζονται στην πραγματική απόδοση.

Πριν το 1997, τα λατομεία που πιστοποιήθηκαν από το αμερικάνικο Υπουργείο Μεταφορών έπρεπε να διατηρούν τη διαβάθμιση σε τιμές 0-7% διερχόμενο από το κόσκινο No100 (150 μμ) και 0-2% διερχόμενο από το κόσκινο No200 (75 μμ). Οι χρήστες έπρεπε να προσθέτουν λεπτομερή προκειμένου να βελτιώσουν την εργασιμότητα και την υφή της τελικής επιφάνειας. Αυτές οι συνήθεις προδιαγραφές για πολύ χαμηλό ποσοστό λεπτομερών κάτω από No200 (75 μμ) στα αδρανή για μίγματα ασφαλτικά και σκυροδέματα και οι αυξημένες απαιτήσεις για θραυστή άμμο σκυροδέματος, έχουν συντελέσει στην αύξηση του ρυθμού παραγωγής των απόβλητων λεπτομερών (Smith and Slaughter, 1996).

Οι προδιαγραφές για τη διαβάθμιση της άμμου σκυροδέματος έγιναν επίσης πιο ελαστικές από το Υπουργείο Μεταφορών της Βόρειας Καρολίνας ως αποτέλεσμα της πίεσης της βιομηχανίας αδρανών (Saunders, 1995).

Χρήση της μεθόδου ανάλυσης εικόνας (image analysis) για τον χαρακτηρισμό των λεπτομερών

Η on-line ανάλυση εικόνας ως μέθοδος χαρακτηρισμού των λεπτομερών κατά τη διάρκεια της παραγωγής έχει αναφερθεί σε αρκετά άρθρα.

Ο Persson (1998) περιγράφει μια τεχνική ανάλυσης εικόνας για την κατανομή του μεγέθους και του σχήματος των κόκκων των λεπτομερών αδρανών, μια πιθανόν χρήσιμη μέθοδο για την ταξινόμηση των λατομικών προϊόντων προκειμένου να προσδιοριστεί η καταλληλότητά τους για διάφορες εφαρμογές όπου το μέγεθος των κόκκων παίζει σημαντικό ρόλο (συμπεριλαμβανομένου του σκυροδέματος). Μια άλλη μέθοδος για την ποσοτικοποίηση του σχήματος των σωματιδίων, της υφής της επιφάνειας και της διαβάθμισης είναι η μέτρηση των κενών του μη συμπιεσμένου υλικού ως δείκη (Marek, 1995).

Ο Masad (2001) παρουσίασε στο συνέδριο ICAR του 2001 μια περίληψη των τεχνικών εικόνας για τον χαρακτηρισμό του σχήματος των αδρανών που χρησιμοποιούνται στα ασφαλτικά μίγματα. Δίνεται έμφαση στο γεγονός ότι οι μοναδικές δυνατότητες των τεχνικών ανάλυσης εικόνας επιτρέπουν την ανάπτυξη χαμηλού κόστους αυτοματοποιημένων συστημάτων για την αποτύπωση του σχήματος μεγάλων ποσοτήτων αδρανών γρήγορα και με ακρίβεια.

Ο Kim et al. (2001) περιγράφει έναν πρότυπο σαρωτή laser για τον χαρακτηρισμό του μεγέθους και του σχήματος των αδρανών στο συνέδριο ICAR του 2001. Το σύστημα σάρωσης αδρανών με (Laser-based Aggregate Scanning System, LASS) αναπτύσσεται στο Πανεπιστήμιο του Τέξας στο Όστιν για τον γρήγορο χαρακτηρισμό διαφόρων ιδιοτήτων των αδρανών για κατασκευές. Το LASS αναμένεται να παρέχει πληροφορίες για διάφορα άλλα χαρακτηριστικά των αδρανών, όπως είναι το κονχώδες των κόκκων και η υφή των σωματιδίων. Η ικανότητα αυτόματης ανάλυσης πολλαπλών χαρακτηριστικών των αδρανών θα συμβάλλει στη παρακολούθηση από τη μεριά των παραγωγών αδρανών υλικών διαφόρων ποιοτικών παραμέτρων των προϊόντων τη στιγμή που παράγονται, ώστε άμεσες επεμβάσεις να μπορούν να διασφαλίσουν καλύτερη ποιότητα.

Ο Garboczi et al. (2001) περιγράφει έναν συνδυασμό τομογραφίας ακτίνων X και τεχνικών ανάλυσης εικόνας, ο οποίος μπορεί να δώσει έναν πλήρη 3-D μαθηματικό χαρακτηρισμό ενός σωματιδίου αδρανούς. Η μαθηματική σχέση που προκύπτει για το πραγματικό σωματίδιο επιτρέπει τη συμμετοχή του σωματιδίου σε διάφορους αλγορίθμους, επιτρέποντας στο πραγματικό σχήμα του σωματιδίου να συμμετέχει σε μοντέλα όπου πριν μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν μόνο απλά σχήματα, όπως σφαίρες και ελλειψοειδή. Επίσης, η μέθοδος αυτή θα επιτρέψει να εκτιμηθεί με πολύ καλή ακρίβεια η ρεολογική συμπεριφορά, καταλήγοντας σε ένα πολύ χρήσιμο υπολογιστικό εργαλείο για το σκυρόδεμα. Θα μπορούν να κατασκευαστούν βάσεις δεδομένων με τρισδιάστατα σχήματα αδρανών που θα χαρακτηρίζουν διάφορες πηγές αδρανών.

Ο Fletcher et al. (2002) περιγράφει τον σχεδιασμό και την ανάπτυξη ενός συστήματος εικόνων για αδρανή που θα χαρακτηρίζει ιδιότητες ως προς το σχήμα τόσο λεπτομερών όσο και αδρόκοκκων αδρανών (AIMS). Το σύστημα αναπτύχθηκε ώστε να έχει τη δυνατότητα να συλλαμβάνει εικόνες και να αναλύει το σχήμα ενός μεγάλου εύρους μεγέθους αδρανών, που καλύπτει εκείνα που χρησιμοποιούνται σε ασφαλτοσκυροδέματα, σε σκυρόδεμα με τσιμέντο Portland και σε ασύνδετα υλικά που χρησιμοποιούνται σε δαπεδοστρώσεις.

Ιδιότητες σκυροδέματος στο οποίο χρησιμοποιούνται λατομικά λεπτομερή υλικά

Οι Ahn et al. (2001) και Ahn and Fowler (2002) διεξήγαγαν μια μελέτη πάνω στις επιδράσεις υψηλών ποσοτήτων κλασμάτων λεπτομερών σε σκυρόδεμα με τσιμέντο Portland και με κονίαμα. Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 50 δείγματα άμμου στη μελέτη των κονιαμάτων, ενώ 10 από αυτά συμπεριλήφθηκαν στη μελέτη του σκυροδέματος.

Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης οδήγησαν στα εξής συμπεράσματα:

- Η αντοχή σε θλίψη των κονιαμάτων μπορεί να μειωθεί καθώς η τιμή MBV (methylene blue value) αυξάνεται. Καθώς η συγκέντρωση των λεπτομερών αυξάνεται στο κλάσμα κάτω από 75μμ, η αντοχή σε θλίψη μειώνεται ελαφρώς.
- Η συρρίκνωση των κονιαμάτων κατά την ξήρανση έδειξε μια παρόμοια τάση για συσχετισμό μεταξύ των αποτελεσμάτων των δοκιμών όπως και η αντοχή σε θλίψη. Η συρρίκνωση κατά την ξήρανση αυξάνεται καθώς η τιμή MMBV (modified methylene blue value) αυξάνεται. Καθώς αυξάνεται το περιεχόμενο σε - 75μμ μπορεί να αυξηθεί ελαφρώς και η συρρίκνωση ξήρανσης. Επιπλέον, η συρρίκνωση ξήρανσης αυξάνεται ελαφρώς καθώς αυξάνεται η ικανότητα απορρόφησης.
- Συγκρινόμενο με σκυρόδεμα παρασκευασμένο από φυσική άμμο, το σκυρόδεμα με υπερλεπτομερή υλικά εμφανίζει τα εξής:
 - υψηλότερη αντοχή σε κάμψη
 - βελτιωμένη αντίσταση τριβής
 - υψηλότερη πυκνότητα, και
 - χαμηλότερη υδατοπερατότητα (πολύ σημαντικό για τη μείωση της διάβρωσης)

Πολύ καλής ποιότητας σκυρόδεμα παρασκευάστηκε με τεχνητά λεπτομερή (manufactured fines) σε ποσοστό έως 17%. Στη συγκεκριμένη μελέτη δεν χρησιμοποιήθηκαν άλλα πρόσθετα.

Ο Crouch et al. (2003) μελέτησε την επίδραση αδρανών λεπτομερών σε ελεγχόμενης χαμηλής αντοχής πληρωτικά υλικά (CLSM). Δημιουργήθηκε ένα υλικό με υψηλή ρευστότητα, γρήγορη εφαρμογή, χωρίς να τρίβεται, με ελεγχόμενη χαμηλή αντοχή για εφαρμογές όπου ο παράγοντας του χρόνου είναι κρίσιμος.

Βρέθηκε ότι αυτός ο τύπος υλικού CLSM μπορεί να παρασκευαστεί με μια μεγάλη ποικιλία λεπτομερών αδρανών από το Tennessee. Ιδιότητες λεπτομερών αδρανών,

όπως η διαβάθμιση και το κονχώδες, υποδεικνύουν τις αναλογίες που θα χρησιμοποιηθούν στο μίγμα ώστε να επιτευχθεί η απαραίτητη ροή και το απαιτούμενο ποσοστό περιεχόμενου αέρα, κι έτσι, έμμεσα, να επηρεαστεί ο χρόνος εφαρμογής και η αναπτυσσόμενη θλιπτική αντοχή.

Έπειτα από μια μεγάλη μελέτη για τη χρήση των λεπτομερών στο σκυρόδεμα, δημιουργήθηκε από το ICAR μια περίληψη για τα χαρακτηριστικά των λεπτομερών αδρανών που επηρεάζουν τις ιδιότητες των κονιαμάτων και του σκυροδέματος μαζί με τη συσχέτιση που εκτιμήθηκε μεταξύ των ιδιοτήτων αυτών και την επίδραση της υψηλής αναλογίας των λεπτομερών (ICAR 102-F).

Άλλες μελέτες που διεξήχθησαν από το ICAR ερευνούν τη χρήση σκυροδέματος με υπερλεπτομερή σε εργασίες μόνωσης (ICAR 103), ενώ χρησιμοποιήθηκε ένα μεγάλο εύρος δοκιμών για τη μέτρηση της εργασιμότητας του σκυροδέματος (ICAR 105-1).

Μια σειρά άρθρων πάνω στα λεπτομερή δημοσιεύθηκε στο αμερικανικό περιοδικό «Pit and Quarry» (Hudson, 2001) με την ακόλουθη επιχειρηματολογία: "Τα αδρανή αποτελούν το 80% του όγκου του σκυροδέματος, ωστόσο, οι παραγωγοί αδρανών γνωρίζουν πολύ λίγα για τον τρόπο με τον οποίο τα αδρανή επηρεάζουν το σκυρόδεμα των πελατών τους – είτε θετικά είτε αρνητικά. Μόνο αν γίνει κατανοητό πως δρουν τα αδρανή μέσα στο σκυρόδεμα, θα μπορέσουν οι παραγωγοί να κερδίσουν την αξία που αναλογεί στα προϊόντα αδρανών και να ξεκινήσουν να χρησιμοποιούν και άλλα υλικά που τώρα χαρακτηρίζονται ως παραπροϊόντα ή απόβλητα».

Ο Ho et al. (2002) έλεγξε το αυτό-συμπυκνούμενο σκυρόδεμα που παράγεται από λατομική σκόνη (γρανίτης, <0.250mm) αντικαθιστώντας την ασβεστολιθική παιπάλη ως filler. Το μίγμα του σκυροδέματος μπορεί να απαιτεί μεγαλύτερη δόση υπερ-πλαστικοποιητή εάν η λατομική σκόνη χρησιμοποιείται ως έχει από τον προμηθευτή, επειδή το μεγάλο εύρος στην κατανομή του μεγέθους των σωματιδίων επηρεάζει αντίστροφα τις ιδιότητες ροής. Διαφορετικά, οι ρεολογικές ιδιότητες του σκυροδέματος με λατομική σκόνη είναι συγκρίσιμες με εκείνες του παραδοσιακού σκυροδέματος με ασβεστολιθική παιπάλη. Μια άλλη μελέτη (Felekoglu and Baradan, 2003) ερεύνησε τη δυνατότητα αντικατάστασης του τσιμέντου στο σκυρόδεμα με ασβεστολιθική παιπάλη προκειμένου να βελτιωθούν ιδιότητες όπως η δυνατότητα

αυτοεπιπέδωσης και αυτοσυμπύκνωσης. Αντικατάσταση του 10% του τσιμέντου με ασβεστολιθική παιπάλη έδειξε ότι οδηγεί στη βέλτιστη απόδοση.

Έρευνα του Tennessee Technological University Department of Civil Engineering σε συνεργασία με το Rogers Group Inc., έδειξε ότι τα ασβεστολιθικά υπόλοιπα της κοσκίνισης που περιέχουν μέχρι 21% κλάσμα λεπτότερο των 75 μικρών μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αδρανές για την παραγωγή ενός μίγματος πληρωτικού με καλή ροή που ανταποκρίνεται στις προδιαγραφές του National Ready-Mix Concrete Association (Crouch and Gamble, 1997). Αυτό το καλής ροής πληρωτικό είναι επίσης γνωστό ως Controlled Low-Strength Material (CLSM). Το σωστό περιεχόμενο αέρα (14-30%) σε ένα καλά σχεδιασμένο μίγμα περιόρισε την αντοχή, δημιουργησε κατάλληλη ροή, περιόρισε τον διαχωρισμό, και μείωσε δραστικά την απόμειξη παράγοντας ένα συνεκτικό ομοιογενές μίγμα. Τα πληρωτικά μίγματα καλής ροής που περιέχουν ασβεστολιθικά λεπτομερή μπορεί να είναι οικονομικά ελκυστικά όταν άλλα αδρανή είναι ακριβά - όπως στην περίπτωση όπου η άμμος ποταμών είναι ακριβή ή δύσκολη στη λήψη.

Ο Topcu et al. (2003) αναφέρει δοκιμές στις ιδιότητες του σκυροδέματος που παράγεται με ορυκτά πληρωτικά (ασβεστολιθικής προέλευσης, με μέγεθος κόκκων <2mm) να αντικαθιστούν εν μέρει την άμμο (η σύσταση δεν προσδιορίζεται αλλά πιθανότατα είναι χαλαζιακή). Βελτιώσεις προέκυψαν τόσο στην θλιπτική αντοχή όσο και στην αντοχή στην κάμψη. Η διαπερατότητα, η απορρόφηση και το πορώδες μειώθηκαν. Αυτές οι βελτιώσεις παρατηρήθηκαν για πληρωτικό από 7-10%, ενώ μεγαλύτερο ποσοστό δεν οδήγησε σε αλλαγές ή αρνητική επίδραση. Παρόμοια μελέτη διεξήχθη από τους Çelik and Marar (1996). Χρησιμοποίησαν παιπάλη από πετρώματα (ασβεστόλιθο, <75 mm) για να αντικαταστήσουν άμμο σε σκυρόδεμα σε αναλογία έως 30% με όλα τα υπόλοιπα συστατικά και τις αναλογίες σταθερές. Μέτρησαν τις ακόλουθες μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος ενώ ήταν φρέσκο και μετά τη σκλήρυνση: κάθιση, περιεχόμενο αέρα, αντοχή σε θλίψη, σε κάμψη, σε αντίσταση κρούσης, απορρόφηση, υδατοπερατότητα και συρρίκνωση κατά την ξήρανση. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν ήταν τα εξής:

- 1) η κάθιση μειώθηκε καθώς το ποσοστό της παιπάλης αυξήθηκε,
- 2) ο περιεχόμενος αέρας του νωπού σκυροδέματος μειώθηκε καθώς το ποσοστό της περιεχόμενης παιπάλης αυξήθηκε,

- 3) αύξηση της παιπάλης μέχρι 10% βελτίωσε την αντοχή σε θλίψη του σκυροδέματος. Αύξηση πάνω από 10% συσχετίστηκε με βαθμιαία ελάττωση της αντοχής,
- 4) αύξηση της παιπάλης μέχρι 10% βελτίωσε την αντοχή σε κάμψη του σκυροδέματος. Όπως συνέβη και με την αντοχή σε θλίψη, μεγαλύτερο ποσοστό παιπάλης προκαλεί βαθμιαία μείωση της αντοχής σε κάμψη,
- 5) το σκυρόδεμα, όπου χρησιμοποιήθηκε μέχρι 5% παιπάλη, παρουσίασε βελτιωμένη αντίσταση κρούσης. Μεγαλύτερο ποσοστό οδήγησε σε σημαντική ελάττωση της ιδιότητας αυτής,
- 6) η ελάχιστη τιμή απορρόφησης παρατηρήθηκε όταν το περιεχόμενο παιπάλης ανήλθε στο 15%, ενώ μεγαλύτερο ποσοστό αύξησε την απορρόφηση του σκυροδέματος,
- 7) η υδατοπερατότητα του σκυροδέματος μειώθηκε με την αύξηση του ποσοστού παιπάλης,
- 8) στη συρρίκνωση κατά την ξήρανση παρατηρήθηκε αύξηση κατά την αύξηση της παιπάλης έως 10%. Όταν η παιπάλη ξεπέρασε το 10% η συρρίκνωση κατά την ξήρανση μειώθηκε, κάτι που μπορεί να συσχετιστεί με την αντοχή σε θλίψη, καθώς όσο μεγαλύτερη είναι η αντοχή του σκυροδέματος, τόσο υψηλότερη είναι η συρρίκνωση ξήρανσης που παρουσιάζεται.

Παρόμοια πειράματα ως προς τα πλεονεκτήματα των λεπτομερών κατά τη χρήση τους στο σκυρόδεμα, παρουσιάστηκαν σε αρκετά άρθρα σε συνέδρια του ICAR, όπου έμφαση δίνεται στο σκυρόδεμα από θραυστή και όχι από φυσική άμμο. Όλες οι μελέτες συμπεραίνουν ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν περισσότερα λεπτομερή από όσα τυπικά επιτρέπονται (στις ΗΠΑ). Παρόλα αυτά, το ακριβές ποσοστό εξαρτάται από την τελική χρήση και τις ιδιότητες των λεπτομερών (Fowler, 1997). Τα ποσοστά που αναφέρθηκαν κυμαίνονται από 5% (Jackson and Brown, 1996) μέχρι 15% (Fowler and Constantino, 1997; Ahn and Fowler, 1999). Από άλλη μελέτη προέκυψε ότι μείωση του τσιμέντου στο σκυρόδεμα κατά 25% χρησιμοποιώντας αντίστοιχα λεπτομερή θα μπορούσε να λάβει χώρα διατηρώντας την αντοχή των 28 ημερών στα ίδια επίπεδα (Fowler, 1995).

Οι Singh and Majumdar (1981) μελέτησαν τις ιδιότητες αντοχής του υαλο – ενισχυμένου σκυροδέματος (glass-reinforced concrete, grc) που παρασκευάζεται με

40% κ.β. λατομικά λεπτομερή ως πληρωτικό και 5.45% κ.β. υαλονήματα. Τα λεπτομερή περιέχουν χαλαζία, αστρίους και αργιλικά ορυκτά. Δρουν ως διαλύτες κι έτσι ελαττώνουν την αρχική αντοχή του σκυροδέματος, αλλά με την πάροδο του χρόνου η αντοχή δεν διαφέρει από εκείνη του πρότυπου grc – στην πραγματικότητα μπορεί να είναι και μεγαλύτερη. Βελτιώνοντας τις συνθήκες συντήρησης μπορεί να βελτιωθεί η αρχική μείωση της αντοχής.

Ο Nataraja et al. (2001) αναφέρει μια μέθοδο παραγωγής σκυροδέματος της απαιτούμενης αντοχής μετρώντας την χαρακτηριστική αντοχή των αδρανών που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν (χρησιμοποιήθηκαν απόβλητα από λατομείο μαρμάρου). Η αναλογία τσιμέντου / νερού μπορεί να υπολογιστεί έτσι ώστε να παρέχεται η απαιτούμενη επιπλέον αντοχή που προσδίδει το τσιμεντοκονίαμα.

Στοιχεία για έρευνα σε εμπορικό επίπεδο και ανάπτυξη της χρήσης των λεπτομερών στο σκυρόδεμα και σε προϊόντα σχετικά με το σκυρόδεμα δεν είναι ευρέως διαθέσιμα, πιθανόν λόγω της οικονομικής ευαισθησίας του θέματος και όχι λόγω έλλειψης στοιχείων. Παράδειγμα ενός καινοτόμου προϊόντος της οικογένειας του σκυροδέματος που παράγεται από λεπτομερή υλικά είναι το έρμα από τον Αμερικάνο παραγωγό Lafarge (Lafarge, 2004): "το Ballast-Crete ® έγινε η πρώτη για υλικό έρματος στους ναυπηγούς μηχανικούς σε ολόκληρο τον κόσμο. Η ανώτερη απόδοσή του κάτω από ιδιαίτερα απαιτητικές συνθήκες μαζί με το εξειδικευμένο τεχνικό προσωπικό του Lafarge μας επέτρεψαν να βρούμε απαντήσεις για κάθε θέμα που αφορά στη σταθερότητα."

1.2.7 Λεπτομερή για παραγωγή συνθετικών και ελαφροβαρών αδρανών

Μεταξύ των θεμάτων που παρουσιάζουν ενδιαφέρον στη χρήση των λατομικών λεπτομερών είναι η επίδραση της κατανομής του μεγέθους των κόκκων και η υπερβολική λεπτότητα των σωματιδίων. Αυτά τα προβλήματα μπορούν να αντιμετωπιστούν αν τα λεπτομερή ενωθούν με κάποιο συνδετικό ώστε να σχηματίσουν τεχνητά σωματίδια μεγαλύτερου μεγέθους και πιο ομοιόμορφα. Η διαδικασία μπορεί να βελτιστοποιηθεί για την παραγωγή ελαφροβαρών αδρανών, που εναλλακτικά παράγονται από σχετικά σπάνιες πρώτες ύλες όπως η κίσσηρις.

Για παράδειγμα, ο Wainwright et al. (2002) αναφέρει το πώς γρανιτικά λατομικά λεπτομερή αλέθονται με χαρτοπολτό, άργιλο ή ίζηματα από εκβαθύνσεις λιμανιών και στη συνέχεια εξωθούνται πυρωμένα σε έναν ειδικά σχεδιασμένο περιστροφικό

κλίβανο. Δύο από τα αδρανή που παράγονται κατά αυτό τον τρόπο δοκιμάστηκαν σε σκυρόδεμα δίνοντας αποτελέσματα αρκετά συγκρίσιμα με εκείνα που προκύπτουν από χρήση φυσικών και άλλων τεχνητών ελαφροβαρών αδρανών. Στο Leeds University υπάρχουν δύο περιστροφικοί κλίβανοι, όπου διεξάχθηκε η έρευνα, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν από επιχειρήσεις για τη διεξαγωγή δοκιμών και μελέτες σκοπιμότητας (Manning, 2004) έχοντας στη διάθεσή τους για συμβουλές εξειδικευμένα μέλη του προσωπικού. Ένας εργαστηριακός κλίβανος χωρητικότητας 2 – 3 λίτρων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μικρής κλίμακας μελέτες σκοπιμότητας, ενώ ένας εργαστηριακός κλίβανος χωρητικότητας 40–50 λίτρα επιτρέπει τη διεξαγωγή δοκιμών πολύ μεγαλύτερης κλίμακας. Τα αδρανή που παρασκευάστηκαν από τον εργαστηριακό κλίβανο υπάρχουν σε μεγάλους όγκους προκειμένου να μελετηθούν ως προς τη συνέχεια και την επαναληψιμότητά τους.

Μια άλλη διαδικασία με περιστροφικό κλίβανο για την παραγωγή ελαφροβαρών αδρανών περιγράφεται από τους Weinecke and Faulkner (2002). Ιπτάμενη τέφρα, τέφρα πυθμένα, λεπτομερή απόβλητα, σκωρία κ.ά. αναμιγνύονται με συνδετικό από μπεντονιτική άργιλο (2 – 3 % κ.β.). Το μίγμα πυρώνεται σε περιστροφικό κλίβανο και το προϊόν κοσκινίζεται για να ταξινομηθεί κατά μέγεθος. Η διαδικασία σχηματισμού των ελαφροβαρών αδρανών βασίζεται στην ικανότητα του υλικού να διαστέλλεται ('bloat') όταν θερμαίνεται σε περιστροφικό κλίβανο. Έτσι, η χημική σύσταση των αποβλήτων θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε να μπορούν να διασταλλούν ή να χρησιμοποιηθούν πρόσθετα. Ωστόσο, το συγκεκριμένο άρθρο (Weinecke and Faulkner, 2002) δεν είναι πολύ συγκεκριμένο ως προς τη χημική σύσταση των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν.

Υπάρχει επίσης μια μελέτη (που κατέληξε σε δίπλωμα ευρεσιτεχνίας) που έγινε στις ΗΠΑ (Frye, 1994) για μια παρόμοια μέθοδο παραγωγής ελαφροβαρών αδρανών όπου θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν λατομικά λεπτομερή ως πρώτη ύλη (αν και αυτό δεν προσδιορίζεται ακριβώς στη μελέτη/ευρεσιτεχνία). Η πατέντα είναι για ελαφροβαρή αδρανή σε μορφή micropellets που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αντικατάσταση της άμμου στο τσιμέντο, στο σκυρόδεμα κλπ. Τα pellets παράγονται με ανάμιξη κεραμικής αργίλου, υγρά και απόβλητα υλικά (όπως τα λατομικά λεπτομερή) σε υψηλής ταχύτητας αναδευτήρα και έψηση στους 2000°F (1100°C).

Ένα λατομείο στις ΗΠΑ, μέσω της ιστοσελίδας που διαθέτει ([www Rogers Group, 2004](http://www.RogersGroup.com)), ισχυρίζεται ότι στις εγκαταστάσεις του κατασκευάζονται άμμος και μεγαλύτερης κοκκομετρίας τεμάχια (3/8") από τα λεπτομερή του, χωρίς όμως να παρέχει λεπτομέρειες για τη διαδικασία. Αναμιγνύουν την παρασκευασμένη άμμο και τα τεμαχίδια με εμπορικά αδρανή από πετρώματα ώστε να μειωθεί η σκόνη και να γίνουν πιο εύκολα στον χειρισμό, ενώ παράλληλα μειώνουν τους σωρούς με τα λεπτομερή τους.

1.2.8 Λεπτομερή που χρησιμοποιούνται ως αδρανή σε τούβλα και άλλα δομικά στοιχεία (block)

Παράδειγμα επιχειρηματικού σχεδίου για εγκαταστάσεις παραγωγής τούβλων στην Ινδία (όπου η ζήτηση για τούβλα είναι πολύ μεγάλη) εκδόθηκε σε ιστοσελίδα ([www India, 2004](http://www.IndiaQuarry.com)) του Ινδικού υπουργείου εμπορίου και βιομηχανίας. Αποτελεί μέρος μιας πρωτοβουλίας ανάπτυξης με κρατική επιχορήγηση. Τα τούβλα παρασκευάζονται από ανάμιξη λατομικής παιπάλης, άσβεστου και γύψου, πιέζονται σε μήτρες και ξηραίνονται στον αέρα.

Άλλη περίπτωση είναι σε λατομείο της Νότιας Αφρικής (South African Peak Quarry, 1998) – όπως στην Ινδία, υπάρχει ουσιαστική ζήτηση για τούβλα και αυτό το λατομείο μπορεί να πουλάει τα λεπτομερή απόβλητα ως πρώτη ύλη σε κοντινό εργοστάσιο παρασκευής τούβλων. “Το λατομείο Peak είναι το μεγαλύτερο του είδους του στην Αφρική με 1.1 εκατ. τόνους το χρόνο υλικό για την παραγωγή αδρανών για οικοδόμηση και κατασκευές και παιπάλη για τούβλα και block. Δεν υπάρχει πλέον σωρός από λεπτομερή καθώς η αγορά των τούβλων συνεχίζει να επεκτείνεται με τις κατασκευές στην περιοχή.”

Τα τούβλα μπορούν να παραχθούν χωρίς έψηση εάν η ωρίμανση μπορεί να προκληθεί με χημική αντίδραση, σχηματίζοντας τα λεγόμενα non-sinter chemical (NSC) bricks. Αυτά τα τούβλα μπορούν να μειώσουν το κόστος καθώς το κόστος για την έψηση μπορεί να είναι μεγαλύτερο από ότι το κόστος για τα χημικά. Παράδειγμα εταιρείας που παράγει αυτό τον τύπο τούβλων είναι η Goldwell (Manning, 2004). Τα τούβλα παρασκευάζονται από λεπτομερή με εύρος μεγέθους κόκκων <5 mm και οι προδιαγραφές τους είναι ίδιες με εκείνες των συμβατικών τούβλων.

Μια άλλη μέθοδος παρασκευής τούβλων ή blocks είναι με ταυτόχρονη δόνηση και συμπύκνωση. Η εταιρεία με το όνομα Resonant Shock Compaction, LLC, πουλάει

μια συσκευή για την παραγωγή blocks από λατομικά λεπτομερή (www Resonant Shock Compaction, 2004). Χρησιμοποιείται μια έντονη διαδικασία δόνησης-συμπύκνωσης κατά την οποία ένα μίγμα γωνιωδών υλικών και συνδετικών τοποθετούνται σε καλούπι και συμπιέζονται για 2-5 δευτερόλεπτα. Τα blocks μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως blocks και πάνελ σε τοίχους κτιρίων, για την παραγωγή ελαφροβαρών αδρανών (τα blocks θραύσονται για την παραγωγή αδρανών), σε προστατευτικούς τοίχους αυτοκινητοδρόμων, διαχωριστικούς τοίχους και τοίχους ασφαλείας, σε τοίχους αντιστήριξης, σε blocks πεζοδρομίων και τμήματα οροφής. Η έρευνα, η ανάπτυξη και η επίδειξη εφαρμογής (demonstration facilities) έγιναν στο Πανεπιστήμιο του Denver, στο Εργαστήριο Περιβαλλοντικών Υλικών. Η τεχνολογία της Resonant Shock Compaction έχει αδειοδοτηθεί για χρήση σε ΗΠΑ, Ιαπωνία και Ινδία.

Υπάρχει επίσης μια πατέντα στις ΗΠΑ (Weyland et al. 2000) που προστατεύει μια μέθοδο παρασκευής οικοδομικών blocks από λεπτόκοκκα πυριτικά υλικά όπως τα λεπτομερή από ορυκτά πετρώματα. Τα λεπτομερή συνδυάζονται με ασβεστιτικά πρόσθετα και νερό και ωριμάζουν υπό την επίδραση ελεγχόμενης πίεσης και θερμοκρασίας για προκαθορισμένο χρονικό διάστημα. Ως τελικό προϊόν παράγονται μορφοποιημένα, υψηλής αντοχής οικοδομικά blocks με ακριβείς διαστάσεις και επιθυμητές ιδιότητες.

Στο συνέδριο του ICAR το 1998, παρουσιάστηκε ένα άρθρο από τον αντιπρόσωπο της AAB Building System Inc., παραγωγό θερμομονωτικών προϊόντων από σκυρόδεμα (Insulating Concrete Forms ή ICF). Αναφέρθηκε συνδυασμένη έρευνα με το ICAR στο Texas A&M University για αύξηση των λεπτομερών στο ICFs (Sculthorpe, 1998). Η τεχνολογία ICF απευθύνεται κυρίως στο χώρο των οικοδομών στις ΗΠΑ όπου τα σπίτια από ICF εξοικονομούν μέχρι 44% για θέρμανση και 32% για ψύξη (περίπου US\$310 ανά σπίτι το χρόνο).

Οι Wilding and Sayer (2002) περιγράφουν πως μια υδατική πάστα από γρανιτικά λεπτομερή, σταθεροποιημένη με 5% τσιμέντο και 5% ιπτάμενη τέφρα άνθρακα που ωριμάζει για 90 ημέρες χρησιμοποιήθηκε για να παραχθούν τεχνητά δομικά στοιχεία (reef blocks). Τα blocks αυτά ξεπερνούν σε αντοχή τις προδιαγραφές των εμπορικών blocks κτιρίων κατά πέντε φορές, ενώ οι δοκιμές έκπλυνσης μετάλλων που τους έγιναν έδειξαν ότι υπάρχει απόπλυνση μετάλλων αλλά χαμηλή. Κρίθηκαν ανθεκτικά και

περιβαλλοντικά ασφαλή, ενώ ταυτόχρονα είναι πιο φθηνά στην παραγωγή τους συγκρινόμενα με τα τυπικά εμπορικά δομικά στοιχεία.

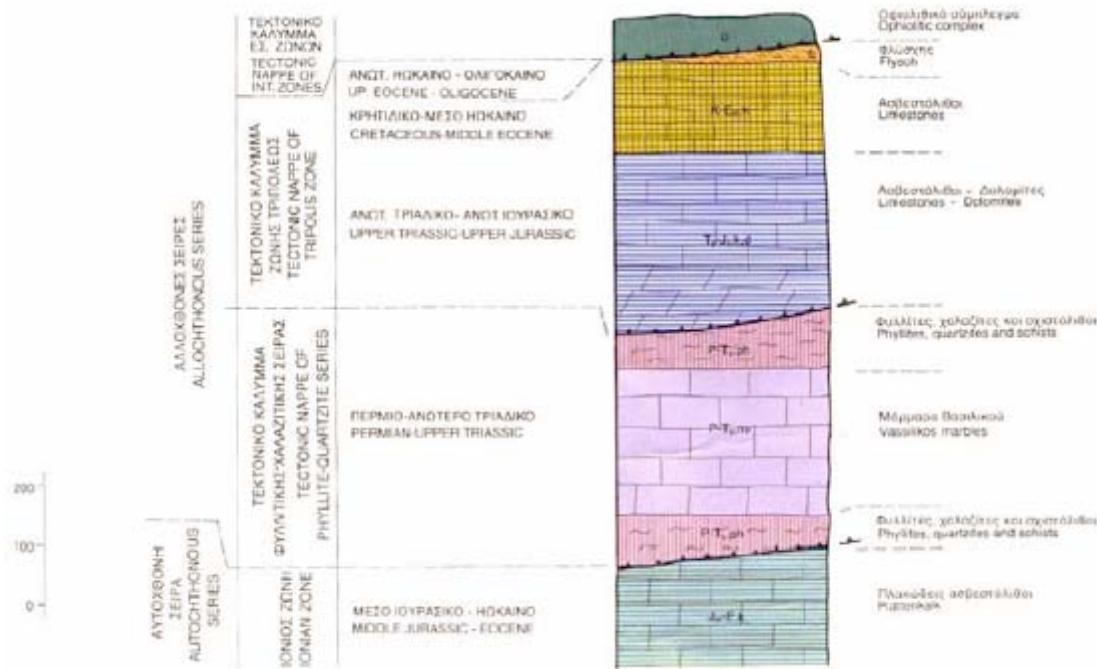
2. ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ ΚΑΙ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΠΡΩΤΗΣ ΥΛΗΣ

2.1 Εισαγωγή

Η παρούσα εργασία είχε σαν αντικείμενο ανάλυσης (case study) την επιχείρηση παραγωγής και πώλησης ετοίμου σκυροδέματος (ready mix) και ασφαλτομίγματος «ΑΣΦΑΛΤΙΚΗ Α.Τ.Ε.» η οποία έχει έδρα παραγωγής της την Βιομηχανική Περιοχή (ΒΙΠΕ) Ηρακλείου.

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται ασβεστολιθική παιπάλη που προέρχεται από λατομείο αδρανών υλικών που βρίσκεται στην περιοχή Γούβες στο νομό Ηρακλείου. Το λατομείο αυτό τροφοδοτεί με αδρανή υλικά τέσσερις εταιρείες παραγωγής σκυροδέματος και ασφαλτομίγματος στην Βιομηχανική Περιοχή Ηρακλείου. Μια από τις εταιρείες αυτές είναι και η Ασφαλτική ΑΤΕ, η οποία διαθέτει συγκρότημα παραγωγής σκυροδέματος στη ΒΙΠΕ Ηρακλείου και μονάδα παραγωγής ασφαλτομίγματος εντός του λατομείου αδρανών στις Γούβες. Η εταιρεία αυτή καλείται να απομακρύνει την παιπάλη από τα αδρανή με τα οποία την τροφοδοτεί το λατομείο, καθώς η συγκέντρωσή της στο κλάσμα των χαλικιών και της ψηφίδας υπερβαίνει τα όρια των προδιαγραφών για το σκυρόδεμα και για το ασφαλτοσκυρόδεμα.

Ο σχηματισμός απ' όπου εξορύσσεται ο ασβεστόλιθος αποτελείται από: ασβεστόλιθους, δολομιτικούς ασβεστόλιθους και δολομίτες που αποτελούν τη βάση του τεκτονικού καλύμματος των εξωτερικών ζωνών, με αποτέλεσμα στη βάση τους να είναι κατά θέσεις μυλωνιτιωμένοι λόγω τεκτονισμού. Τα κατώτερα μέλη τους αποτελούνται από ημικρυσταλλικούς δολομίτες, παχυστρωματώδεις μέχρι άστρωτους, τεφρόμαυρους, ενώ τα ανώτερα μεταπίπτουν σε ασβεστόλιθους και δολομιτικούς ασβεστόλιθους, μεσοστρωματώδεις, τεφρόλευκους μέχρι τεφρόμαυρους. Στο σύνολό τους είναι καρστικοί, κυρίως στα ανώτερα μέλη. Το μέγιστο πάχος τους ανέρχεται περίπου στα 300m. Στο Σχήμα 2.1 παρουσιάζεται η στρωματογραφική στήλη των αλπικών σχηματισμών, όπου απαντώνται οι συγκεκριμένοι ασβεστόλιθοι.



Σχήμα 2.1: Στρωματογραφική στήλη αλπικών σχηματισμών (ΙΓΜΕ - φύλλο Ηράκλειο κλίμακα 1:50.000).

Η ποσότητα της παιπάλης δημιουργείται τόσο από το συγκρότημα παραγωγής σκυροδέματος όσο και από τη μονάδα παραγωγής ασφαλτομίγματος. Στην πρώτη περίπτωση η συγκέντρωση του λεπτομερούς ασβεστολιθικού υλικού οφείλεται στον καθαρισμό των χαλικιών με πεπιεσμένο αέρα κατά τη διέλευσή τους από ταινιοζυγό. Έτσι το λεπτομερές υλικό απάγεται από τον αέρα και παγιδεύεται σε κυκλώνες και σακκόφιλτρα. Τα σακκόφιλτρα, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.2, είναι επιμήκεις σάκοι από ύφασμα που τοποθετούνται κατακόρυφα και ανάστροφα μέσα σε μεγάλους θαλάμους, αναρτώμενοι από την οροφή. Το δάπεδο των θαλάμων είναι κλειστό και στο κάτω μέρος του υπάρχει ένας κώνος από όπου τροφοδοτείται το ρεύμα του αέρα με τα αιωρούμενα στερεά που μη βρίσκοντας άλλη διέξοδο εισέρχεται στους σάκους από τις οπές του πυθμένα. Ο θάλαμος με τους σάκους βρίσκεται υπό κενό και έτσι ο αέρας διέρχεται από αυτούς εναποθέτοντας τη σκόνη στα εσωτερικά τους τοιχώματα.

Περιοδικά η λειτουργία διακόπτεται και η σκόνη που συγκρατείται από τους σάκους πέφτει στον κώνο, απ' όπου απάγεται με μεταφορικούς κοχλίες. Η αποκόλληση της σκόνης από τους σάκους υποβοηθείται είτε με δόνηση των σάκων είτε με δημιουργία αντίθετου ρεύματος αέρα. Στην δεύτερη περίπτωση η απαγωγή της παιπάλης γίνεται

στον κυλινδρικό περιστροφικό κλίβανο θέρμανσης των αδρανών από τα απαέρια του καυστήρα ενώ τελικοί συλλέκτες είναι και πάλι κυκλώνες και σακκόφιλτρα.



Σχήμα 2.2: Συλλογή της παιπάλης με τη χρήση σακκόφιλτρων.

Το επόμενο στάδιο είναι η μεταφορά της παιπάλης από τα σακκόφιλτρα σε ένα χώρο που είναι υπό κλίση, έτσι ώστε να διαβραχεί με νερό και σε μορφή πολφού πλέον να μεταφερθεί εύκολα με τη χρήση φορτωτή στο τελικό χώρο απόθεσης. Το πρόβλημα των λεπτομερών εξακολουθεί να υφίσταται αφού με την πάροδο του χρόνου ο πολφός χάνει την υγρασία του και μένει η λεπτόκοκκη σκόνη η οποία παρασύρεται εύκολα με τον αέρα και μπορεί να φτάσει σε μεγάλες αποστάσεις προκαλώντας πολλά προβλήματα. Παρά τα μέτρα που λαμβάνει η εταιρεία, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.3 ολόκληρος ο χώρος του συγκροτήματος είναι καλυμμένος από ένα παχύ στρώμα παιπάλης.



Σχήμα 2.3: Στρώμα παιπάλης στο χώρο του συγκροτήματος.

Η ετήσια ποσότητα παιπάλης που συλλέγει και αποθέτει η εταιρεία Ασφαλτική ΑΕ ανέρχεται σε 10.000 τόνους. Επομένως η συνολική ποσότητα παιπάλης που συγκεντρώνεται και από τις τέσσερις εταιρείες παραγωγής σκυροδέματος και ασφαλτομίγματος που εδρεύουν στην βιομηχανική περιοχή του Ηρακλείου και έχουν παραπλήσιες παραγωγικές ικανότητες, ανέρχεται περίπου στους 40.000-50.000 τόνους ετησίως. Οπότε είναι προφανές ότι εκτός από τα περιβαλλοντικά προβλήματα που δημιουργούνται, μια μεγάλη ποσότητα ασβεστολιθικού υλικού παραμένει ανεκμετάλλευτη.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, έλαβε χώρα δειγματοληψία του λεπτομερούς παραπροϊόντος, εργαστηριακές δοκιμές προσδιορισμού των φυσικομηχανικών της χαρακτηριστικών καθώς και αξιολόγηση των μετρήσεων. Στόχος των παραπάνω αναλυτικών εργασιών είναι οι ακριβείς γνώσεις για την φύση του υλικού, μέσα από τις οποίες είναι δυνατόν να προκύψουν προτάσεις για τη βελτίωση του υπάρχοντος συστήματος απαγωγής, συλλογής και απόθεσης της παιπάλης.

2.2 Δειγματοληψία

Οι τρεις μακροσκοπικά διακριτές ποιότητες ασβεστολιθικής παιπάλης που παράγει σαν παραπροϊόν τη εταιρεία ΑΣΦΑΛΤΙΚΗ Α.Τ.Ε., η οποία δραστηριοποιείτε στην

παραγωγή νωπού σκυροδέματος και ασφαλτομίγματος στην Βιομηχανική Περιοχή Ηρακλείου, υπαγόρευσαν και διαφορετικές στρατηγικές δειγματοληψίας. Αυτό δικαιολογείται από τις διαφορετικές μεθόδους συλλογής της παιπάλης κατά τα στάδια παραγωγής, αλλά έχει σαν τελικό αποτέλεσμα διαφορετικές φυσικοχημικές ιδιότητες για τα τελικά υλικά.

2.2.1 Λευκή (ξηρή) παιπάλη

Το υλικό αυτό συλλέγεται με διαδικασίες αέριου διαχωρισμού, όπως σακκόφιλτρα, αεροδιαχωριστές, αναρριφητήρες πάνω από ταινίες υλικού και η διαχείρισή του δημιουργεί το μεγαλύτερο περιβαλλοντικό πρόβλημα μια που η κοκκομετρία του καθιστά εύκολη την διασπορά του στον αέρα. Συλλέγεται κατά την παραγωγή του σκυροδέματος από την γραμμή των χονδρόκοκκων υλικών, κατά την προσπάθεια ελέγχου της παιπάλης εντός των νόμιμων ποσοστών σύμφωνα με τον Κανονισμό Τεχνολογίας Σκυροδέματος. Πολύ μεγαλύτερες ποσότητες του υλικού αυτού συλλέγονται οι παρακείμενες εντός της Βιομηχανικής Περιοχής Ηρακλείου εταιρείες παραγωγής σκυροδέματος.. Η ανάγκη όμως περιβαλλοντικά ορθής διαχείρισής της θα επέτρεπε στην εταιρεία ΑΣΦΑΛΤΙΚΗ Α.Τ.Ε να διαχειριστεί το σύνολο της παραγόμενης στην βιομηχανική περιοχή παιπάλη με οικονομικά συμφέροντα τρόπο.

Η δειγματοληψία έγινε με συλλογή κατάλληλων ποσοτήτων από πλήθος σημείων στους σωρούς εναπόθεσης του υλικού αυτού μέσα στους χώρους της εταιρείας, όπως κάτω από ταινίες, προσήνεμες θέσεις κάτω από σημεία απόρριψης/μεταφόρτωσης, προσήνεμα σημεία σε τοίχους, κολώνες κ.τ.λ. Συγκεντρώθηκε συνολικά ποσότητα περί τα 60 kg σε πλαστικούς σάκους.

2.2.2 Μαύρη παιπάλη

Το υλικό αυτό προέρχεται από το ψηλότερο των δύο σκαμμάτων πάχυνσης. Συλλέγεται σε υγρή κατάσταση, με τη μορφή πολφού και ρέει με φυσική ροή μέχρι τη θέση εναπόθεσης/πάχυνσης/ξήρανσης. Προέρχεται από τα φίλτρα αποκονίωσης της γραμμής παραγωγής του ασφαλτοσκυροδέματος τα οποία εκφορτίζονται με ψεκασμό νερού ανά τακτά χρονικά διαστήματα, καθώς και από αεροκυκλώνες οι οποίοι όμως λειτουργούν με τα καυσαέρια του καυσίμου (μαζούτ) από τον καυστήρα του ασφαλτικού συγκροτήματος. Τα καυσαέρια λόγω των περιεχόμενων άκαυστων σωματιδίων που περιέχουν (αιθάλη) προσδίδουν σε σημαντικό βαθμό την μαύρη απόχρωση στην παιπάλη αυτή.

Η δειγματοληψία έγινε με λήψη 15 δειγμάτων από την επιφάνεια της δεξαμενής. Οι θέσεις δειγματοληψίας κάλυψαν ομοιόμορφα όλη την επιφάνεια της. Η πρόσβαση σε όλα τα σημεία της δεξαμενής ήταν εφικτή επειδή κατά το χρονικό αυτό διάστημα είχε να τροφοδοτηθεί για αρκετές μέρες με πολφό παιπάλης με αποτέλεσμα το υλικό να είναι ξηρό και συμπαγές. Η αρίθμηση των δειγμάτων ξεκινά από το σημείο τροφοδοσίας της δεξαμενής και ακολουθεί σπειροειδή πορεία σύμφωνα με τους δείκτες του ρολογιού, για τα δείγματα 1 έως 15, προς το κέντρο της.

2.2.3 Φαιά παιπάλη

Το υλικό αυτό προέρχεται από το χαμηλότερο των δύο σκαμμάτων πάχυνσης, και παράγεται με τις ίδιες ακριβώς διαδικασίες όπως και η μαύρη. Η δεξαμενή αυτή βρισκόταν σε λειτουργία κατά τον χρόνο της επίσκεψης και δεν επέτρεπε την πρόσβαση σε όλη την επιφάνεια της.

Η δειγματοληψία έγινε με διαδοχική επιφανειακή λήψη 15 δειγμάτων με φτυάρι, από την περιφέρεια της δεξαμενής, με αρχή το σημείο τροφοδοσίας της δεξαμενής και φορά αυτή των δεικτών του ρολογιού, για τα δείγματα με κωδικούς 16 – 30.

2.3 Μετρήσεις φυσικομηχανικών ιδιοτήτων

2.3.1 Μετρήσεις της αεροπερατότητας κατά Blaine

Έγιναν μετρήσεις της αεροπερατότητας (air permeability) κατά την μέθοδο Blaine σύμφωνα με το πρότυπο EN196/6, με την βοήθεια της διάταξης Blaine Air Permeability Apparatus του οίκου Matest. Στον πίνακα 2.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων, σε 32 δείγματα παιπάλης (15 μαύρης, 15 φαιάς, 2 λευκής). Σημειώνεται πως μετρηση της αεροπερατότητας Blaine σε δείγμα τσιμέντου έδωσε την τιμή $4635\text{cm}^2/\text{g}$.

2.3.2 Μετρήσεις της φαινόμενης πυκνότητας

Στον πίνακα 2.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων της φαινόμενης πυκνότητας σε 12 δείγματα παιπάλης (6 μαύρης και 6 φαιάς), όπως συνελλέγησαν από τις δεξαμενές πάχυνσης σε συμπαγή μορφή και φυσική υγρασία, και 18 δείγματα ξηρής (6 μαύρης, 6 φαιάς και 6 λευκής), χύδην παιπάλης.

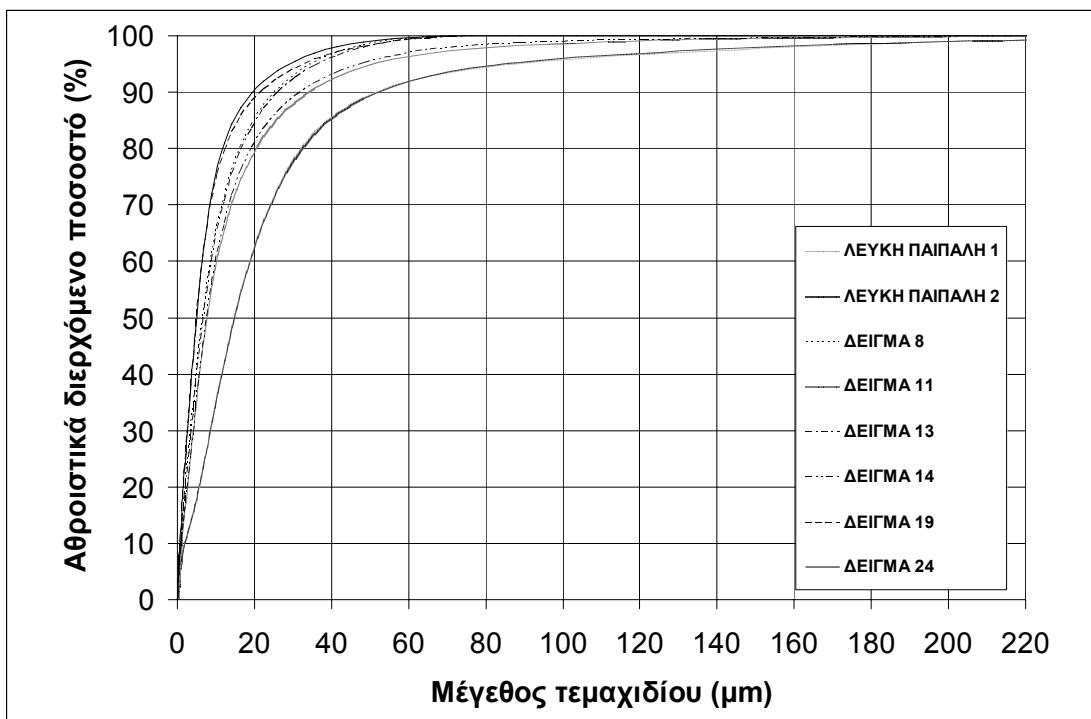
Πίνακας 2.1: Μετρήσεις φαινόμενης πυκνότητας και αεροπερατότητας κατά Blaine.

Είδος παιπάλης	Μέση φαινόμενη πυκνότητα (συμπαγές δείγμα), (g/cm³)	Τυπική απόκλιση (g/cm³)	Μέση φαινόμενη πυκνότητα (χύδην δείγμα), (g/cm³)	Τυπική απόκλιση (g/cm²)	Μέση τιμή Blaine (cm²/g)	Τυπική απόκλιση (cm²/g)
Λευκή	-*	-*	1.26	0.0063	2990	203
Μαύρη	1.34	0.1222	1.24	0.0163	5650	563
Φαιά	1.31	0.0319	1.14	0.0316	5640	524

*: Λόγω της πνευματικής μεθόδου συλλογής της λευκή παιπάλης εν ξηρώ, δεν απαντάται συμπαγής μορφή κατά την συλλογή της.

2.3.3 Αναλύσεις παιπάλης για κοκκομετρία με laser

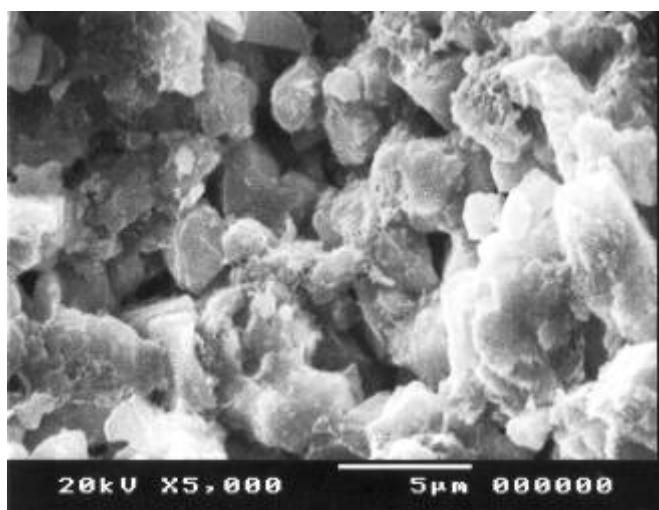
Η κοκκομετρική ανάλυση πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο περίθλασης ακτίνων laser, με την βοήθεια του συστήματος «Mastersizer S» του οίκου Malvern Instruments. Οι καμπύλες αθροιστικά διερχόμενων μεγεθών φαίνονται στο Σχήμα 2.4.



Σχήμα 2.4: Αθροιστικό διάγραμμα κοκκομετρικών διαβαθμίσεων

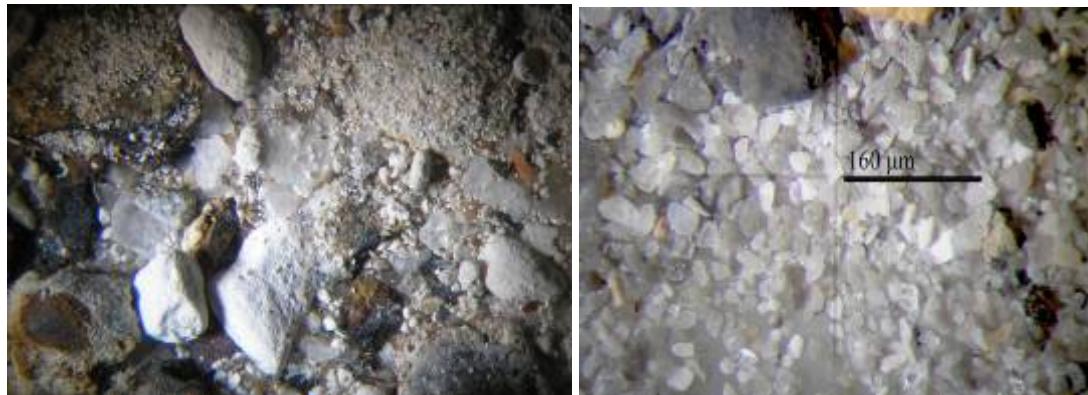
2.4 Αναλύσεις παιπάλης για μορφολογία κόκκων με οπτική και ηλεκτρονική μικροσκοπία

Στην εικόνα του Σχήματος 2.5, η οποία προέρχεται από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης, φαίνεται η μορφολογία των κόκκων της παιπάλης, ως ακανόνιστα, γωνιώδη τεμαχίδια σχεδόν αποκλειστικά ασβεστικής σύστασης.

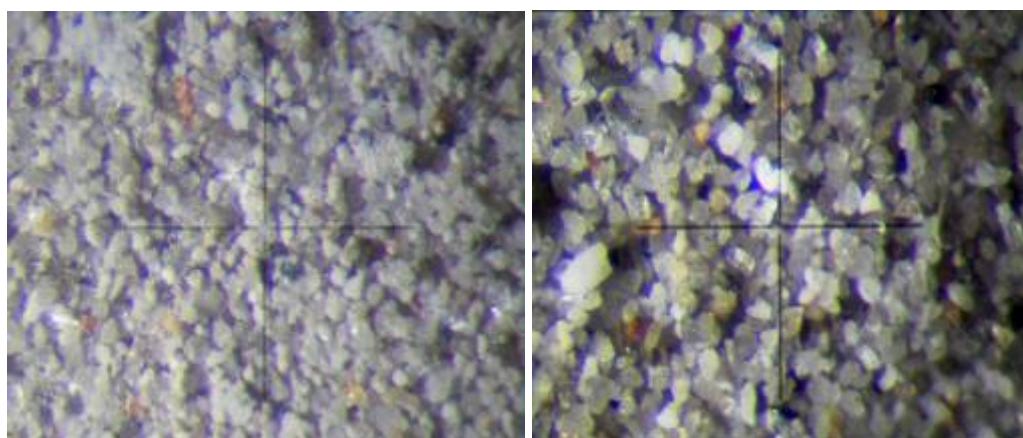


Σχήμα 2.5: Εικόνα δοκιμίου μαύρης παιπάλης από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης.

Οι εικόνες που δίνονται στα Σχήματα 2.6 και 2.7 προέρχονται από στερεοσκοπικό μικροσκόπιο και παρουσιάζουν διάφορα κλάσματα άσπρης, φαιάς και μαύρης παιπάλης. Παρατηρείται ότι στα μεγάλα κλάσματα της παιπάλης οι κόκκοι είναι ανομοιογενείς και υπάρχουν και ξένα υλικά που πιθανόν παρασύρθηκαν από τον αέρα. Αντίθετα στα μικρά κλάσματα οι κόκκοι είναι ομοιογενείς.



Σχήμα 2.6: Κλάσμα +75μm. Άσπρη παιπάλη (αρ.) πλάτος εικόνας 15mm. Μαύρη παιπάλη (δεξ.) πλάτος εικόνας 6mm.



Σχήμα 2.7: Κλάσμα -75 +56μm. Φαιά παιπάλη (αρ.) πλάτος εικόνας 2,11mm. Μαύρη παιπάλη (δεξ.) πλάτος εικόνας 1,85mm.

2.5 Χημικές αναλύσεις

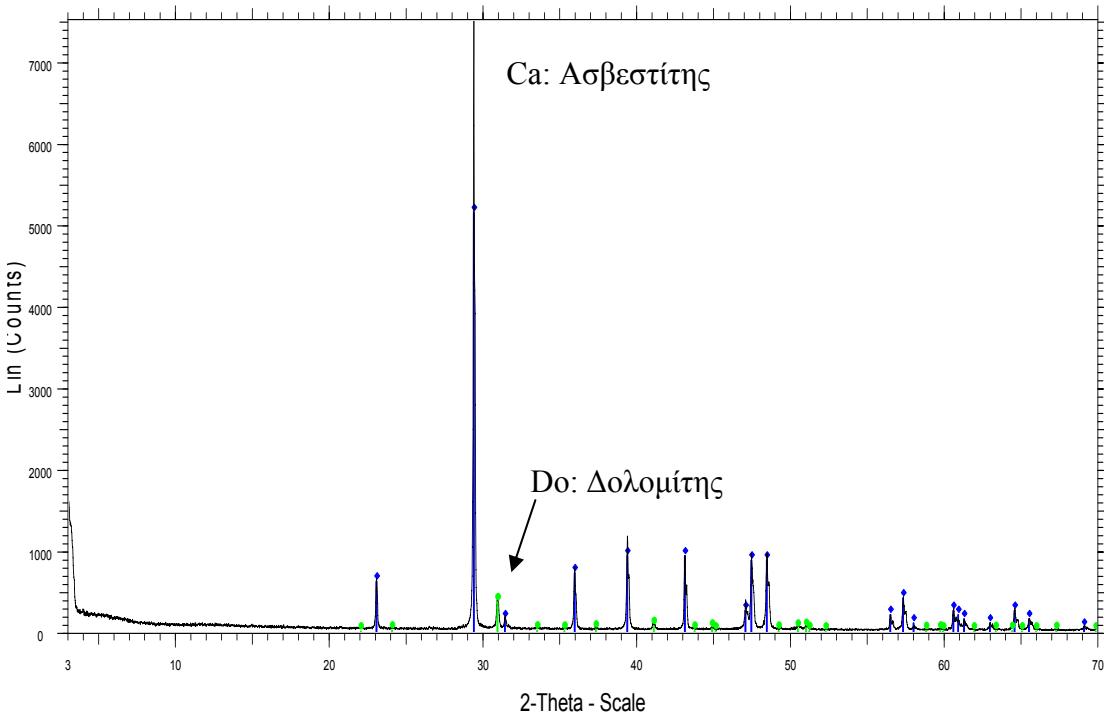
Στον πίνακα 2.2 παρουσιάζονται οι χημικές αναλύσεις των 10 δειγμάτων καθώς και οι αναλύσεις των μητρικών πετρωμάτων. Οι χημικές αναλύσεις έγιναν με το σύστημα φασματοσκοπίας ακτίνων-X φθορισμού με το σύστημα «S2 Ranger» του οίκου Brucker.

Πίνακας 2.2: Χημικές αναλύσεις δειγμάτων

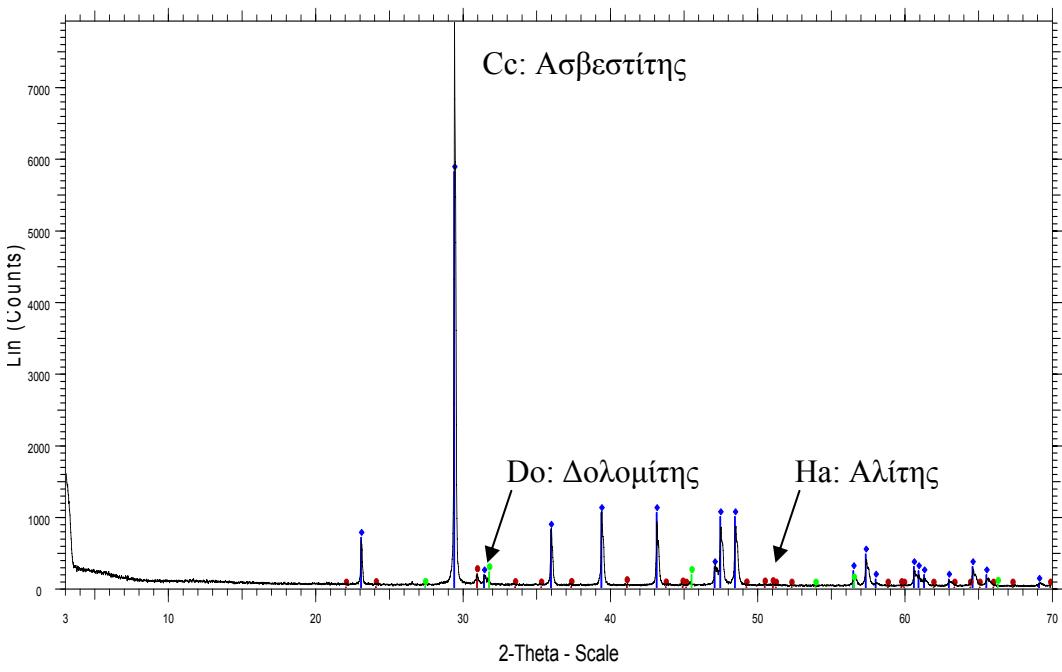
Κωδ. δειγμ.	Περιγραφή	CaO %	Fe ₂ O ₃ %	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	MgO %	K ₂ O %	Na ₂ O %	CO ₂ %	CaCO ₃ %	CaMg(CO ₃) ₂ %
8	Παιπάλη	55.11	0.21	0.53	0.12	0.25	<0.1	<0.1	43.90	98.41	<0.5
11	Παιπάλη	55.17	0.27	0.55	0.11	0.23	<0.1	<0.1	43.85	98.51	<0.5
13	Παιπάλη	53.46	0.21	0.48	0.16	1.68	<0.1	<0.1	43.86	91.17	7.8
14	Παιπάλη	53.76	0.25	0.63	0.21	1.48	<0.1	<0.1	43.75	92.07	6.7
19	Παιπάλη	53.06	0.165	0.49	0.19	1.48	<0.1	0.6	43.26	90.88	7.02
24	Παιπάλη	53.46	0.179	0.55	0.17	1.68	<0.1	<0.1	43.85	91.17	7.80
BR1	Μητρικό πέτρωμα	55.44	0.03	0.26	0.10	0.24	<0.1	<0.1	43.89	99.00	<0.5
BR2	Μητρικό πέτρωμα	55.34	0.03	0.36	0.10	0.23	<0.1	<0.1	43.90	98.83	<0.5

2.6 Ορυκτολογικές αναλύσεις

Οι ορυκτολογικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με τη μέθοδο περιθλασιμετρίας ακτίνων X (X-Ray Diffraction), χρησιμοποιώντας το σύστημα αυτόματης περιθλασιμετρίας ακτίνων X τύπου D-500 της εταιρείας Siemens



Σχήμα 2.8: Ακτινοδιάγραμμα (X-Ray Diffraction) δείγματος Λευκής παιπάλης. Αποτελείται στο μεγαλύτερο μέρος από ασβεστίτη και σε ένα μικρότερο ποσοστό από δολομίτη.

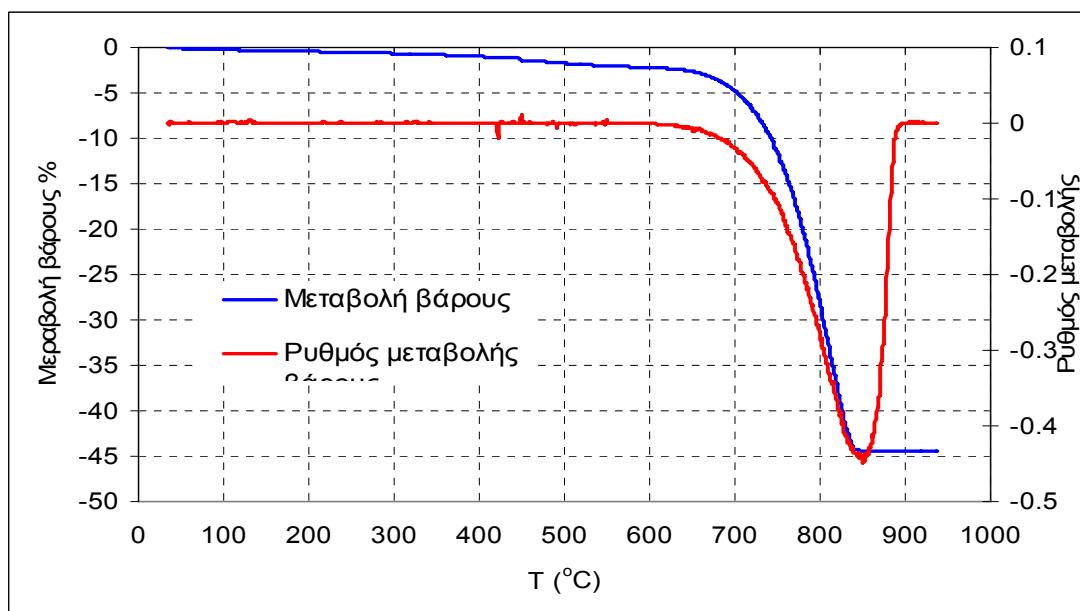


Σχήμα 2.9: Ακτινοδιάγραμμα (X-Ray Diffraction) δείγματος 19. Αποτελείται κυρίως από ασβεστίτη και σε ένα μικρότερο ποσοστό από δολομίτη. και NaCl.

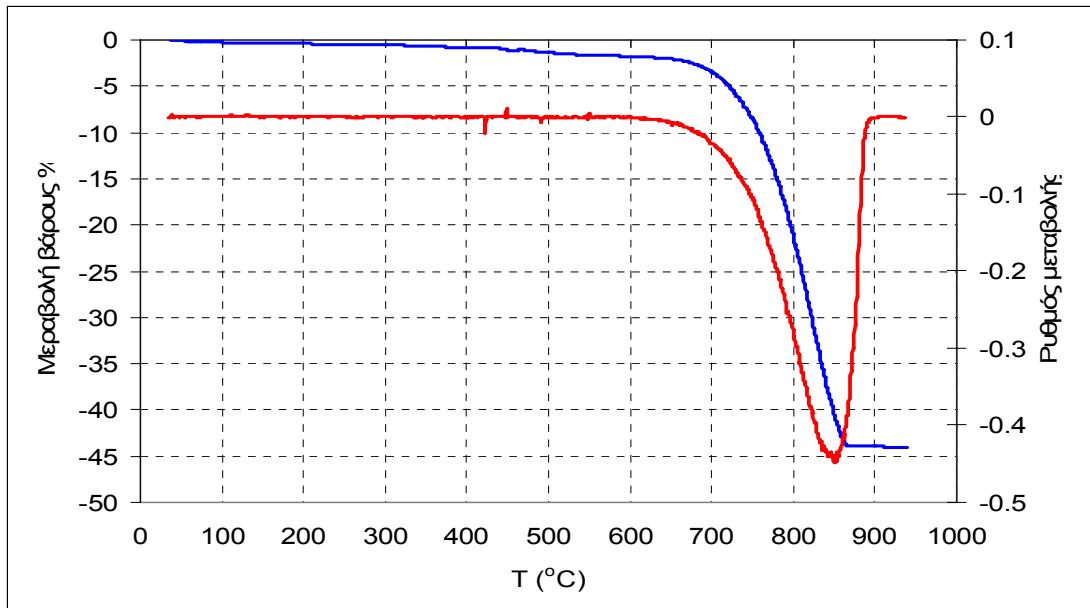
2.7 Θερμοβαρυτομετρικές αναλύσεις

Η θερμοβαρυτομετρική ανάλυση πραγματοποιήθηκε με τον θερμοζυγό TGA-6 της εταιρείας Perkin Elmer. Ο θερμοζυγός υποστηρίζεται από ηλεκτρονικό υπολογιστή για τον έλεγχο λειτουργίας και την διαχείριση των πειραματικών αποτελεσμάτων μέσω του λογισμικού PYRIS.

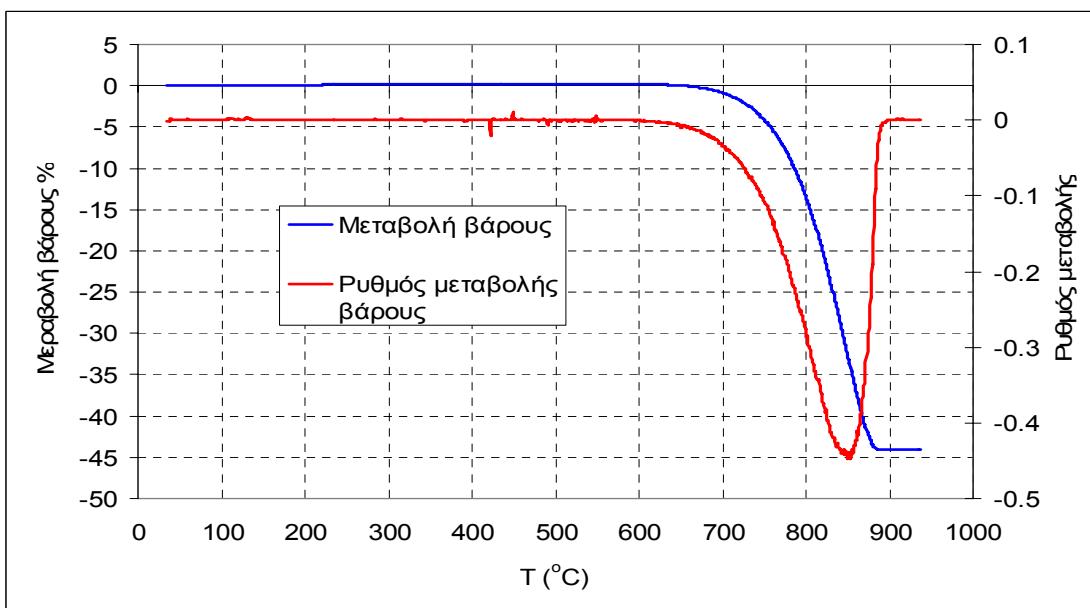
Στα σχήματα 2.10 έως 2.12 παρουσιάζονται τα διαγράμματα που δείχνουν την μεταβολή του βάρους σε σχέση με τη θερμοκρασία για δείγματα προερχόμενα από τα τρία διαφορετικά είδη παιπάλης.



Σχήμα 2.10: Μεταβολή του βάρους σε σχέση με την θερμοκρασία για το δείγμα της μαύρης παιπάλης



Σχήμα 2.11: Μεταβολή του βάρους σε σχέση με την θερμοκρασία για το δείγμα της φαιάς παιπάλης



Σχήμα 2.12: Μεταβολή του βάρους σε σχέση με την θερμοκρασία για το δείγμα της λευκής παιπάλης

Πίνακας 2.3: Ποσοστό υγρασίας, άκαυστων οργανικών, κρυσταλλικού νερού, CaCO_3 για 3 δείγματα παιπάλης.

Κωδ. Δείγμ.	Ποσοστό υγρασίας (%)	Ποσοστό άκαυστων οργανικών (%)	Ποσοστό κρυσταλλικού νερού αργιλικών ορυκτών (%)	CO_2 (%)
8	0,25	1,49	0,47	42,21
16	0,28	1,07	0,42	42,16
Λευκή παιπάλη	0,00	0,02	0,003	43,80

2.8 Επεξεργασία και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων

Από την δειγματοληψία προέκυψε ότι μακροσκοπικά αναγνωρίζεται διαφοροποίηση στον τύπο της παιπάλης. Η απαγόμενη με αέρα ξηρή λευκή παιπάλη από τα αδρανή σκυροδέματος, με βάση τις εργαστηριακές αναλύσεις είναι λιγότερο λεπτομερής από την μαύρη και την φαιά, όπως φαίνεται από τις κοκκομετρικές καμπύλες στο Σχήμα 2.4, ενώ δεν περιέχει καθόλου προσμίξεις οργανικών ακαύστων ουσιών. Η μέση τιμή της αεροπερατότητας κατά Blaine για την λευκή παιπάλη είναι $2988 \text{ cm}^2/\text{g}$ ενώ της μαύρης και της φαιάς $5646 \text{ cm}^2/\text{g}$. Η διαφορά στην αεροπερατότητα είναι εμφανής και στα διαγράμματα κοκομετρικών αναλύσεων όπου το ποσοστό των υπερλεπτομερών τεμαχιδίων είναι μικρότερο για τη λευκή παιπάλη. Οι παρατηρήσεις με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (Σχήμα 2.5) έδειξαν ότι η μορφολογία των υπερλεπτομερών κόκκων της παιπάλης, χαρακτηρίζεται από ακανόνιστα γωνιώδη τεμαχίδια αποτελούμενα αποκλειστικά σχεδόν από ασβεστίτη. Οι παρατηρήσεις με το στερεοσκοπικό μικροσκόπιο (Σχήματα 2.6 και 2.7) έδειξαν ότι το κοκκομετρικό κλάσμα $+75 \mu\text{m}$ για την άσπρη την φαιά και τη μαύρη παιπάλης, παρατηρούνται ανομοιογενείς κόκκοι καθώς και ξένα υλικά που πιθανόν παρασύρθηκαν από τον αέρα που απάγει την παιπάλη από τα αδρανή σκυροδέματος ή ασφαλτομιγμάτων. Αντίθετα στα κλάσματα $-75 \mu\text{m}$ $+56$ οι κόκκοι είναι ομοιογενείς και χαρακτηρίζονται ως γωνιώδεις ακανόνιστοι.

3. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΣΥΝΘΕΣΕΩΝ - ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

3.1 Πειραματικός σχεδιασμός συνθέσεων δοκιμίων παιπάλης/τσιμέντου.

Για την πειραματική διερεύνηση της δυνατότητας χρήσης των τεχνολογιών της συμπίεσης και εξώθησης για την διαμόρφωση-παραγωγή ειδικών δομικών στοιχείων από παιπάλη και τσιμέντο, χρησιμοποιήθηκε ο πειραματικός σχεδιασμός τριών φάσεων. Η πρώτη (ή διερευνητική) φάση, είχε ως στόχο να προσδιορίσει τις παραμέτρους πειραματικού σχεδιασμού και απόκρισης (ή ελέγχου) του υπό διερεύνηση συστήματος. Η δεύτερη (ή εκτενής) φάση πειραμάτων είχε ως στόχο τον προσδιορισμό του πεδίου τιμών των υπό διερεύνηση παραμέτρων σχεδιασμού και τις ακριβείς συσχετίσεις τους με τις παραμέτρους ελέγχου. Τέλος κατά την τρίτη και τελευταία (ή τελική) φάση προσδιορίζονταν οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων σχεδιασμού.

Για την μεν τεχνολογία συμπίεσης, οι παράμετροι σχεδιασμού ήταν, ο λόγος νερού/τσιμέντου και η πίεση διαμόρφωσης, ενώ σαν μεταβλητές απόκρισης ορισθήκαν η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, το μέτρο ελαστικότητας του Young, η υδατοαπορρόφηση και η πυκνότητα.

Για την δε τεχνολογία εξώθησης οι παράμετροι σχεδιασμού ήταν, ο λόγος νερού/τσιμέντου τα ποσοστά συμμετοχής των χημικών πρόσμικτων (πλαστικοποιητές, υπερευστοποιητές), ενώ σαν μεταβλητές απόκρισης ορισθήκαν και πάλι η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, το μέτρο ελαστικότητας του Young, η υδατοαπορρόφηση, η πυκνότητα και επιπρόσθετα η αντοχή σε κάμψη (δοκιμή «τριών σημείων») και η τιμή μιας ειδικά Τροποποιημένης Δοκιμής πλαστικότητας Vicat (Modified Vicat Plastisity test ή MVP), η οποία περιγράφεται αναλυτικά παρακάτω.

Στον παραπάνω σχεδιασμό η παιπάλη που χρησιμοποιήθηκε ήταν λευκή, έγχρωμη ή μίγμα των δύο, ενώ χρησιμοποιήθηκε και μίγμα παιπάλης με λατομική άμμο.



Σχήμα 3.1: Διάγραμμα ροής πειραματικής διερεύνησης

3.2 Διαμόρφωση δοκιμών παιπάλης/τσιμέντου υπό πίεση

Η μέθοδος αυτή έγκειται στην διαμόρφωση στερεών προϊόντων στοιχειώδους πρώιμης (νεαρής) αντοχής, με την συμπίεση ύφυγρων μιγμάτων λεπτομερών, κατά κανόνα, αδρανών και τσιμέντου. Έχει εισαχθεί και χρησιμοποιείται ευρύτατα στις αναπτυσσόμενες χώρες με εδαφικά κυρίως αδρανή υλικά, σαν μια άμεση και φθηνή λύση για την στέγαση πληθυσμών του τρίτου κόσμου (<http://www.hyperbrick.com/>).

Στην εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκαν για πρώτες ύλες ασβεστολιθική λατομική παιπάλη και κοινό τσιμέντο τύπου Portland (CEM II 32.5). Αναζητήθηκε δε η

επίτευξη ικανοποιητικότερων φυσικομηχανικών ιδιοτήτων από παλιότερες προσπάθειες στην κατεύθυνση αυτή (βλ. Galetakis & Raka 2004a).

Για λόγους σαφής διάκρισης, οργάνωσης και εύχρηστης διαχείρισης των δεδομένων, κρίθηκε επιβεβλημένη η κωδική ονομασία των δοκιμών που παρασκευάστηκαν. Έτσι σε κάθε ανάμιγμα, αποδόθηκε ένας μοναδικός κωδικός ο οποίος αποτελείται από πέντε πεδία. Στο πρώτο πεδίο αναγράφεται η επί της εκατό περιεκτικότητα του μίγματος σε τσιμέντο, επί του συνόλου των αδρανών υλικών του. Στο δεύτερο πεδίο δηλώνεται η μέθοδος παρασκεύης των δοκιμών. Έτσι προκύπτει: **Σ** για την διαμόρφωση με συμπίεση και **ΠΑ** για την δημιουργία πλαστικής μάζας. Στο τρίτο πεδίο αναγράφεται στην μεν διαμόρφωση υπό πίεση η τάση συμπύκνωσης, στις δε πλαστικές μάζες η δοσολογίες του υπερευστοποιητή και του πλαστικοποιητή αντίστοιχα. Έτσι λαμβάνει τις τιμές **Μτ** που σημαίνει μέγιστη ποσοστιαία αναλογία υπολογισμένη επί συνόλου τσιμέντου, **Μ** που σημαίνει μέγιστη κατά τον κατασκευαστή δοσολογία πρόσμικτου επί συνόλου στερεών, **μ** που σημαίνει μέση δοσολογία και **ε** που σημαίνει ελάχιστη δοσολογία. Ακολουθεί το τέταρτο πεδίο το οποίο δηλώνει το είδος του αδρανούς υλικού στο ανάμιγμα. Παίρνει τις τιμές **Λ** για την «λευκή» παιπάλη, **Ε** για το ισοβαρές μίγμα «φαιάς» κι «μαύρης» παιπάλης, **ΜΑ** για την μαρμαρόσκονη ενώ υπάρχουν και περιπτώσεις μιγμάτων των παραπάνω, οπότε αναγράφεται η αναλογία των αδρανών συστατικών σε μέρη ανά δέκα μέρη βάρους. Τέλος στο πέμπτο πεδίο αναφέρεται η περιεκτικότητα του μίγματος σε νερό επί συνόλου στερεών φυσικής υγρασίας.

3.2.1 Διερευνητική φάση

Από κάθε ανάμιγμα παρασκευάστηκαν τρία κυλινδρικά δοκίμια για την δοκιμή φόρτισης σε ανεμπόδιστη μονοαξονική θλίψη .Στην φάση αυτή, παρασκευάστηκαν δοκίμια με κωδικούς: 15.79Σ38.21Λ7.02, 15.79Σ66.61Λ7.02, 15.79Σ43.46Λ10.00, 15.79Σ56.24Ε10.00, 15.79Σ57.95Ε10.00, 15.79Σ43.46Ε10.00, 15.79Σ43.46Ε10.53, 18.99Σ28.97Ε14.18.

Παρασκευή των δοκιμών

Τα δοκίμια παρασκευάστηκαν με ανάμιξη 80g ασβεστολιθικής παιπάλης (λευκή, μαύρη, φαιά), με 15g τσιμέντου τύπου CEM II/32.5. Η φυσική υγρασία όλων των

αδρανών υλικών κατά την φάση των δοκιμαστικών αναμίξεων υπολογίστηκε κατά μέσον όρο σε 0,385% κ.β.

Η ανάμιξη των στερεών έγινε με το χέρι, ενώ η προσθήκη του νερού έγινε με ψεκασμό του μίγματος των στερεών, όχι άμεσα αλλά στον χώρο ακριβώς πάνω από το σκεύος που τα περιείχε. Έτσι αποφεύχθηκε κατά το δυνατόν η δημιουργία συσσωματωμάτων και διευκολύνθηκε η διασπορά της υγρασίας ομοιογενώς σε όλο το ανάμιγμα. Το συνολικό βάρος του νερού που προστέθηκε, προσδιορίστηκε με ζύγιση του σκεύους ανάμιξης και όχι του δοχείου του νερού και μόνον αφού αυτό σκουπίστηκε επιμελώς από διεσπαρμένα μικροσταγονίδια νερού στις ακάλυπτες επιφάνειές του.

Μετά την προσθήκη του νερού και την ομογενοποίηση ακολούθησε η τοποθέτηση του μίγματος εντός χαλύβδινης μήτρας κυλινδρικού σχήματος διαμέτρου 4,070cm σε δόσεις των 5g περίπου, και η προσυμπύκνωσή του με εφαρμογή βάρους 25kg περίπου, επί επιφάνειας ίσης και παράλληλης με την βάση της μήτρας. Μετά την τοποθέτηση και προσυμπύκνωση του συνόλου του δείγματος, ακολούθησε η τελική του συμπύκνωση μέχρι την επιθυμητή τιμή τάσης, με την βοήθεια εργαστηριακής πρέσας ψηφιακής καταγραφής του οίκου Material Testing, ή χειροκίνητης πρέσας με ένδειξη πίεσης λαδιού, κατά περίπτωση. Οι λεπτομέρειες όσον αφορά την σύνθεση και τις παραμέτρους συμπύκνωσης κάθε δοκιμίου, δίνονται στον πίνακα 3.1.

Η όλη διαδικασία ήταν απαραίτητο να διαρκέσει όσο το δυνατόν λιγότερο, γιατί η έναρξη της δημιουργίας των υδραυλικών φάσεων του τσιμέντου μετά την ενυδάτωσή του δεν έπρεπε να προηγείται της τελικής διαμόρφωσης του δοκιμίου.

Ωρίμανση των δοκιμίων

Η ωρίμανση των δοκιμίων έλαβε χώρα, κατ' αντιστοιχία με τον Ελληνικό Κανονισμό Σκυροδέματος, σε εργαστηριακό θάλαμο ωρίμανσης της εταιρείας MATEST, σε θερμοκρασία $20 \pm 1^{\circ}\text{C}$ και υγρασία κατ' ελάχιστο 95% για 27 ημέρες. Στην συνέχεια παρέμειναν σε συνθήκες περιβάλλοντος για 1 ημέρα, προ της διεξαγωγής των εργαστηριακών δοκιμών.

Προσδιορισμός των μηχανικών ιδιοτήτων των δοκιμίων

Μετά το πέρας της περιόδου ωρίμανσης τα δοκίμια σκουπίστηκαν από σταγόνες νερού στην εξωτερική τους επιφάνεια, μετρήθηκαν οι διαστάσεις τους, ζυγίστηκαν και τέλος φορτίστηκαν σε συνθήκες ανεμπόδιστης μονοαξονικής θλίψης έως

αστοχίας τους με την βοήθεια εργαστηριακής πρέσας ψηφιακής καταγραφής του οίκου Material Testing, ή χειροκίνητης πρέσας με ένδειξη πίεσης λαδιού κατά περίπτωση. Οι λεπτομέρειες όσον αφορά την γεωμετρία και τις παραμέτρους θραύσης κάθε δοκιμίου, καθώς και τα τελικά αποτελέσματα, αναγράφονται στον πίνακα 3.1.

Παρατηρήσεις - Προτάσεις

Οι αντοχές σε μονοαξονική θλίψη δεν παρουσιάζονται ικανοποιητικές για χρήση οικοδομικών στοιχείων εν γένει, ενώ η γενικά μεγάλη διασπορά των μετρούμενων τιμών οφείλεται στην πλημμελή αποσυσσωμάτωση/ομογενοποίηση των στερεών φάσεων καθώς και την ατελή διασπορά της προστιθέμενης υγρασίας. Το πρώτο φαινόμενο γίνεται μακροσκοπικά αντιληπτό στις επιφάνειες θραύσης, όπου παρατηρούνται διακριτές φάσεις (νησίδες), ενώ το δεύτερο γίνεται ορατό από την αναπόφευκτη δημιουργία «σβώλων» (pelletising) κατά την φάση της ανάμιξης.



Σχήμα 3.2: Επιφάνεια θραύσης δοκιμίου με ευδιάκριτα συσσωματώματα παιπάλης.

Λόγω των μικρών ποσοτήτων όλων των υλικών και όπως καταδείχθηκε από το συνολικό πρόγραμμα δοκιμών, είναι απαραίτητη η ακρίβεια όλων των ζυγίσεων μέχρι το εκατοστό του g, ακρίβεια που προσέφερε η ζυγαριά που χρησιμοποιήθηκε.

3.2.2 Εκτενής φάση

Σε μια προσπάθεια να αντιμετωπιστεί το αναφερόμενο και στην διεθνή βιβλιογραφία πρόβλημα της πλημμελούς ενυδάτωσης του τσιμέντου αυξανομένου του βάθους από την εξωτερική επιφάνεια του δοκιμίου, δοκιμάστηκε η σταδιακή μείωση της πίεσης διαμόρφωσης με ταυτόχρονη αύξηση του περιεχόμενου νερού στο ανάμιγμα. Έγιναν δοκιμές σε πέντε συνολικά περιοχές πίεσης λαδιού της χειροκίνητης πρέσας διαμόρφωσης :15bar/30bar/50 bar/75 bar/100 bar, δηλ. σε τάσεις συμπύκνωσης των δοκιμών περίπου 8.75MPa / 17.35MPa / 29.00MPa / 43.30MPa και 57.90MPa αντίστοιχα, δεδομένης της διαμέτρου τους. Σε κάθε τιμή πίεσης αναζητούνταν η οριακή περιεκτικότητα νερού στο προς συμπίεση ανάμιγμα, πέρα της οποίας η συμπίεση οδηγούσε σε απώλεια περίσσειας νερού για την εκάστοτε πίεση.

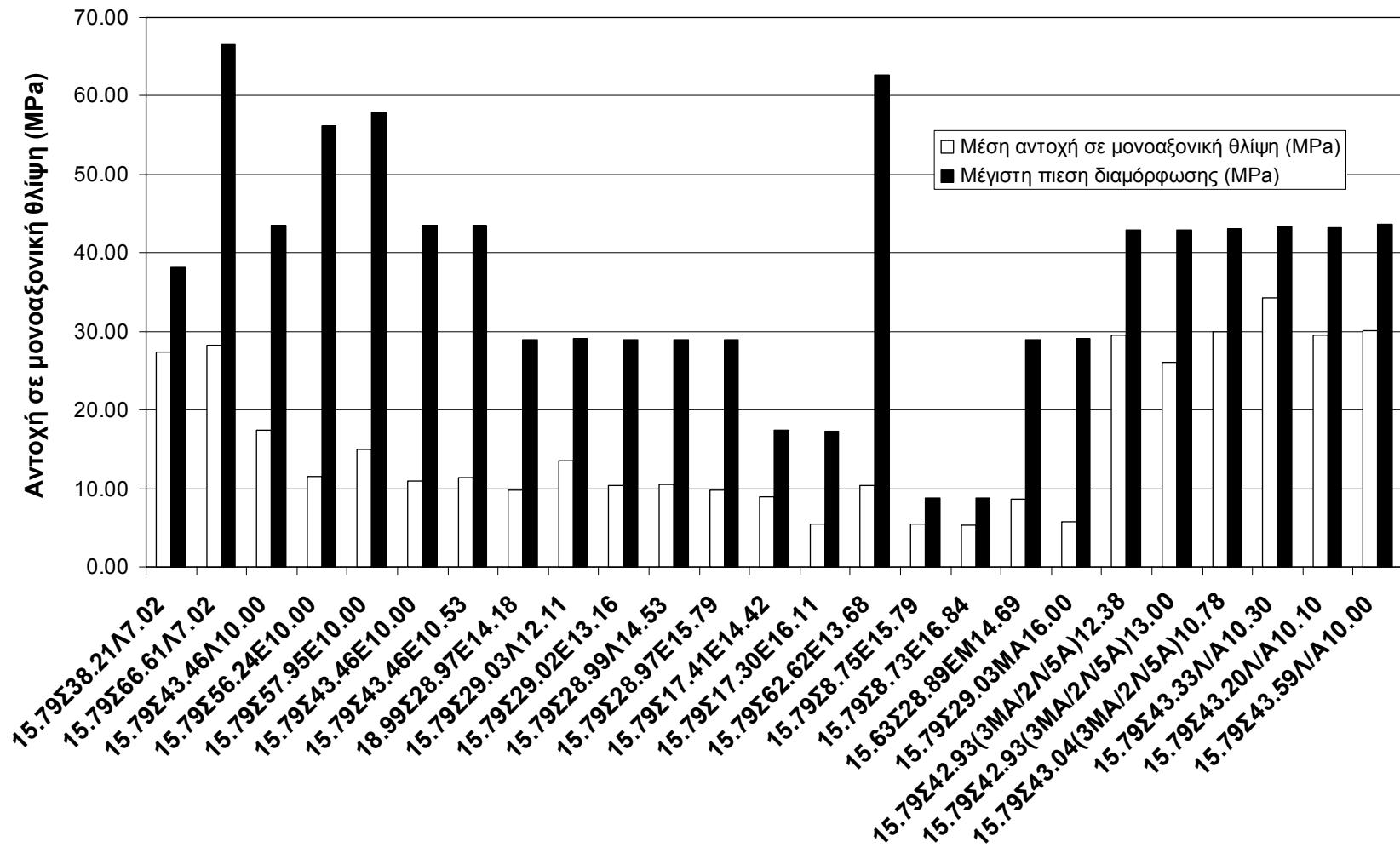
Τέλος υπολογίστηκε η πυκνότητα των δοκιμών που παρασκευάστηκαν σε μια προσπάθεια συσχέτισης του μεγέθους αυτού με τις τελικές αντοχές.

Στην φάση αυτή, παρασκευάστηκαν τα δοκίμια με κωδικούς:

15.79Σ29.03Λ12.11, 15.79Σ29.02Ε13.16, 15.79Σ28.99Λ14.53, 15.79Σ28.97Ε15.79,
15.79Σ17.41Ε14.42, 15.79Σ17.30Ε16.11, 15.79Σ62.62Ε13.68, 15.79Σ8.75Ε15.79,
15.79Σ8.73Ε16.84.

Παρατηρήσεις - Προτάσεις

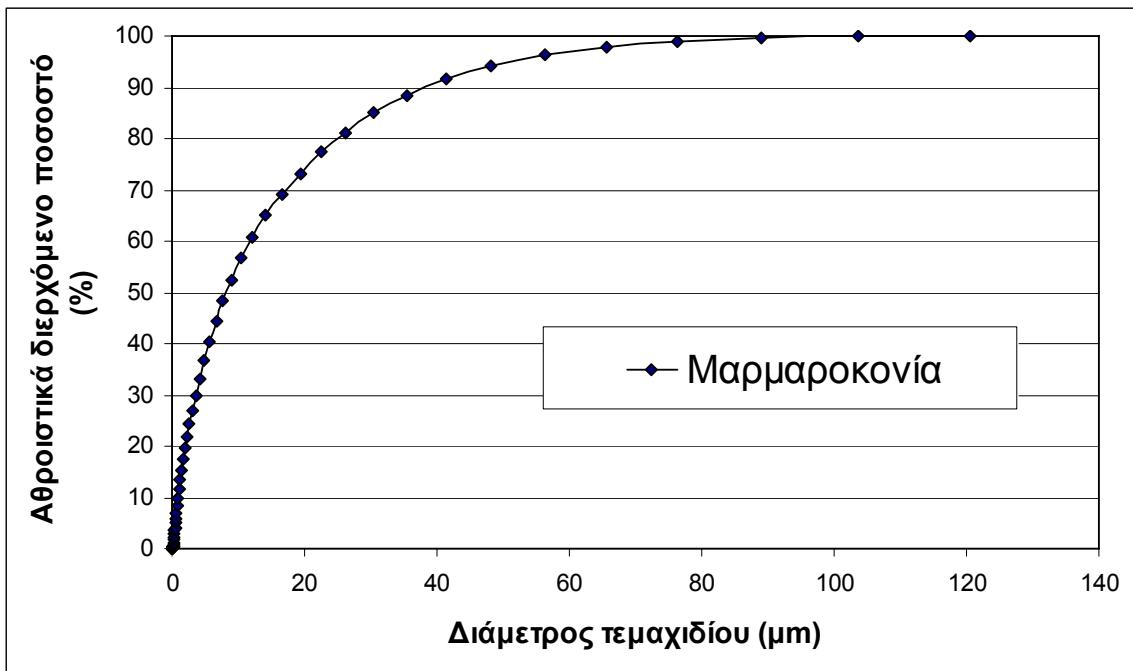
Έγινε άμεσα εμφανές πως η πίεση συμπύκνωσης παίζει σημαντικό ρόλο στην διαμόρφωση της τελικής αντοχής, πολύ σημαντικότερο από αυτόν του πιθανώς υψηλότερου βαθμού ενυδάτωσης του τσιμέντου στις περιοχές γύρω από το κέντρο μάζας του δοκιμίου. Οι πιέσεις διαμόρφωσης άνω των 75bar εγκαταλείφθηκαν και συγκεκριμένα, για λόγους κατανάλωσης ενέργειας κατά την πιθανή μελλοντική εφαρμογή της μεθόδου σε βιομηχανική κλίμακα, υιοθετήθηκε η πίεση των 75bar που αντιστοιχεί σε τάση συμπύκνωσης επί του δοκιμίου ίση με 43,5 MPa περίπου.



Σχήμα 4.3: Πίεση διαμόρφωσης και τελική αντοχή των παρασκευασθέντων δοκιμών της τεχνολογίας διαμόρφωσης υπό πίεση...

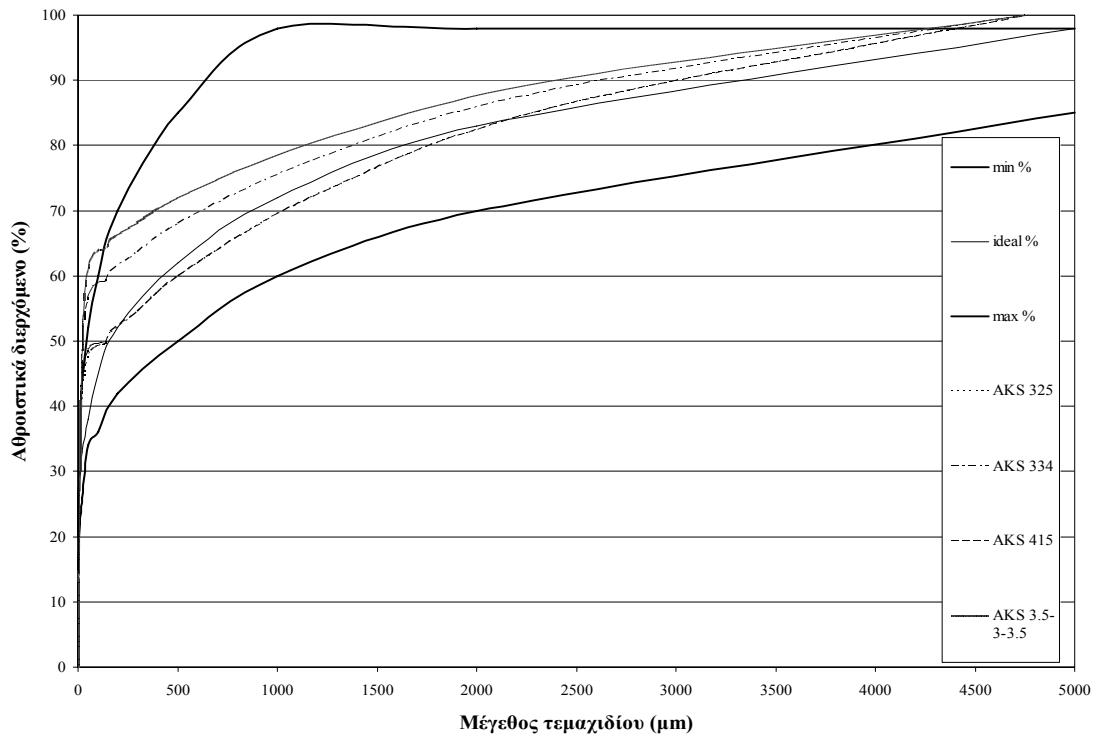
3.2.3 Τελική φάση

Βιβλιογραφικά ως κυρίαρχος παράγοντας επίτευξης υψηλών μηχανικών αντοχών παρουσιάζεται κατά κανόνα η κοκκομετρική συναρμογή των υπό ανάμιξη κλασμάτων (Ahn & Fowler 1999/2001/2002, Felecooglu & Baradan 2003, Jackson & Brown 1996 κ.α.) Για τον λόγω αυτό αποφασίστηκε να διευρυνθεί το εύρος της κατανομής μεγεθών των υπό διαμόρφωση μιγμάτων τόσο προς τα χονδρότερα όσο και προς τα αεροπερατότερα της ασβεστολιθικής; παιπάλης κλάσματα Δοκιμάστηκαν έτσι σε μίγματα με τις τρεις ποιότητες ασβεστολιθικής παιπάλης λατομική άμμος, καθώς και δύο λεπτομερέστερα παραπροϊόντα κοπής/λείανσης μαρμάρου (βλ. αντιπροσωπευτική κοκκομετρική καμπύλη, Σχήμα 3.4).

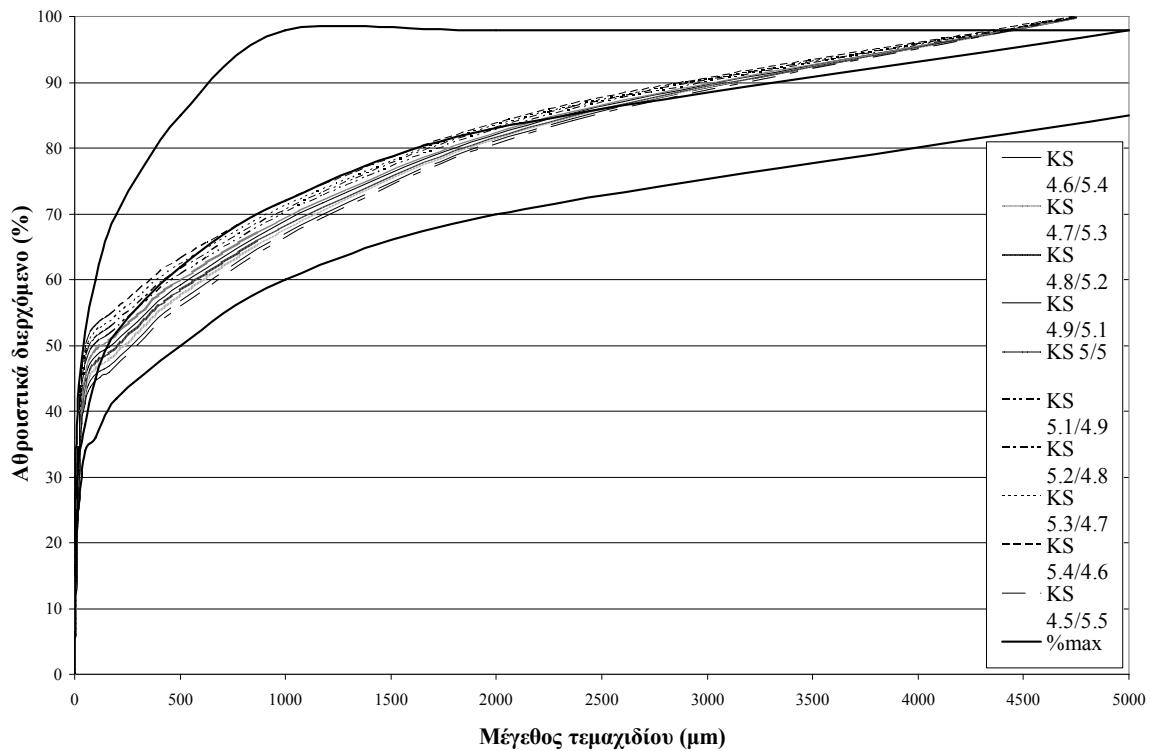


Σχήμα 3.4: Κοκκομετρική κατανομή αθροιστικά διερχόμενου μεγέθους παραπροϊόντος κατεργασίας μαρμάρου.

Κατά την φάση αυτή, της παρασκευής των δοκιμών προηγήθηκε ο γραφικός υπολογισμός «συνθετικών» κατανομών κοκκομετρίας μιγμάτων παιπάλης με άμμο ή/και μαρμαρόσκονη, από τις κοκκομετρίες των υλικών αυτών με την βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή.



Σχήμα 3.5: Γραφική προσέγγιση συνθετικών κοκκομετρικών κατανομών αθροιστικά διερχόμενου μεγέθους, σύμφωνα με όρια που υπαγορεύονται για την τεχνική συμπιεσης. Μίγματα μαρμαρόσκονης (Α), παιπάλης (Κ) και λατομικής άμμου (Σ).



Σχήμα 3.6: Γραφική προσέγγιση συνθετικών κοκκομετρικών κατανομών αθροιστικά διερχόμενου μεγέθους, σύμφωνα με όρια που υπαγορεύονται για την τεχνική συμπιεσης. Μίγματα παιπάλης (K) και λατομικής άμμου (S).

Τα δεδομένα της κοκκομετρίας συμπληρώθηκαν για όλα τα υλικά μέχρι τα υπέρλεπτα μεγέθη (μμ) με την βοήθεια συσκευής μέτρησης κοκκομετρίας laser. Η επιλογή της βέλτιστα διαμορφωμένης συνθετικής κατανομής κοκκομετρίας βασίστηκε στο γραφικό κριτήριο της ισπανικής εταιρείας HYPERBRICK (<http://www.hyperbrick.com/>) η οποία εφαρμόζει επιτυχώς αυτή την τεχνική παρασκευής δομικών στοιχείων επιτυχώς, με υλικά όμως διαφορετικής φύσης και κοκκομετρίας. Το κριτήριο αποτελείτε από δύο οριακές καμπύλες, οι οποίες διαχωρίζουν την περιοχή αποδεκτών κοκκομετρικών κατανομών προς τα χονδρότερα και ψιλότερα μεγέθη (βλ Σχήματα 3.5 και 3.6). Η βέλτιστη κατανομή μεγεθών δίνεται από την καμπύλη που ισαπέχει από τα όρια της αποδεκτής περιοχής (έντονη γραμμή στα σχήματα).

Με γραμμικούς συνδυασμούς των κατανομών μεγεθών όλων των συστατικών των μιγμάτων, επιχειρήθηκε η οπτική προσέγγιση με την καμπύλη βέλτιστης κατανομής μεγεθών. Σημασία δόθηκε όχι τόσο στην ταύτιση σε κάποια περιοχή αλλά η όσο το δυνατόν κοντινότερη προσέγγιση σε όλο το εύρος μεγεθών.

Με διαδοχικές δοκιμές (trial & error) επιλέχθηκαν ως βέλτιστα τα μίγματα: α) ίσου βάρους λευκής παιπάλης με λατομική άμμο και β) μίγμα 30% λευκής παιπάλης, 20% μαρμαρόσκονης και 50% λατομικής άμμου. Παρασκευάστηκαν δοκίμια με κωδικούς: 15.63Σ28.89ΕΜ14.69, 15.79Σ29.03ΜΑ16.00, 15.79Σ42.93(3ΜΑ/2Λ/5Α)12.38, 15.79Σ42.93(3ΜΑ/2Λ/5Α)13.00, 15.79Σ43.04(3ΜΑ/2Λ/5Α)10.78, 15.79Σ43.33Λ/Α10.30, 15.79Σ43.20Λ/Α10.10, 15.79Σ43.59Λ/Α10.00.

Παρασκευή των δοκιμών

Στην φάση αυτή τα μίγματα των αδρανών έμειναν μέσα στον θάλαμο ωρίμανσης για πάνω από 24 ώρες, ώστε να έχουν προσροφήσει στην επιφάνεια των κόκκων τους υγρασία και να επιδέχονται την προσθήκη νερού σε καλύτερη διασπορά. Τα δοκίμια κατασκευάστηκαν κατά το δυνατόν υψηλότερα, ώστε οι διαστάσεις τους να προσεγγίζουν καλύτερα τον κύλινδρο με αναλογία ύψους/διαμέτρου 1. Η βέλτιστη περιεκτικότητα σε νερό καθορίστηκε ως εκείνη στην οποία αρχίζουν να εξέρχονται σταγόνες νερού από την μήτρα κατά την συμπύκνωση. Αποτελεί ένδειξη ότι έχει επέλθει κορεσμός σε νερό του μίγματος για την δεδομένη πίεση διαμόρφωσης.

Προσδιορισμός φυσικών ιδιοτήτων δοκιμίων

Στο στάδιο αυτό υπολογίσθηκε πέραν της αντοχής σε μοναξονική θλίψη και η υδατοαπορρόφηση των δοκιμίων, ως κρίσιμο χαρακτηριστικό για δομικά στοιχεία. Ο υπολογισμός της υδατοαπορρόφησης έγινε σύμφωνα με την σχέση:

$$\frac{W_{H_2O} - W_{60\text{ }^{\circ}\text{C}}}{100 \times W_{H_2O}},$$

Όπου: W_{H_2O} : το βάρος του δοκιμίου μετά από 48 ώρες στο απιονισμένο νερό στους $(22.0 +/- 1)^{\circ}\text{C}$ και $W_{60\text{ }^{\circ}\text{C}}$: το βάρος του δοκιμίου μετά από 48 ώρες στους 60°C .

Ο κορεσμός προηγήθηκε της ξήρανσης. Οι λεπτομέρειες όσον αφορά την γεωμετρία και τις παραμέτρους θραύσης κάθε δοκιμίου και τα τελικά αποτελέσματα, δίνονται στον πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1: Συνθέσεις δοκιμών υπό συμπίεση και υπολογισμός των βασικών φυσικομηχανικών τους χαρακτηριστικών

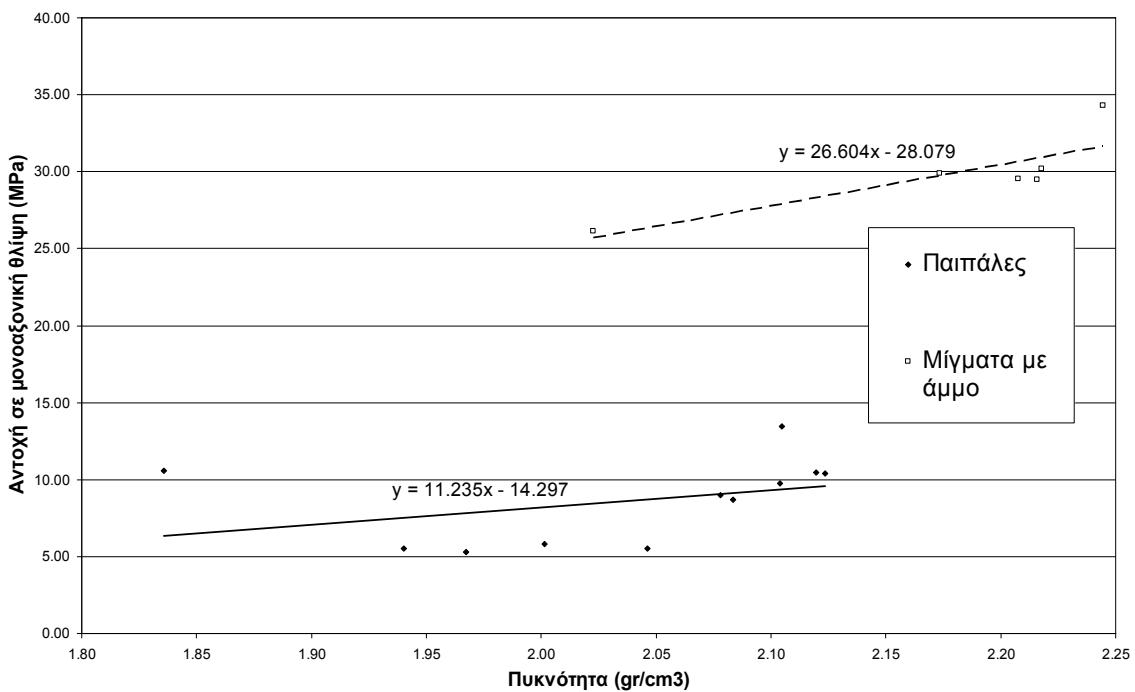
ΦΑΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗΣ	ΚΩΔΙΚΟΣ ΑΝΑΜΙΓΜΑΤΟΣ	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ				ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ			
		ΣΥΝΘΕΣΗ			ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ	Μέση αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (MPa)	Μέσο μέτρο ελαστικότητας του YOUNG (GPa)	Πυκνότητα (g/cm ³)	Υδατοαπορρόφηση (%)
		Είδος αδρανούς	%Τσιμέντο επί αδρανών	%Νερό επι στερεών (μη ξηρών)	Μέγιστη πιεση διαμόρφωσης (MPa)				
ΔΙΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΦΑΣΗ	15.79Σ38.21Λ7.02	λευκή παιπάλη	15.79	7.02	38.21	27.40	0.06	1.82	-
	15.79Σ66.61Λ7.02	λευκή παιπάλη	15.79	7.02	66.61	28.21	0.73	1.89	-
	15.79Σ43.46Λ10.00	λευκή παιπάλη	15.79	10.00	43.46	17.38	0,59	1,68	-
	15.79Σ56.24Ε10.00	έγχρωμη παιπάλη (50/50)	15.79	10.00	56.24	11.53	0,69	1,62	-
	15.79Σ57.95Ε10.00	έγχρωμη παιπάλη (50/50)	15.79	10.00	57.95	14.95	0,78	1,61	-
	15.79Σ43.46Ε10.00	έγχρωμη παιπάλη (50/50)	15.79	10.00	43.46	10.89	0,72	1,40	-
	15.79Σ43.46Ε10.53	έγχρωμη παιπάλη (50/50)	15.79	10.53	43.46	11.36	0,75	1,42	-
	18.99Σ28.97Ε14.18	έγχρωμη παιπάλη (50/50)	18.99	14.18	28.97	9.85	0,62	1,40	-
ΕΚΤΕΝΗΣ ΦΑΣΗ	15.79Σ29.03Λ12.11	λευκή παιπάλη	15.79	12.11	29.03	13.47	0,51	2.10	-
	15.79Σ29.02Ε13.16	έγχρωμη παιπάλη (50/50)	15.79	13.16	29.02	10.39	0,67	2.12	-
	15.79Σ28.99Λ14.53	λευκή παιπάλη	15.79	14.53	28.99	10.55	0,78	1.84	-
	15.79Σ28.97Ε15.79	έγχρωμη παιπάλη (50/50)	15.79	15.79	28.97	9.73	0,60	2.10	-
	15.79Σ17.41Ε14.42	έγχρωμη παιπάλη (50/50)	15.79	14.42	17.41	8.99	0,51	2.08	-
	15.79Σ17.30Ε16.11	έγχρωμη παιπάλη (50/50)	15.79	16.11	17.30	5.54	0,11	2.05	-
	15.79Σ62.62Ε13.68	έγχρωμη παιπάλη (50/50)	15.79	13.68	62.62	10.43	1,31	2.12	-
	15.79Σ8.75Ε15.79	έγχρωμη παιπάλη (50/50)	15.79	15.79	8.75	5.54	0,28	1.94	-
	15.79Σ8.73Ε16.84	έγχρωμη παιπάλη (50/50)	15.79	16.84	8.73	5.30	0,51	1.97	-
ΤΕΛΙΚΗ ΦΑΣΗ	15.63Σ28.89ΕΜ14.69	έγχρωμη/μαρμαρόσκονη	15.63	14.69	28.89	8.70	0,82	2.08	-
	15.79Σ29.03ΜΑ16.00	μαρμαρόσκονη	15.79	0.00	29.03	5.81	0,75	2.00	-
	15.79Σ42.93(3ΜΑ/2Λ/5Α)12.38	μαρμαρόσκονη/ λευκ./Άμμος (30/20/50)	15.79	12.38	42.93	29.57	1.59	2.21	10.09
	15.79Σ42.93(3ΜΑ/2Λ/5Α)13.00	μαρμαρόσκονη/ λευκ./Άμμος (30/20/50)	15.79	13.00	42.93	26.12	1.27	2.02	10.12
	15.79Σ43.04(3ΜΑ/2Λ/5Α)10.78	μαρμαρόσκονη/ λευκ./Άμμος (30/20/50)	15.79	10.78	43.04	29.92	1.59	2.17	9,94
	15.79Σ43.33Λ/Α10.30	λευκή παιπάλη/Άμμος (50/50)	15.79	10.30	43.33	34.28	1.81	2.24	8.80
	15.79Σ43.20Λ/Α10.10	λευκή παιπάλη/Άμμος (50/50)	15.79	10.10	43.20	29.51	1.77	2.22	8,61
	15.79Σ43.59Λ/Α10.00	λευκή παιπάλη/Άμμος (50/50)	15.79	10.00	43.59	30.16	2.12	2.22	9,17

Παρατηρήσεις - Προτάσεις

Η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη των δοκιμών της τελικής φάσης αυξήθηκε σημαντικά όπως και η πυκνότητα τους. Η συσχέτιση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη, C_s , με την πυκνότητα, d , των παραχθέντων δοκιμών δίνεται στο σχήμα 3.7. Τόσο τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν από παιπάλη και τσιμέντο, καθώς και αυτά για τα οποία χρησιμοποιήθηκε και λατομική άμμος παρουσιάζουν αύξηση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη καθώς αυξάνεται η πυκνότητα. Οι υπολογισθείσες σχέσεις με βάση την γραμμική παλινδρόμηση είναι:

$C_s = 11.235 * d - 14.297$ για τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν από παιπάλη και τσιμέντο, και

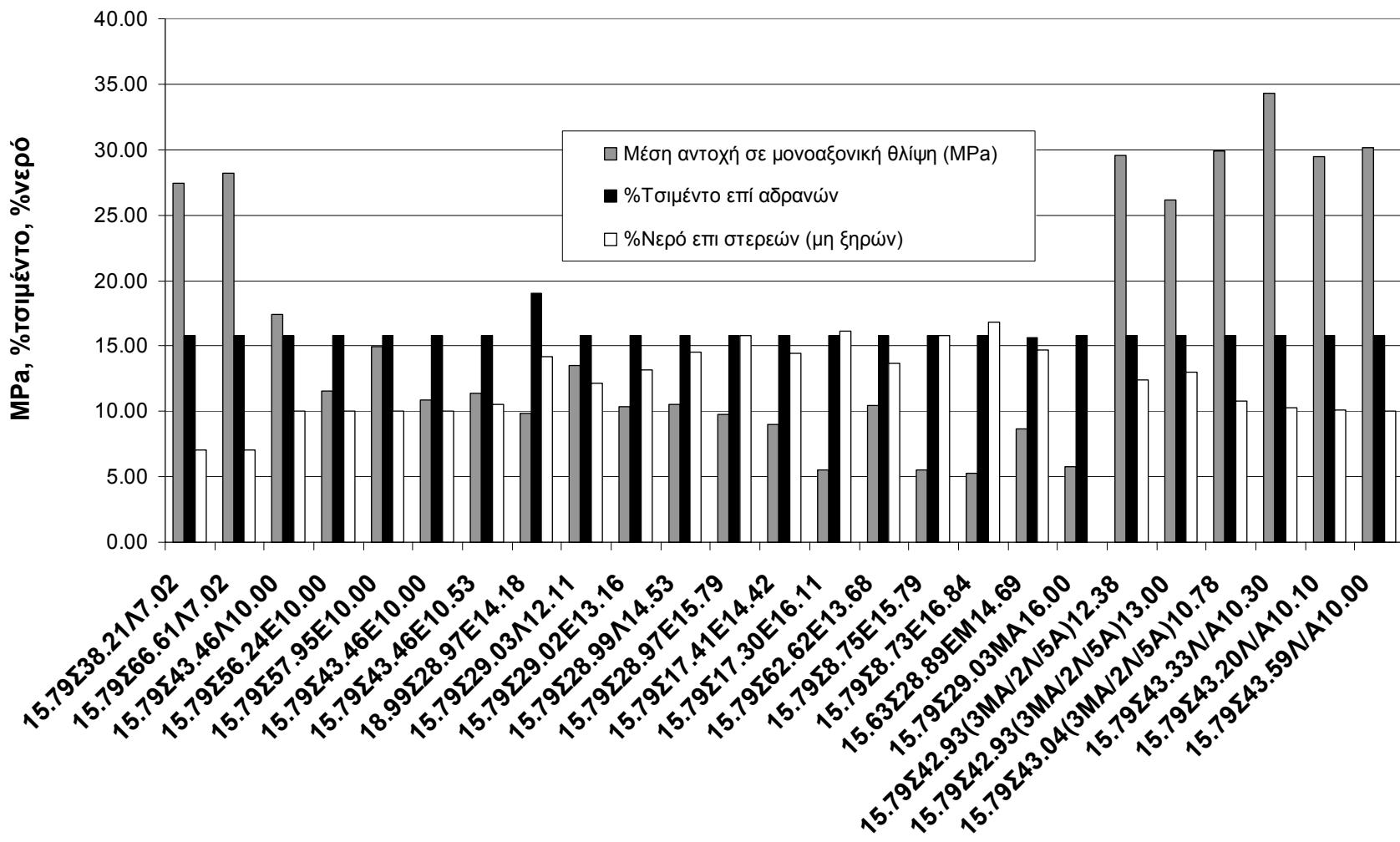
$C_s = 26.604 * d - 28.079$ για τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν από μίγματα παιπάλης-άμμου-τσιμέντου.



Σχήμα 3.7: Συσχέτιση πυκνότητας και τελικής αντοχής σε μονοαξονική θλίψη.

Ο παραπάνω σχέσεις είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν για την αρχική προσέγγιση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη συνθέσεων με μέτρηση της πυκνότητας των σκληρυμένων δοκιμών.

Οι τιμές της υδατοαπορρόφησης κυμαίνονται από 8.61 έως 10.09% και κρίνονται ικανοποιητικές. Για περαιτέρω μείωση των τιμών αυτών, προτείνεται η προσθήκη στο ανάμιγμα λεπτομερούς πολυμερούς.



Σχήμα 3.8: Ποσοστό περιεχόμενου νερού, τσιμέντου και αντοχή σε μονοαξονική θλίψη για τα παρασκευασθέντα δοκίμια με την τεχνική της συμπίεσης.

Δεδομένης της υψηλής αντοχής τους και της χαμηλής υδατοαπορρόφησης, οι συνθέσεις της τελικής φάσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή κυβόλιθων. Ιδιαίτερα υποσχόμενη εμφανίζεται η σύνθεση 15.79Σ43.33Λ/A10.30 (βλ. πίνακα 3.1), αφού ευνοεί την κατανάλωση υψηλής ποσότητας παιπάλης (50% των αδρανών της σύνθεσης) και εμφανίζει υψηλή τιμή αντοχής σε μονοαξονική θλίψη και σχετικά χαμηλή υδατοαπορρόφηση. Θα πρέπει παρόλα αυτά να συνυπολογιστούν τα πάγια κόστη για τις εξειδικευμένες μηχανές παραγωγής δομικών στοιχείων με αυτήν την μεθοδολογία, ενώ κρίνεται σκόπιμη η περαιτέρω διερεύνηση με δοκιμαστική παραγωγή κυβόλιθων σε ημιβιομηχανική κλίμακα.

3.3 Διαμόρφωση δοκιμών με εξώθηση μιγμάτων παιπάλης/τσιμέντου

Λόγω των περιορισμών στη μορφοποίηση προϊόντων με την εφαρμογή της τεχνικής διαμόρφωσης υπό πίεση διερευνήθηκε επίσης και η τεχνική της ενυδάτωσης της παιπάλης μέχρι την πλαστική κατάσταση και η επεξεργασία της στη συνέχεια, με μεθόδους μορφοποίησης κεραμικών μαζών, όπως η εξώθηση.

3.3.1 Διερευνητική φάση

Σαν πρώτη προσέγγιση διαμορφώθηκε μια μάζα από έγχρωμη παιπάλη («μαύρη»/ «φαιαί»: 50/50) και νερό μέχρι την επίτευξη «ικανοποιητικής» πλαστικότητας. Με το ίδιο κριτήριο της πλαστικότητας δημιουργήθηκαν τα πρώτα αναμίγματα παιπάλης τσιμέντου, όπου έγινε εμφανές πως για να μειωθεί η περιεχόμενη υγρασία και να επιτευχθεί ικανή συνεκτικότητα και πλαστική συμπεριφορά, που να επιτρέπει την χρήση και επεξεργασία του αναμίγματος σαν πλαστική μάζα, έπρεπε να χρησιμοποιηθεί τεχνογνωσία από την τεχνολογία σκυροδέματος και τα ειδικά πρόσμικτα που αυτή έχει αναπτύξει. Δοκιμάστηκε λοιπόν η χρήση υπερευστοποιητή για την μείωση του νερού και την αύξηση των αντοχών κατά την πρακτική παρασκευής σκυροδεμάτων, καθώς και πλαστικοποιητή. Στην φάση αυτή, παρασκευάστηκαν τα δοκίμια με κωδικούς: 0ΠΜε/εE29.88, 18.75ΠΜμ/μE, 18.75ΠΙM(ε/ε)E, 18.75ΠΙM(ε/M).E, 18.75ΠΙM(M/M)E.

Παρασκευή των δοκιμών

Για την καλύτερη αποσυσωμάτωση των στερεών συστατικών, αυτά τοποθετήθηκαν εν ξηρώ επί συνολικά 30sec περίπου εντός πολύστροφου αναμικτήρα. Τα χημικά πρόσμικτα διαλύονταν στην προζυγισμένη ποσότητα νερού και στη συνέχεια

ακολουθούσε σταδιακή προσθήκη της υγρής φάσης κατά την ανάμιξή τους με τη βιόθεια ηλεκτρικού αναμικτήρα με ρυθμιζόμενες στροφές. Η δοσολογία του υπερρευστοποιητή υπολογίστηκε δοκιμαστικά επί του συνόλου των λεπτομερών(-125 mesh) γεγονός που που έδωσε βελτιωμένα αποτελέσματα και χρησιμοποιήθηκε και στις επόμενες αναμίξεις. Η όλη διαδικασία ήταν απαραίτητο να διαρκέσει όσο το δυνατόν λιγότερο, γιατί η έναρξη της δημιουργίας των υδραυλικών φάσεων του τσιμέντου μετά την ενδάτωσή του δεν έπρεπε να προηγείται της τελικής διαμόρφωσης του δοκιμίου.

Προσδιορισμός φυσικών ιδιοτήτων δοκιμίων

Οι λεπτομέρειες όσον αφορά την γεωμετρία και τις παραμέτρους θραύσης κάθε δοκιμίου, δίνονται στον Πίνακα 3.2. Εκτός της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη, υπολογίστηκε και το μέσο μέτρο ελαστικότητας του Young, καθώς και η πυκνότητα και η υδατοαπορρόφηση των δοκιμών.

Παρατηρήσεις - Προτάσεις

Από τις δοκιμαστικές αναμίξεις έγινε κατανοητό πως τα ποσοστά συμμετοχής των πρόσμικτων σκυροδέματος δεν επηρεάζουν μόνον την ιξώδη συμπεριφορά της πλαστικής μάζας, κατά την φάση της επεξεργασίας, αλλά και την τελική αντοχή του ώριμου προϊόντος. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στην μείωση του λόγου Νερού/Τσιμέντου μέσω της χρήσης του υπερρευστοποιητή, γεγονός ευρέως γνωστό από την τεχνολογία σκυροδέματος, αλλά και στην καλύτερη ομογενοποίηση και ισότροπη συμπεριφορά της πλαστικής μάζας που επιφέρει η χρήση του πλαστικοποιητή.

Γίνεται λοιπόν εμφανές πως ήταν επιβεβλημένος ο προσδιορισμός των ιδανικών ποσοστών συμμετοχής στις συνθέσεις τόσο του νερού, όσο και των χημικών πρόσμικτων σκυροδέματος για την επίτευξη μέγιστων μηχανικών αντοχών.

3.3.2 Εκτενής φάση

Τα πρόσμικτα σκυροδέματος δοκιμαστήκαν σε δύο επίπεδα δοσολογίας (μέγιστο – ελάχιστο σύμφωνα με τον κατασκευαστή, δηλ. συνολικά τέσσερα επίπεδα δοσολογιών) και έδωσαν τα αποτελέσματα που αναφέρονται στον πίνακα 4.2.

Έγινε άμεσα εμφανές πως η χρήση και των δύο πρόσμικτων στο μέγιστο επίπεδο δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα και κατά συνέπεια υιοθετήθηκε για τη συνέχεια. Με βάση τα παραπάνω παρασκευάστηκαν δύο αναμίγματα περιεκτικότητας 15% σε τσιμέντο με προσθήκη νερού 20% και 25% αντίστοιχα. Στην φάση αυτή, παρασκευάστηκαν τα δοκίμια με κωδικούς: 15ΠΜ(Μ/Μ)Ε20, 15ΠΜ(Μ/Μ)Ε25.

Παρατηρήσεις - Προτάσεις

Με δεδομένο πως η αλλαγή του ποσοστού του νερού έχει άμεσο αντίκτυπο στις τελικές αντοχές του αναμίγματος, λόγω αύξησης του λόγου νερού/τσιμέντου, αποφασίστηκε να προεπιλεγεί μια «πρότυπη» πλαστικότητα η οποία να μπορεί να προσδιορισθεί ποσοτικά και με την σειρά της να προσδιορίσει το ιδανικό ποσοστό νερού για την παρασκευή μιας τέτοιας πλαστικής μάζας.

3.3.3 Τελική φάση

Στη φάση αυτή επιλέχθηκε σαν αποδεκτή τιμή εργασιμότητας/πλαστικότητας η τιμή 2 της δοκιμής Pfeffer-Korn (Göhlert & Uebel, 2007) ως κοινώς αποδεκτή για την επεξεργασίας μιας κεραμικής μάζας από τις συνήθεις μηχανές (εξώθησης κ.τ.λ.). Κατά την δοκιμή αυτή μετρείται η παραμόρφωση κεραμικής μάζας κυλινδρικού σχήματος δεδομένων διαστάσεων κατά την πτώση επί αυτής εμβόλου δεδομένου βάρους από δεδομένο ύψος και στην συνέχεια υπολογίζεται ο λόγος του αρχικού προς το τελικό ύψος του κυλίνδρου. Αποτελεί μία ευρέως διαδεδομένη πρακτική μέθοδο για την άμεση ποσοτικοποίηση της εργασιμότητας/πλαστικότητας μιας κεραμικής μάζας που διαμορφώνεται με τεχνολογία εξώθησης.

Η παρουσία όμως του τσιμέντου που καθιστά χρονικά πιεστική την επεξεργασία των δοκιμών (η μέθοδος Pfeffer-Korn είναι σχετικά χρονοβόρα) δεν θα έδινε σωστά αποτελέσματα λόγω της σκλήρυνσης του αναμίγματος με το χρόνο. Επελέγη λοιπόν να χρησιμοποιηθεί μια νέα μέθοδος που βασίζεται στην Δοκιμή Κανονικής Συνεκτικότητας Vicat (Vicat Normal Consistency test), ονομάζεται Τροποποιημένη Δοκιμή Πλαστικότητας Vicat (Modified Vicat Plasticity test ή MVP) και αναπτύχθηκε ειδικά για τον προσδιορισμό πλαστικότητας τσιμεντοειδών μιγμάτων υψηλής συνεκτικότητας (Leventakis et al., 2009).

Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε πρότυπη αργιλική μάζα γνωστής σύστασης και συμπεριφοράς, η οποία με την προσθήκη δεδομένης υγρασίας δίδει τιμή κατά την

δοκιμή Pfeffer-Korn ίση με 2. Με την βοήθεια της κεραμικής μάζας που παρασκευάστηκε με αυτόν τον τρόπο έγινε δυνατό να προσδιορισθεί η τιμή διείσδυσης Vicat για λόγο Pfeffer-Korn ίσο με 2. Η τιμή αυτή για πλήθος 5 δοκιμών μετρήθηκε πρακτικά ίση με 10,2mm.

Για κάθε μία από τις περιεκτικότητες σε τσιμέντο (15%, 20%, 30%, 45%) έγινε μεγάλο πλήθος δοκιμών MVP σε διάφορες υγρασίες, με στόχο την χάραξη την καμπύλης $MVP=f(H_2O)$ για κάθε μία από τις τέσσερις περιεκτικότητες τσιμέντου. (Σχήμα 3.9). Η συμπεριφορά της μεταβλητής MVP συναρτήσει της μεταβολής του προστιθέμενου στο ανάμιγμα νερού αποδείχθηκε ισχυρά γραμμική για το διάστημα τιμών γύρω από την τιμή $MVP=10,2mm$, οπότε και χαράχθηκαν τέσσερις ευθείες που περιγράφουν την πλαστική συμπεριφορά των μιγμάτων της εκαστοτε περιεκτικότητας σε τσιμέντο, κατά την μεταβολή του περιεχόμενου νερού.

Με την διαδικασία αυτή, η απαιτούμενη ποσότητα νερού που έπρεπε να προστεθεί στο ανάμιγμα για την επίτευξη της ζητούμενης πλαστικότητας ($Pfeffer-Korn=2$ δηλαδή $MVP=10,2$), για κάθε μία από τις τέσσερις περιεκτικότητες τσιμέντου, μπορούσε να προσδιορισθεί γραφικά.

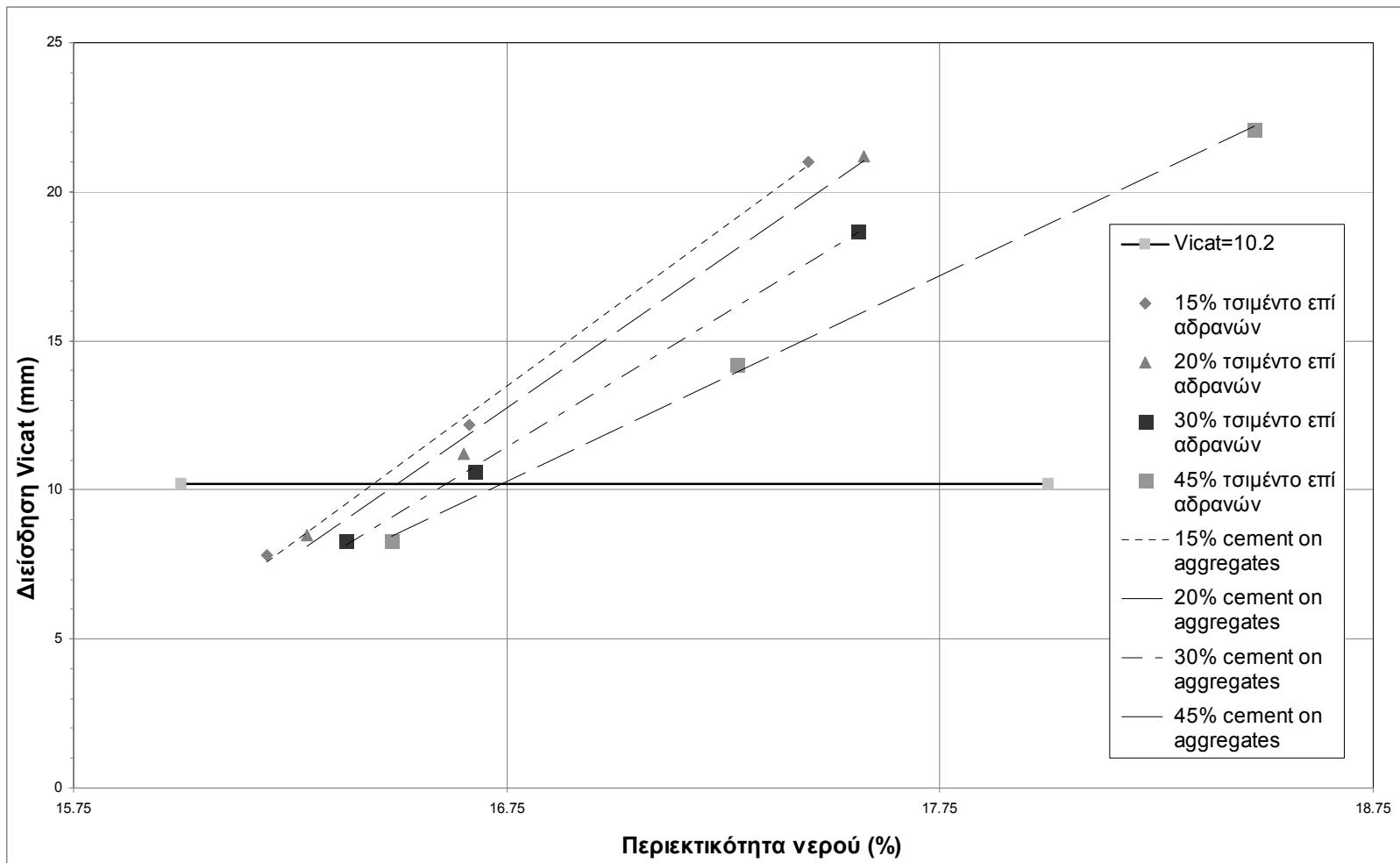
Παρασκευή των δοκιμών

Η ανάμιξη έγινε σε εργαστηριακό αναμικτήρα με σταδιακή προσθήκη νερού-πρόσθετων έως την επίτευξη του ιδανικού Vicat με βάση το νομόγραμμα.

Προσδιορισμός φυσικών ιδιοτήτων δοκιμών

Για τις συνθέσεις αυτές κρίθηκε απαραίτητος ο προσδιορισμός της αντοχής τους εκτός από την μονοαξονική θλίψη και στην κάμψη, σύμφωνα με την μέθοδο «φόρτισης τριών σημείων» (3 δοκίμια διαστάσεων 4x4x16cm³ ανά ανάμιγμα).

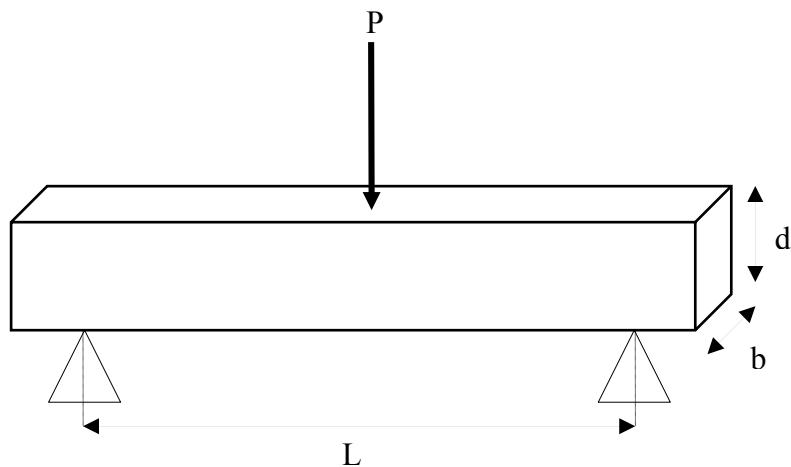
Μετά την ωρίμανση και αφού ακολουθήθηκε ακριβώς το ίδιο πρωτόκολλο πειραματικών μετρήσεων όπως και στα δοκίμια δοκιμής αντοχής σε μονοαξονική θλίψη, το εκάστοτε δοκίμιο τοποθετήθηκε εντός κελίου φόρτισης «τριών σημείων» της εταιρείας MATEST, όπου και φορτίστηκε σε πρέσας ψηφιακής καταγραφής του οίκου Material Testing μέχρι αστοχίας του. Οι ράβδοι έδρασης του κελίου απέχουν 10cm, ενώ η κινητή ράβδος, που εξαναγκάζει το δοκίμιο σε κάμψη, ισαπέχει των άλλων δύο σε οριζόντια προβολή.



Σχήμα 3.9: Νομογράμματα Vicat για τις πλαστικές μάζες με τις διαφορετικές περιεκτικότητες τσιμέντου. Η οριζόντια γραμμή αντιπροσωπεύει την πρότυπη τιμή που αντιστοιχεί σε Pfeffer-Korn =2.

Η τιμή της τάσης στα εξωτερικά όρια του υπό κάμψη ραβδόμορφου δοκιμίου, υπολογίζεται για το μέσο του μήκους του από την σχέση:

$$\sigma_f = \frac{3 \cdot P \cdot L}{2 \cdot b \cdot d^2}$$



Σχήμα 3.10: Σχηματικό διάγραμμα της διάταξη φόρτισης για τη δοκιμή της σε κάμψης τριών σημείων.

όπου: σ_f , η τιμή της τάσης στα εξωτερικά όρια του υπό κάμψη ραβδόμορφου δοκιμίου (MPa),

P , το φορτίο αστοχίας του υπό κάμψη ραβδόμορφου δοκιμίου (MPa),

L , το έκταμα έδρασης του υπό κάμψη ραβδόμορφου δοκιμίου (mm),

b , το πλάτος του υπό κάμψη ραβδόμορφου δοκιμίου (mm), και

d , το ύψος του υπό κάμψη ραβδόμορφου δοκιμίου (mm)

Η τιμή της αντοχής σε κάμψη αποτελεί σημαντική παράμετρο για τον προσδιορισμό της πιθανής εμπορικής χρήσης της εκάστοτε σύνθεσης. Οι εργαστηριακές μετρήσεις δίνονται στον πίνακα 3.2.

Παρατηρήσεις

Λόγω της αυξημένης συμμετοχής του υπερευστοποιητή στο συνολικό κόστος του πολφού, δοκιμάστηκε η προσθήκη του σε δοσολογία επί του συνόλου του τιμέντου, όπως προτείνει η κατασκευάστρια εταιρεία για την παρασκευή κοινών σκυροδεμάτων. Όμως οι προκύπτουσες αντοχές εμφανίστηκαν σημαντικά υποβιβασμένες και η πρακτική αυτή χρήζει λεπτομερέστερης ανάλυσης κόστους/απόδοσης. Ευνοϊκότερες εμφανίζονται οι συνθέσεις 30% και 45% σε τιμέντο, αν και ανάλογα την χρήση μπορεί να καθίστανται ικανοποιητικές και χαμηλότερες τιμές αντοχών, άρα και περιεκτικότητες σε τιμέντο.

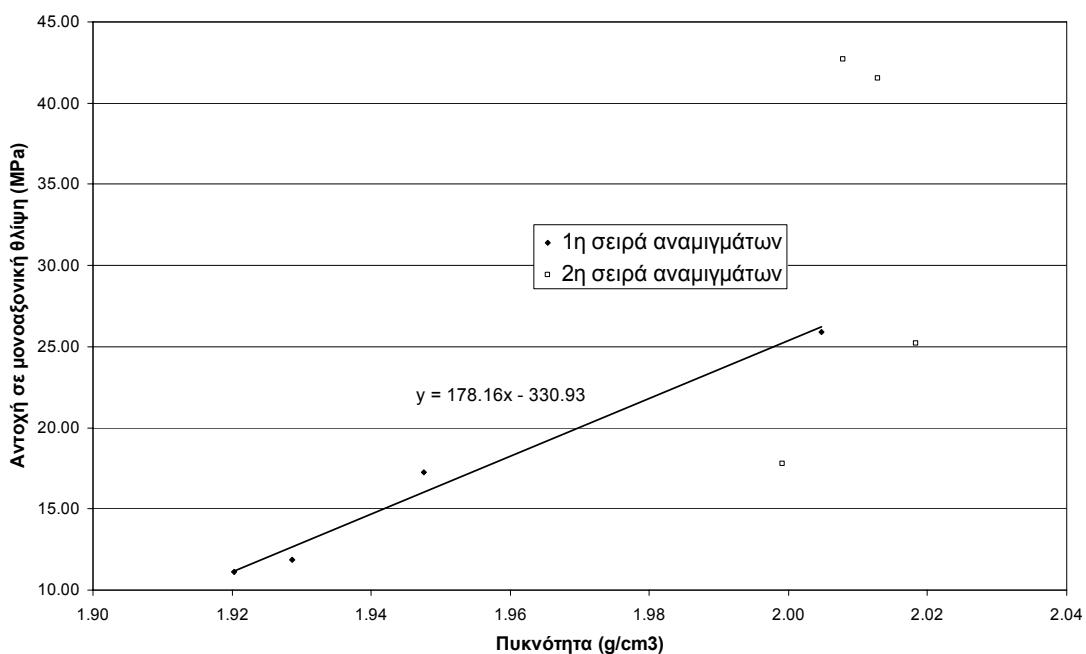
Η τεχνική αυτή χαρακτηρίζεται πολύ απλούστερη στην εφαρμογή της από την διαμόρφωση υπό πίεση, αν και τα κόστη πάγιου εξοπλισμού μπορεί να αποδειχθούν συγκρίσιμα για της δύο περιπτώσεις. Υπό συνθήκες, η μέθοδος αυτή μπορεί να χειριστεί και υψηλής υγρασίας παιπάλη, χωρίς την ανάγκη ενεργοβόρου ξήρανσης, αν ορισθεί συσχέτιση π.χ. μεταξύ απόλυτης υγρασίας και καταναλισκόμενης ισχύος (ή έντασης ρεύματος κινητήρα) ανάμιξης πλαστικής μάζας. Θεωρείται βέβαιο πως οι εν λόγω συνθέσεις εάν εξωθηθούν από μηχανή αντλίας κενού θα δώσουν βελτιωμένες τιμές αντοχής και υδατοαπορρόφησης, λόγω της ουσιαστικής εξάλειψης του μακροπορώδους. Παρόλα αυτά, οι τιμές υδατοαπορρόφησης που μετρήθηκαν δύνανται να υποβιβαστούν περαιτέρω με προσθήκη στεγανωτικού μάζας στο ανάμιγμα.

Πίνακας 3.2: Συνθέσεις δοκιμών που προέκυψαν από τη δημιουργία πλαστικών μαζών και υπολογισμός των βασικών φυσικομηχανικών τους χαρακτηριστικών

ΦΑΣΕΙΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗΣ	ΚΩΔΙΚΟΣ ΑΝΑΜΕΙΓΜΑΤΟΣ	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ					ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ				
		ΣΥΝΘΕΣΗ			ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ		Μέση αντοχή σε μον/αξονική θλίψη (MPa)	Μέσο μέτρο ελαστας του YOUNG (GPa)	Μέση αντοχή σε κάμψη (δοκιμή τριών σημείων) (MPa)	Πυκνότητα (g/cm ³)	Υδατοαπορρόφηση (%)
		Είδος αδρανούς	Τσιμέντο επί αδρανών (%)	Νερό επί στερεών (μη ξηρών) (%)	Δοσολογία υπερ/ητή	Δοσολογία πλασ/ητή					
ΔΙΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΦΑΣΗ	0ΠΜε/εE29.88	έγχρωμη παιπάλη (50/50)	0.00	29.88	ελάχιστη	ελάχιστη	0.32	0.002	0,04	1,70	23,60
	18.75ΠΜμ/μΕ	έγχρωμη παιπάλη (50/50)	18.75	-	μέση επί συνόλου τσιμέντου	μέση	3.97	0.44	0,59	1,82	22,97
	18.75ΠΜ(ε/ε)Ε	έγχρωμη παιπάλη (50/50)	18.75	-	ελάχιστη επί συνόλου τσιμέντου	ελάχιστη	3.75	0.44	0,51	1,80	23,38
	18.75ΠΜ(ε/Μ).Ε	έγχρωμη παιπάλη (50/50)	18.75	-	ελάχιστη επί συνόλου τσιμέντου	μέγιστη	5.04	1.01	0,76	1,87	23.04
	18.75ΠΜ(Μ/Μ)Ε	έγχρωμη παιπάλη (50/50)	18.75	-	μέγιστη επί συνόλου τσιμέντου	μέγιστη	4.04	0.94	0,62	1,89	22,21
ΕΚΤΕΝΗΣ ΦΑΣΗ	15ΠΜ(Μ/Μ)Ε20	έγχρωμη παιπάλη (50/50)	15.00	20.00	μέγιστη επί συνόλου στερεών (δηλ. λεπτομερών)	μέγιστη	8.59	0.68	1,31	1,81	17.15
	15ΠΜ(Μ/Μ)Ε25	έγχρωμη παιπάλη (50/50)	15.00	25.00	μέγιστη επί συνόλου στερεών (δηλ. λεπτομερών)	μέγιστη	6.27	0.59	0,96	1,72	18.92
ΤΕΛΙΚΗ ΦΑΣΗ	15ΠΜ(Μ/Μ)Ε16.2	έγχρωμη παιπάλη (50/50)	15.00	16.20	μέγιστη επί συνόλου στερεών (δηλ. λεπτομερών)	μέγιστη	11.10	1.01	1.79	1.92	14.77
	15ΠΜ(Μτ/Μ)Ε16.2	έγχρωμη παιπάλη (50/50)	15.00	17.79	μέγιστη επί συνόλου τσιμέντου	μέγιστη	9.17	1.00	1,49	1,91	19,44

ΤΕΛΙΚΗ ΦΑΣΗ (συνέχεια)	20ΠΜ(Μ/Μ)Ε16.50	έγχρωμη παιπάλη (50/50)	20.00	16.50	μέγιστη επί συνόλου στερεών (δηλ. λεπτομερών)	μέγιστη	11.86	0.71	3.14	1.93	17.36
	30ΠΜ(Μ/Μ)Ε17.25	έγχρωμη παιπάλη (50/50)	30.00	17.25	μέγιστη επί συνόλου στερεών (δηλ. λεπτομερών)	μέγιστη	17.25	1.56	2.72	1.95	12.39
	45ΠΜ(Μ/Μ)Ε17.23	έγχρωμη παιπάλη (50/50)	45.00	17.23	μέγιστη επί συνόλου στερεών (δηλ. λεπτομερών)	μέγιστη	25.91	2.34	2.50	2.00	10.70
	15ΠΜ(Μ/Μ)Ε16.52	έγχρωμη παιπάλη (50/50)	15.00	16.52	μέγιστη επί συνόλου στερεών (δηλ. λεπτομερών)	μέγιστη	17.79	1.37	3.67	2.00	12.85
	20ΠΜ(Μ/Μ)Ε16.63	έγχρωμη παιπάλη (50/50)	20.00	16.63	μέγιστη επί συνόλου στερεών (δηλ. λεπτομερών)	μέγιστη	25.18	1.71	4.48	2.02	11.48
	30ΠΜ(Μ/Μ)Ε17.46	έγχρωμη παιπάλη (50/50)	30.00	17.46	μέγιστη επί συνόλου στερεών (δηλ. λεπτομερών)	μέγιστη	41.56	3.64	5.46	2.01	10.51
	45ΠΜ(Μ/Μ)Ε16.88	έγχρωμη παιπάλη (50/50)	45.00	16.88	μέγιστη επί συνόλου στερεών (δηλ. λεπτομερών)	μέγιστη	42.70	3.84	7.47	2.01	7.47
	30ΠΜ(Μτ/Μ)Λ25.23	έγχρωμη παιπάλη (50/50)	30.00	19.17	μέγιστη επί συνόλου τσιμέντου	μέγιστη	24.81	2.17	4.10	2.01	12.07

Η συσχέτιση του πυκνότητας του τελικού (ώριμου) προϊόντος, με την τελική αντοχή του για της τέσσερις τελευταίες αναμίξεις της τελικής φάσης, παρουσιάζεται ισχυρά γραμμική, κάτι που δεν ισχύει για τις υπόλοιπες αναμίξεις της ίδιας φάσης (Σχήμα 3.11). Το φαινόμενο αυτό μπορεί να αποδοθεί στην τελειοποίηση των διαδικασιών ανάμιξης και διαμόρφωσης των δοκιμών για την τελευταία σειρά αναμιγμάτων στις τέσσερις περιεκτικότητες τσιμέντου, λόγω της εμπειρίας που είχε πια συσσωρευτεί όσον αφορά τις διεργασίες εξώθησης.



Σχήμα 3.11: Συσχέτιση πυκνότητας και τελικής αντοχής σε μονοαξονική θλίψη.

Ο παραπάνω σχέσεις είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν για την αρχική προσέγγιση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη συνθέσεων με μέτρηση της πυκνότητας των σκληρυμένων δοκιμών.

Η επίδραση του περιεχόμενου νερού, άρα και του εκάστοτε λόγου νερού /τσιμέντου, στην αντοχή σε μονοαξονική θλίψη αποδεικνύεται φθίνουσα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.12. Η σχέση που προέκυψε από την παλινδρόμιση 2^{ον} βαθμού και απεικονίζεται στο Σχήμα 3.12 μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αρχική προσέγγιστική εκτίμηση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη συνθέσεων με βάση το λόγο νερό/τσιμέντο. Δίνει δε καλύτερο συντελεστή R² από την γραμμική παρεμβολή.

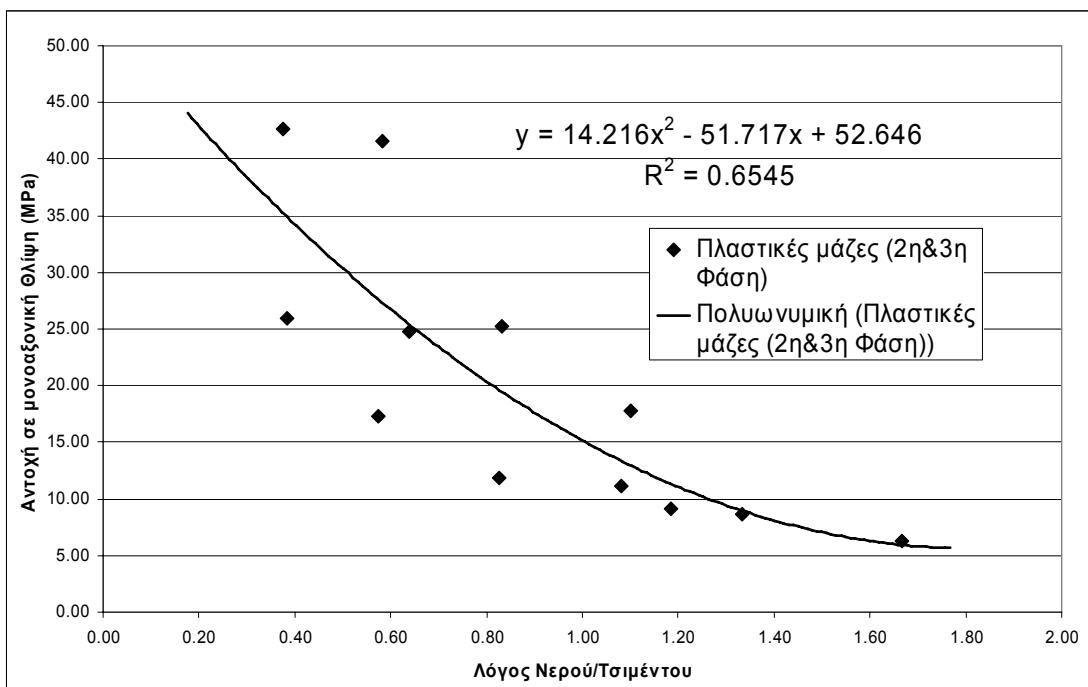
Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα κρίνεται ότι οι συνθέσεις 30ΠΜ(Μ/Μ)Ε17.46 και 45ΠΜ(Μ/Μ)Ε16.88 μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή εμφανών διακοσμητικών στοιχείων με πολύπλοκη γεωμετρία, καθώς και φέροντων δομικών

στοιχείων, δεδομένης της υψηλής μηχανικής αντοχής τους. Απαραίτητη παρόλα αυτά κρίνεται η περαιτέρω διερεύνηση σε ημιβιομηχανική κλίμακα.

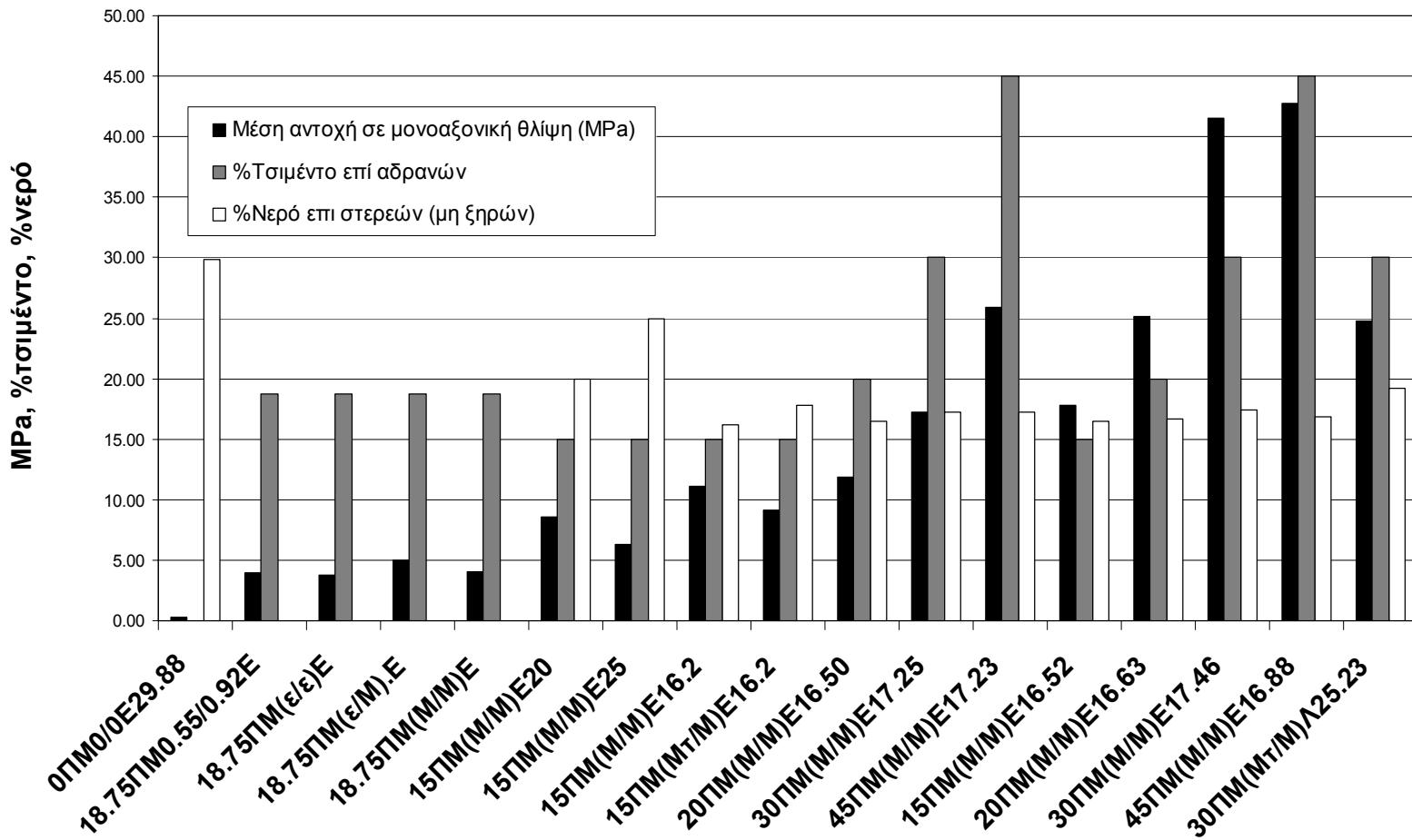
3.4 Προσδιορισμός αντοχής σε τεχνητή γήρανση

3.4.1 Εργαστηριακός εξοπλισμός - Διαδικασία μέτρησης

Για να ελεγχθεί η αντοχή των συνθέσεων που παρασκευάστηκαν στην επίδραση των κλιματικών αλλαγών και την πάροδο του χρόνου, αυτά τοποθετήθηκαν εντός κλιματικού θαλάμου, όπου υποβλήθηκαν σε κύκλους προδιαγεγραμμένων μεταβολών θερμοκρασίας και υγρασίας, τη βοήθεια κλιματικού θαλάμου τεχνητής γήρανσης υλικών. Για σύγκριση της συμπεριφοράς των συνθέσεων με αντίστοιχο φυσικό δομικό υλικό παρόμοιας υφής και χρήσης, μεταξύ των δοκιμών τοποθετήθηκαν και δοκίμια μικριτικού ασβεστολίθου («Αλφόπετρα Ρεθύμνου»), υλικό που χρησιμοποιείται ευρύτατα ως φυσικός δομικός λίθος. Η επιλογή του συγκεκριμένου υλικού έγινε λόγω της δομής του ομοιότητας (πολύ μικρό μέγεθος κόκκων, σχετικά υψηλό πορώδες και παραπλήσια χημική σύσταση με την παιπάλη) με τα παρασκευαζόμενα δοκίμια με βάση της ασβεστολιθική παιπάλη.



Σχήμα 3.12: Συσχέτιση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη, με τον λόγο νερού/τσιμέντου (δοκίμια ωρίμανσης 28 ημερών).



Σχήμα 3.13: Συγκριτικό ραβδόγραμμα που απεικονίζει την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, την περιεκτικότητα σε νερό και την περιεκτικότητα σε τσιμέντο των παρασκευασθέντων δοκιμών κατά το 2^ο στάδιο πειραματικής διερεύνησης.

Τα δοκίμια των συνθέσεων 15.79Σ43.33Λ/A10.20 και 45ΠΜ(Μ/Μ)Ε16.88, προ της διεξαγωγής της δοκιμής γήρανσης, παρουσιάζουν παρόμοια αρχική υδατοαπορρόφηση (8.86% και 7.47% αντίστοιχα), ενώ η 30ΠΜ(Μ/Μ)Ε17.46, υψηλότερη (10.51%). Η υδατοαπορρόφηση του μικριτικού ασβεστολίθου («αλφόπετρα») μετρήθηκε σε 13.75%.

Η μονάδα κλιματικού θαλάμου που διαθέτει το Πολυτεχνείο Κρήτης είναι του τύπου Angelantoni Industrie GTS600.

Λόγω απουσίας κάποιου αντιπροσωπευτικού προφίλ θερμοκρασιακής/υγρασιακής μεταβολής για τον γεωγραφικό χώρο της Κρήτης, ακολουθήθηκε ειδικό προφίλ ψύξης/θέρμανσης, το οποίο βασίστηκε στην δοκιμή αντοχής σε ψύξη για φυσικούς λίθους (EN12371) και σε δοκιμή θερμικού πλήγματος για θερμοκρασιακό εύρος αντιπροσωπευτικό της γεωγραφικής περιοχής της Κρήτης.

Τα δοκίμια πριν εισαχθούν στον κλιματικό θάλαμο ζυγίστηκαν εν ξηρώ (δύο 24ωρα στους $60\pm3^{\circ}\text{C}$) και κατόπιν παρέμειναν βυθισμένα για 48 h σε απιονισμένο νερό στους $23\pm1^{\circ}\text{C}$. Μετά από την ολοκλήρωση αυτής της περιόδου τριχοειδούς αναρρόφησης τα δοκίμια ζυγίστηκαν και τοποθετήθηκαν εντός του θαλάμου τεχνητής γήρανσης σε θερμοκρασία 17°C και σχετική υγρασία $\geq95\%$ για 48h και στην συνέχεια άρχισε η εφαρμογή των κύκλων ψύξης/θέρμανσης.

Οι κύκλοι θέρμανσης/ψύξης που εφαρμόστηκαν αποτελούνταν από τα εξής επιμέρους στάδια:

- Παραμονή στους 17°C για 30min σε συνθήκες υγρασίας $\geq95\%$ και ακόλουθη ψύξη έως της θερμοκρασίας των -5°C με ρυθμό $0,167^{\circ}\text{C}/\text{min}$ (συνολικός χρόνος μεταβολής 2,196 h).
- Στην συνέχεια ακολουθούσε θέρμανση μέχρι τους 45°C πάλι με ρυθμό $0,167^{\circ}\text{C}/\text{min}$ (συνολικός χρόνος μεταβολής 4.990 h),
- Μετά πάλι ψύξη μέχρι την αρχική θερμοκρασία των 17°C (συνολικός χρόνος μεταβολής 2.794 h), πάντα με τον ίδιο ρυθμό μεταβολής της θερμοκρασίας.
- Ο κύκλος συμπληρωνόταν με παραμονή των δοκιμών στους 17°C για 30sec σε συνθήκες υγρασίας $\geq95\%$.

Σε όλη την διάρκεια του κύκλου στον χώρο του θαλάμου συντηρούνταν περίσσεια υδρατμών με στόχο τον υψηλό κορεσμό της ατμόσφαιρας στις αντίστοιχες

θερμοκρασίες. Ο χρόνος διεξαγωγής μιας πλήρους κυκλικής δοκιμής ήταν 10h 58min και 48s.

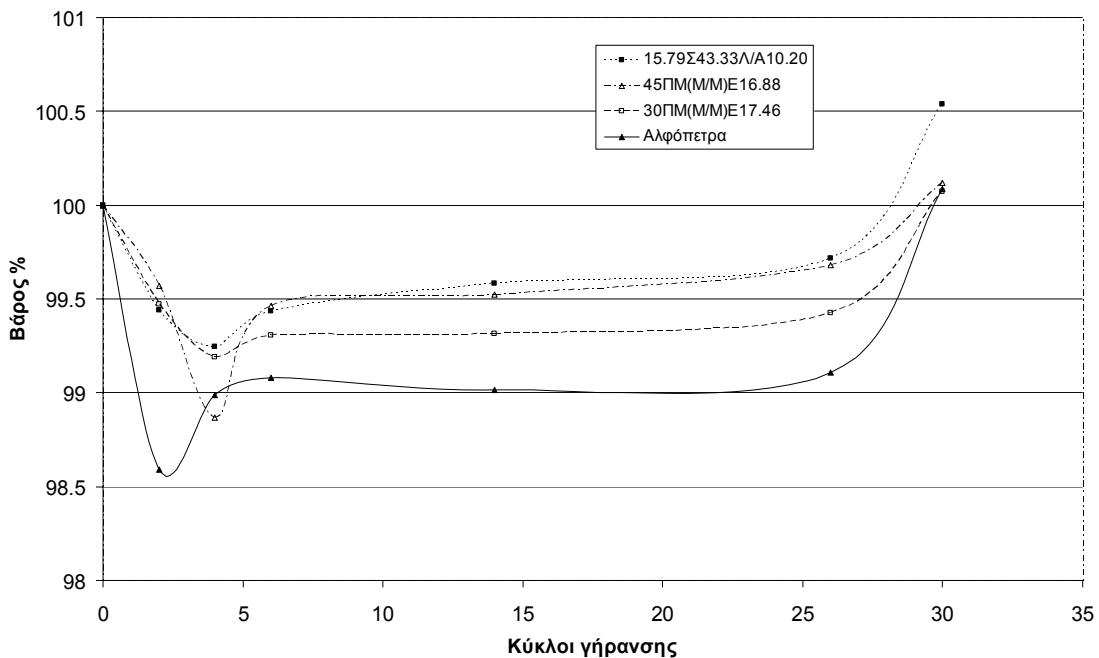
Μετά την πάροδο ακέραιου αριθμού κύκλων τα δοκίμια ζυγίζονταν και φωτογραφίζονταν, ώστε να είναι δυνατή η παρατήρηση της φθοράς που υφίστανται κατά την πάροδο των κύκλων. Τα αποτέλεσματα που σχετίζονται με τη μεταβολή του βάρους των δοκιμών (μέσος όρος 6 δειγμάτων ανά εξεταζόμενη σύνθεση) παρουσιάζονται αναλυτικά στον πίνακα 3.3.

Πίνακας 3.3: Εξέλιξη του βάρους των δοκιμών εκφρασμένου ως ποσοστού του αρχικού τους βάρους κατά την διάρκεια της δοκιμής τεχνητής γήρανσης.

Κωδικός	Αριθμός κύκλων					
	0	2	4	6	14	26
	Βάρος ως ποσοστό % του αρχικού					
15.79Σ43.33Λ/A10.20	100	99,44048	99,24699	99,43368	99,58133	99,71879
45ΠΙΜ(Μ/Μ)Ε16.88	100	99,30531	98,30548	99,07184	98,97535	99,00418
30ΠΙΜ(Μ/Μ)Ε17.46	100	99,3232	99,03152	99,12163	98,97332	99,02503
Αλφόπετρα	100	99,32066	98,9522	99,04099	98,98129	99,02556

Πίνακας 3.4: Μεταβολή των τιμών αντοχής σε ανεμπόδιστη μονοαξονική θλίψη και υδατοαπορρόφησης πριν και μετά την συμπλήρωση 26 κύκλων κατά την δοκιμή τεχνητής γήρανσης.

Κωδικός	Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη πριν τη γήρανση (MPa)	Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη μετά τη γήρανση (MPa)	Υδατο-απορρόφηση πριν τη γήρανση (%)	Υδατο-απορρόφηση μετά τη γήρανση (%)
45ΠΙΜ(Μ/Μ)Ε16.88	42.7	49.72	7.47	6.39
30ΠΙΜ(Μ/Μ)Ε17.46	41.56	42.90	10.51	9.59
Αλφόπετρα	18.81	18.14	13.75	14.01



Σχήμα 3.14: Εξέλιξη του βάρους των δοκιμίων των προτεινόμενων συνθέσεων, εκφρασμένου ως ποσοστού του αρχικού τους βάρους, κατά την διάρκεια της δοκιμής τεχνητής γήρανσης.



Σχήμα 3.15: Τα δοκίμια της σύνθεσης 45ΠM(M/M)E, προ και μετά την επιβολή 26 κύκλων ψύξης - θέρμανσης.

3.4.2 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Από την καμπύλη εξέλιξης του βάρους των δοκιμίων κατά την πάροδο των κυκλικών δοκιμών ψύξης/θέρμανσης, μπορούν να εξαχθούν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Τα δοκίμια όλων των συνθέσεων και της αλφόπετρας παρουσιάζουν μια αυξομείωση του βάρους τους έως τον 6^ο κύκλο γεγονός που οφείλεται στην αλλαγή της περιεχόμενης υγρασίας των δοκιμίων καθόσον προσαρμόστηκαν στις

συνθήκες του θαλάμου ελέγχου. Συγκεκριμένα αυτό οφείλεται στην μεταβολή του κορεσμού σε υδρατμούς από την σταθερή θερμοκρασία των 17°C, στον οποίο είχαν υποβληθεί τα δοκίμια για 48h προ της έναρξης της δοκιμής, στον βαθμό κορεσμού που δύνανται να επιτύχουν οι εκάστοτε συνθέσεις, μετά την υποβολή τους στην συγκεκριμένη κυκλική δοκιμή.

- Από τον 6° κύκλο και μετά παρατηρείται μια πολύ αργή και μικρή αύξηση του βάρους, η οποία οφείλεται, όπως αναφέρετε και βιβλιογραφικά (Μαυριγιαννάκης, 2004), σε δημιουργία δευτερογενών αλάτων εντός των πόρων των δοκιμών, κάτι που έγινε εμφανές και επιφανειακά σε κάποια από αυτά με την εμφάνιση λευκών ή υπόλευκων επικαλύψεων.
- Τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν με συμπίεση σε υψηλή πίεση (κωδικός 15.79Σ43.33Λ/A10.20) παρουσιάζουν διαφορετική συμπεριφορά κατά τη δοκιμή σε σχέση με τα υπόλοιπα και την αλφόπετρα, αφού αυξάνουν το βάρος τους με σχετικά υψηλότερο ρυθμό. Το γεγονός σχετίζεται με το πολύ μικρότερο λόγο νερού/τσιμέντου που χρησιμοποιήθηκε στην τεχνική αυτή που σε συνδυασμό με την πολύ υψηλή συμπίεση αυξάνουν πολύ το χρόνο ωρίμανσης του δοκιμίου.
- Τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν με τη διαδικασία της δημιουργίας πλαστικών μαζών (κωδικοί 45ΠΜ(Μ/Μ)E16.88 και 30ΠΜ(Μ/Μ)E17.46) αύξησαν την αντοχή τους (ιδιαίτερα στη σύνθεση με το υψηλό ποσοστό τσιμέντου) σε μονοαξονική θλίψη λόγω ωρίμανσης ενώ η διαδικασία της γήρανσης δεν φάνηκε στους 25 κύκλους να επηρεάζει καθόλου τις μηχανικές τους ιδιότητες. Η υδατοαπορρόφηση παρέμεινε και αυτή στα ίδια επίπεδα.
- Μετά την συμπλήρωση των 25 κύκλων μακροσκοπικά δεν παρατηρήθηκαν απολεπίσεις ή αποφλοιώσεις επιφανειών ή αποσπάσεις τεμαχιδίων από ακμές. Οι χρωματικές αλλοιώσεις ήταν πολύ περιορισμένες σε έκταση και δεν εμφανίστηκαν σε όλα τα δοκίμια.

Θα μπορούσαμε να συνοψίσουμε, πως μετά την συμπλήρωση των 25 κύκλων που αναφέρονται βιβλιογραφικά ως ο ελάχιστος προτεινόμενος αριθμός για έλεγχο, δεν παρατηρείται υποβιβασμός των κύριων φυσικομηχανικών ιδιοτήτων των δοκιμών που ελέγχηκαν. Οι παρατηρούμενες αλλαγές του βάρους και των αντοχών βιβλιογραφικά (Μαυριγιαννάκης, 2004) αποδίδονται στην δημιουργία δευτερογενών φάσεων αλάτων, εντός των πόρων, αλλά και στην εξέλιξη, σε περίσσεια ύδατος, των

αντιδράσεων ενυδάτωσης της φάσης του τσιμέντου, η οποίες δεν είχαν τερματιστεί μετά την συμβατική περίοδο ωρίμανσης των 28 ημερών. Η ερμηνεία αυτή πιστοποιείται και από την μικρή αλλά σταθερή αύξηση του βάρους των δοκιμών, μετά τον 6^ο κύκλο, κατά την εξέλιξη της δοκιμής γήρανσης. Στην περίπτωση του φυσικού λίθου («Αλφόπετρα» περιοχής Ρεθύμνου), η μεταβολές είναι αμελητέες και μπορούν να θεωρηθούν με ασφάλεια εντός του στατιστικού σφάλματος της μεθόδου.

4 ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΗ ΟΙΚΟΝΟΜΟΤΕΧΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΩΝ ΧΡΗΣΕΩΝ ΤΗΣ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΙΚΗΣ ΠΑΙΠΑΛΗΣ

4.1 Προτεινόμενη χρήση: Δαπεδόστρωση υψηλής αντοχής - χαμηλής υδατοαπορρόφησης (προϊόν προς παραγωγή: κυβόλιθοι)

Λαμβάνοντας υπόψη το συνολικό συσσωρευόμενο φορτίο παιπάλης, του συνόλου των βιομηχανιών του κλάδου εντός της βιομηχανικής ζώνης Ηρακλείου, όπου και λειτουργεί η Ασφαλτική Α.Ε., διερευνήθηκε η χρήση 1000 t/yr λεπτομερούς ασβεστολιθικού παραπροϊόντος με την τεχνολογία της διαμόρφωσης υπό πίεση υφυγρού μίγματος παιπάλης/τσιμέντου, για την παραγωγή κυβολίθων διάστρωσης εξωτερικών επιφανειών (σύνθεση 15.79Σ43.59Λ/Α10.00).

Μετά από έρευνα στην διεθνή αγορά μηχανημάτων βιομηχανικής εφαρμογής της τεχνικής αυτής έγιναν οι εξής παραδοχές:

- Τιμή αγοράς πρέσας διαμόρφωσης κυβολίθων: 75000€.
- Έτη απόσβεσης: 6
- Υπολειμματική αξία: 7500€.
- Κόστος ενέργειας και συντήρησης: 20% του κόστους κεφαλαίου.
- Ετήσια αμοιβή και ασφαλιστικές επιβαρύνσεις προσωπικού: 20000€/άτομο.
- Ονομαστική παραγωγικότητα πρέσας αυτής της αξίας: 1000 τεμ/ώρα.
- Πρακτικά επιτεύξιμη παραγωγικότητα σε συνθήκες εργοταξίου: 750 τεμ/ώρα.
- Διαστάσεις κυβολίθου: 100x200x60mm.

Με επεξεργασία των παραπάνω δεδομένων και αφού υπολογίστηκε το ετήσιο κόστος κεφαλαίου, το ετήσιο κόστος λειτουργίας του μηχανήματος, το πλήθος των παραγομένων κυβολίθων ανά έτος, η επιθυμητή διαθεσιμότητα του μηχανήματος, ο αριθμός του απαιτούμενου προσωπικού, τελικά συντάχθηκε ο ακόλουθος συγκεντρωτικός πίνακας:

Πίνακας 4.1: Πίνακας στοιχείων κόστους.

Προτεινόμενη χρήση:	Δαπεδώστρωση υψηλής αντοχής - χαμηλής υδατοαπορρόφησης			
Προϊόν προς παραγωγή:	Κυβόλιθοι			
<u>Κόστος αγοράς εξοπλισμού:</u>	75000			
<u>Έτη απόσβεσης:</u>	6			
<u>Υπολειμματική αξία:</u>	7500			
Επήσιο κόστος κεφαλαίου (€/έτος):	11250			
<u>Χρόνος λειτουργίας επησίως (% του συνολικού):</u>	50			
<u>Ποσοστό επί του κόστους κεφαλαίου (%):</u>	20			
Κόστος ενέργειας και συντήρησης (€/έτος):	7500			
<u>Αριθμός εργαζομένων:</u>	2			
<u>Επίσια αμοιβή και ασφαλιστικές επιβαρύνσεις (€):</u>	20000			
<u>Χρόνος εργασίας επησίως (% του συνολικού):</u>	100			
Κόστος εργατικών (€/έτος):	40000			
Παραγωγή (τεμ./έτος):	4125000			
Κόστος πρώτων υλών, προ Φ.Π.Α. (€/kg)				
<u>Παπάλη:</u>	0.00			
<u>Άμμος:</u>	0.00545			
<u>Τσιμέντο:</u>	0.1			
<u>Νερό:</u>	0.01			
<u>Υπερευεστοποιητής:</u>	-			
<u>Υπερπλαστικοποιητής:</u>	-			
<u>Στεγανωτικό μάζας 1 (υγρό):</u>	-			
<u>Στεγανωτικό μάζας 2 (στερεό):</u>	1.1			
Τελικό κόστος μονάδας (€/m²):	5.03			
Τιμή ανταγωνιστικού εμπορικού προϊόντος (προ Φ.Π.Α.) (€/m ²):	8.9*			
Σύγκριση τεχνικών προδιαγραφών				
	Αντοχή σε ανεμπόδιστη μονοαξονική θλίψη (DIN 18501), μέσος όρος (Mpa)	Αντοχή σε ανεμπόδιστη μονοαξονική θλίψη (DIN 18501), μέσος όρος (Mpa)	Υδαταπορρόφηση (ΕΛΟΤ EN 1338), μέσος όρος (% κ.β.)	Υδαταπορρόφηση (ΕΛΟΤ EN 1338), μεμονωμένο δείγμα (% κ.β.)
Προτεινόμενο προϊόν	≥31.3	≥29.5	≤9	≤9.34
Υπάρχον εμπορικό προϊόν	≥35	≥30	≤7	≤8

* Πηγή: ΤΣΙΜΕΝΤΟΔΟΜΗ Α.Ε., προϊόν: κυβόλιθος 7X10X20cm άγχρωμος

4.2 Προτεινόμενη χρήση: Δαπεδόστρωση υψηλής αντοχής - χαμηλής υδατοαπορρόφησης (προϊόν προς παραγωγή: πλάκες εξωτερικής διάστρωσης)

Διερευνήθηκε η χρήση 1500 t/yr λεπτομερούς ασβεστολιθικού παραπροϊόντος με την τεχνολογία της διαμόρφωσης υπό πίεση υφυγρού μίγματος παιπάλης/τσιμέντου, για την παραγωγή πλακών διάστρωσης εξωτερικών επιφανειών (σύνθεση 15.79Σ43.59Λ/A10.00).

Σε αντιστοιχία με την ανάλυση της προηγουμένης παραγράφου, έγιναν οι εξής παραδοχές:

- Τιμή αγοράς πρέσας διαμόρφωσης κυβολίθων: 75000€.
- Έτη απόσβεσης: 6
- Υπολειμματική αξία: 7500€.
- Κόστος ενέργειας και συντήρησης: 20% του κόστους κεφαλαίου.
- Ετήσια αμοιβή και ασφαλιστικές επιβαρύνσεις προσωπικού: 20000€/άτομο.
- Ονομαστική παραγωγικότητα πρέσας αυτής της αξίας: 160 τεμ/ώρα.
- Πρακτικά επιτεύξιμη παραγωγικότητα σε συνθήκες εργοταξίου: 120 τεμ/ώρα.
- Διαστάσεις πλάκας: 500x500x45mm.

Έτσι, αφού υπολογίστηκε το ετήσιο κόστος κεφαλαίου, το ετήσιο κόστος λειτουργίας του μηχανήματος, το πλήθος των παραγομένων πλακών ανά έτος, η επιθυμητή διαθεσιμότητα του μηχανήματος, ο αριθμός του απαιτούμενου προσωπικού, τελικά συντάχθηκε ο ακόλουθος συγκεντρωτικός πίνακας:

Πίνακας 4.2: Πίνακας στοιχείων κόστους.

Προτεινόμενη χρήση:	Δαπεδώστρωση υψηλής αντοχής - χαμηλής υδατοαπορρόφησης			
Προϊόν προς παραγωγή:	Πλάκες εξωτερικής διάστρωσης			
Κόστος αγοράς εξοπλισμού:	75000			
Έπι απόσβεσης:	6			
Υπολειμματική αξία:	7500			
Επίσιο κόστος κεφαλαίου (€/έτος):	11250			
Χρόνος λειτουργίας επησίως (% του συνολικού):	50			
Ποσοστό επτί του κόστους κεφαλαίου (%) :	20			
Κόστος ενέργειας και συντήρησης (€/έτος):	7500			
Αριθμός εργαζομένων :	2			
Επήσια αμοιβή και ασφαλιστικές επιβαρύνσεις (€):	20000			
Χρόνος εργασίας επησίως (% του συνολικού):	80			
Κόστος εργατικών (€/έτος):	32000			
Παραγωγή (τεμ./έτος):	780800			
Κόστος πρώτων υλών, προ Φ.Π.Α. (€/kg)				
Παιπάλη:	0.00			
Άμμος:	0.00545			
Τσιμέντο:	0.1			
Νερό:	0.01			
Υπερρευστοποιητής:	-			
Υπερπλαστικοποιητής:	-			
Στεγανωτικό μάζας 1 (υγρό):	-			
Στεγανωτικό μάζας 2 (στερεό):	1.1			
Τελικό κόστος μονάδας (€/m²):	3.3			
Τιμή ανταγωνιστικού εμπορικού προϊόντος (προ Φ.Π.Α.) (€/m²):	10.8*			
Σύγκριση τεχνικών προδιαγραφών	Αντοχή σε ανεμπόδιστη μονοαξονική θλίψη (DIN 18501), μέσος όρος (Mpa)	Αντοχή σε ανεμπόδιστη μονοαξονική θλίψη (DIN 18501), μεμονωμένο δείγμα (Mpa)	Υδαταπορρόφηση (ΕΛΟΤ EN 1338), μέσος όρος (% κ.β.)	Υδαταπορρόφηση (ΕΛΟΤ EN 1338), μεμονωμένο δείγμα (% κ.β.)
Προτεινόμενο προϊόν:	≥31.3	≥29.5	≤9	≤9.34
Υπάρχον εμπορικό προϊόν:	≥5	≥4	≤7	≤8

* Πηγή: ΤΣΙΜΕΝΤΟΔΟΜΗ Α.Ε., προϊόν: κυβόλιθος 7X10X20cm άγχρωμος

4.3 Προτεινόμενη χρήση: Εμφανής φέρουσα εσωτερική τοιχοποιία (προϊόν προς παραγωγή: τούβλα εξωθούμενα με 30% τσιμέντο)

Διερευνήθηκε η χρήση 1000 t/yr λεπτομερούς ασβεστολιθικού παραπροϊόντος με την τεχνολογία της εξώθησης πλαστικής μάζας παιπάλης/τσιμέντου, για την παραγωγή φέροντων, εμφανών δομικών στοιχείων τύπου οπτόπλινθου (σύνθεση 30ΠΜ(Μ/Μ)Ε17.46).

Έγιναν οι εξής παραδοχές:

- Τιμή αγοράς πρέσας εξώθησης πλαστικών μαζών υπό κενό: 100000€.
- Έτη απόσβεσης: 6
- Υπολειμματική αξία: 10000€.
- Κόστος ενέργειας και συντήρησης: 20% του κόστους κεφαλαίου.
- Ετήσια αμοιβή και ασφαλιστικές επιβαρύνσεις προσωπικού: 20000€/άτομο.
- Ονομαστική παραγωγικότητα πρέσας αυτής της αξίας: 580τεμ/ώρα.
- Πρακτικά επιτεύξιμη παραγωγικότητα σε συνθήκες εργοταξίου: 400 τεμ/ώρα.
- Διαστάσεις στοιχείου: 100x200x60mm³.

Έτσι, αφού υπολογίστηκε το ετήσιο κόστος κεφαλαίου, το ετήσιο κόστος λειτουργίας του μηχανήματος, το πλήθος των παραγομένων δομικών στοιχείων ανά έτος, η επιθυμητή διαθεσιμότητα του μηχανήματος, ο αριθμός του απαιτούμενου προσωπικού, τελικά συντάχθηκε ο ακόλουθος συγκεντρωτικός πίνακας:

Πίνακας 4.3: Πίνακας στοιχείων κόστους.

Προτεινόμενη χρήση:	Εμφανής φέρουσα εσωτερική τοιχοποιία			
Προϊόν προς παραγωγή:	Τούβλα εξωθούμενα, 30% τσιμέντο			
Κόστος αγοράς εξοπλισμού:	100000			
Έπι απόσβεσης:	6			
Υπολειμματική αξία:	7500			
Επήσιο κόστος κεφαλαίου (€/έτος):	15420			
Χρόνος λειτουργίας επησίως (% του συνολικού):	80			
Ποσοστό επί του κόστους κεφαλαίου (%):	20			
Κόστος ενέργειας και συντήρησης (€/έτος):	16000			
Αριθμός εργαζομένων:	2			
Επήσια αιμοιβή και ασφαλιστικές επιβαρύνσεις (€):	20000			
Χρόνος εργασίας επησίως (% του συνολικού):	50			
Κόστος εργατικών (€/έτος):	20000			
Παραγωγή (τεμ./έτος):	3358200			
Κόστος πρώτων υλών, προ Φ.Π.Α. (€/kg)				
Παιπάλη:	0.00			
Άμμος:	0.00545			
Τσιμέντο:	0.1			
Νερό:	0.01			
Υπερρευστοποιητής:	1.3			
Υπερπλαστικοποιητής:	6.46			
Στεγανωτικό μάζας 1 (υγρό):	1.9			
Στεγανωτικό μάζας 2 (στερεό):	-			
Τελικό κόστος μονάδας (€/m²):	17.04			
Τιμή ανταγωνιστικού εμπορικού προϊόντος (προ Φ.Π.Α.) (€/m²):	25.60*			
Σύγκριση τεχνικών προδιαγραφών	Αντοχή σε ανεμπόδιστη μονοαξονική θλίψη (DIN 18501), μέσος όρος (Mpa)	Αντοχή σε ανεμπόδιστη μονοαξονική θλίψη (DIN 18501), μεμονωμένο δείγμα (Mpa)	Υδαταπορρόφηση (ΕΛΟΤ EN 1338), μέσος όρος (% κ.β.)	Υδαταπορρόφηση (ΕΛΟΤ EN 1338), μεμονωμένο δείγμα (% κ.β.)
Προτεινόμενο προϊόν	≥ 41.56	≥ 40.14	≤ 10.51	≤ 11.37
Υπάρχον εμπορικό προϊόν	$\geq 30^*$	$\geq 25^*$	$\leq 10^*$	$\leq 12^*$

* Πηγή: ΕΥΡΩΚΕΡΑΜΙΚΗ ΤΖΙΤΖΙΚΛΗΣ Α.Ε., προϊόν: τούβλο συμπαγές 5X10X20cm

Οι μηχανικές ιδιότητες με αστερίσκο, υιοθετήθηκαν ως εύλογες για την δεδομένη χρήση.

4.4 Προτεινόμενη χρήση: Εμφανής φέρουσα εξωτερική τοιχοποιία (προϊόν προς παραγωγή: τούβλα εξωθούμενα, 45% τσιμέντο)

Διερευνήθηκε η χρήση 2000 t/yr λεπτομερούς ασβεστολιθικού παραπροϊόντος με την τεχνολογία της εξώθησης πλαστικής μάζας παιπάλης/τσιμέντου, για την παραγωγή φέροντων, εμφανών δομικών στοιχείων τύπου οπτόπλινθου (σύνθεση 45ΠΜ(Μ/Μ)Ε16.88).

Έγιναν οι εξής παραδοχές:

- Τιμή αγοράς πρέσας εξώθησης πλαστικών μαζών υπό κενό: 100000€.
- Έτη απόσβεσης: 6
- Υπολειμματική αξία: 10000€.
- Κόστος ενέργειας και συντήρησης: 20% του κόστους κεφαλαίου.
- Ετήσια αμοιβή και ασφαλιστικές επιβαρύνσεις προσωπικού: 20000€/άτομο.
- Ονομαστική παραγωγικότητα πρέσας αυτής της αξίας: 580τεμ/ώρα.
- Πρακτικά επιτεύξιμη παραγωγικότητα σε συνθήκες εργοταξίου: 400 τεμ/ώρα.
- Διαστάσεις στοιχείου: 100x200x60mm.

Κατά τα γνωστά υπολογίστηκε το ετήσιο κόστος κεφαλαίου, το ετήσιο κόστος λειτουργίας του μηχανήματος, το πλήθος των παραγομένων δομικών στοιχείων ανά έτος, η επιθυμητή διαθεσιμότητα του μηχανήματος, ο αριθμός του απαιτούμενου προσωπικού και τελικά συντάχθηκε ο ακόλουθος συγκεντρωτικός πίνακας:

Πίνακας 4.4: Πίνακας στοιχείων κόστους.

Προτεινόμενη χρήση:	Εμφανής φέρουσα εξωτερική τοιχοποιία			
Προϊόν προς παραγωγή:	Τούβλα εξωθούμενα, 45% τσιμέντο			
Κόστος αγοράς εξοπλισμού:	100000			
Έτη απόσβεσης:	6			
Υπολειμματική αίσια:	7500			
Επήσιο κόστος κεφαλαίου (€/έτος):	15420			
Χρόνος λειπουργίας εποίσιως (% του συνολικού):	80			
Ποσοστό επί του κόστους κεφαλαίου (%) :	20			
Κόστος ενέργειας και συντήρησης (€/έτος):	16000			
Αριθμός εργαζομένων:	2			
Επίσια αμοιβή και ασφαλιστικές επιβαρύνσεις (€):	20000			
Χρόνος εργασίας εποίσιως (% του συνολικού):	50			
Κόστος εργατικών (€/έτος):	20000			
Παραγωγή (τεμ./έτος):	24291400			
Κόστος πρώτων υλών, προ Φ.Π.Α. (€/kg)				
Παπάλη:	0.00			
Άμμος:	0.00545			
Τσιμέντο:	0.1			
Νερό:	0.01			
Υπερρευστοποιητής:	1.3			
Υπερπλαστικοποιητής:	6.46			
Στεγανωτικό μάζας 1 (υγρό):	1.9			
Στεγανωτικό μάζας 2 (στερεό):	-			
Τελικό κόστος μονάδας (€/m²):	18.75			
Τιμή ανταγωνιστικού εμπορικού προϊόντος (προ Φ.Π.Α.) (€/m²):	25.60*			
Σύγκριση τεχνικών προδιαγραφών	Αντοχή σε ανεμπόδιστη μονοαξονική θλίψη (DIN 18501), μέσος όρος (Mpa)	Αντοχή σε ανεμπόδιστη μονοαξονική θλίψη (DIN 18501) , μεμονωμένο δείγμα (Mpa)	Υδαταπορρόφηση (ΕΛΟΤ EN 1338), μέσος όρος (% κ.β.)	Υδαταπορρόφηση (ΕΛΟΤ EN 1338), μεμονωμένο δείγμα (% κ.β.)
Προτεινόμενο προϊόν:	≥ 42.70	≥ 38.14	≤ 7.47	≤ 8.54
Υπάρχον εμπορικό προϊόν:	$\geq 30^*$	$\geq 25^*$	$\leq 8^*$	$\leq 10^*$

* Πηγή: ΕΥΡΩΚΕΡΑΜΙΚΗ ΤΖΙΤΖΙΚΗΣ Α.Ε., προϊόν: τούβλο συμπαγές 5X10X20cm

Οι μηχανικές ιδιότητες με αστερίσκο, νιοθετήθηκαν ως εύλογες για την δεδομένη χρήση.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, έγινε διερεύνηση του προβλήματος συσσώρευσης της ασβεστολιθικής παιπάλης, που παράγεται ως παραπροϊόν κατά την εξορυκτική διαδικασία για την εξεύρεση μιας κατάλληλης και άμεσα εφαρμόσιμης στο περιβάλλον της ελληνικής λατομικής επιχείρησης, λύσης.

Αρχικά πραγματοποιήθηκε εκτενές πρόγραμμα δειγματοληψίας και εργαστηριακού χαρακτηρισμού δειγμάτων ασβεστολιθικής παιπάλης καθώς και μητρικού πετρώματος, που συνελέγησαν από λατομική επιχείρηση της περιοχής Ηρακλείου Κρήτης. Η διαδικασία του εργαστηριακού χαρακτηρισμού έδειξε ότι :

1. Υπάρχει σημαντική διακύμανση κυρίως στην κοκκομετρική σύνθεση και λιγότερο στη χημική και ορυκτολογική σύσταση της παραγόμενης παιπάλης που οφείλεται κυρίως στις διαφορετικές τεχνικές απαγωγής της από τα αδρανή υλικά, αλλά και στις διαφορετικές συνθήκες συλλογής αποθήκευσης και μηχανικής σταθεροποίησής της.
2. Οι διαφορετικές ποιότητες της παραγόμενης παιπάλης μπορούν να αναγνωριστούν με ικανοποιητικό τρόπο μακροσκοπικά, γεγονός που μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα για την βελτίωση του τρόπου διαχείρισης της.

Η επιμόλυνση της παιπάλης συμβαίνει κατά τις διαδικασίες συλλογής, αποκομιδής, μηχανικής σταθεροποίησης και αποθήκευσης και οφείλεται::

1. Στα ίχνη NaCl που περιέχονται στο υφάλμυρο βιομηχανικό νερό που χρησιμοποιείται για την διαβροχής της παιπάλης. Η παρουσία των ποσοτήτων αυτών NaCl θα μπορούσε να βλάψει σημαντικά την πιθανή μελλοντική προώθηση του λεπτομερούς παραπροϊόντος προς την κατασκευαστική βιομηχανία, η οποία και επιβάλει αυστηρά όρια της συγκέντρωσης NaCl στις πρώτες ύλες.
2. Στα προϊόντα της καύσης του πετρελαίου βιομηχανικής καύσης (mazut) που χρησιμοποιείται στον κλίβανο για την παραγωγή των ασφαλτομιγμάτων. Η παρουσία αυτών των οργανικών ενώσεων, σε αυξημένες συγκεντρώσεις, εντός της ασβεστολιθικής παιπάλης κρίνεται ανεπιθύμητη.

Για την αντιμετώπιση των προβλημάτων αυτών προτείνεται (Galetakis & Leventakis, 2009):

1. Η εφαρμογή της ξηρής αέριας απαγωγής της παιπάλης από τα αδρανή υλικά με αναρρόφηση, στα διάφορα στάδια επεξεργασίας τους.
2. Η οργάνωση και λειτουργία ενός συστήματος διαχείρισης της χύδην, ξηρής παιπάλης με την αποθήκευσή της σε σιλό και την μεταφορά της από αντίστοιχα αυτοκίνητα πνευματικής μεταφόρτωσης. Έτσι, θα ήταν δυνατή η οργάνωση σε τοπικό επίπεδο ενός συστήματος συλλογής της παιπάλης από τις διάφορες επιχειρήσεις του κλάδου και η συνολική επεξεργασία της από επιχειρήσεις που θα έχουν έτσι σημαντικό όφελος από τα παραγόμενα προϊόντα ανακύκλωσης της λατομικής διεργασίας. Τέτοιο σύστημα ξηρής, χύδην διακίνησης και εμπορίας λεπτομερούς υλικού εφαρμόζετε διεθνώς σήμερα στην αγορά τσιμέντου.
3. Η αποκονίωση των χονδρομερών αδρανών υλικών («γαρμπίλι»), τα οποία συμμετέχουν στο ασφαλτοσκυρόδεμα, προ της εισόδου τους στον κλίβανο ανάμιξης με στόχο την ποσοστιαία μείωση των ζημιογόνων προσμίξεων πριν την τελική ομογενοποίηση των ποσοτήτων παιπάλης.

Όσον αφορά την δυνατότητα αξιοποίησης της παιπάλης για παραγωγή ειδικών δομικών στοιχείων, διερευνήθηκαν πειραματικά δυο τεχνολογίες διαμόρφωσης δομικών στοιχείων με κύριο συστατικό την παιπάλη και συνδετική κονία το κοινό τσιμέντο.

Η πρώτη πειραματική διερεύνηση αφορούσε στην τεχνολογία διαμόρφωσης δομικών στοιχείων από ύφυγρα μίγματα παιπάλης, λατομικής άμμου, υπολειμμάτων επεξεργασίας μαρμάρου και κοινού τσιμέντου τύπου Portland CEM II 32.5 υπό πίεση. Τα αποτελέσματα των εργαστηριακών μετρήσεων έδειξαν ότι τα μίγματα που περιέχουν παιπάλη και λατομική άμμο ως αδρανή μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή δομικών στοιχείων τύπου κυβόλιθου. Οι παράμετροι σχεδιασμού που επηρεάζουν καθοριστικά τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των παραγόμενων δομικών στοιχείων με την τεχνολογία αυτή είναι η κοκκομετρική σύνθεση του μίγματος, η πίεση διαμόρφωσης και η περιεκτικότητα σε τσιμέντο.

Η δεύτερη τεχνολογία που διερευνήθηκε αφορούσε την παραγωγή δομικών στοιχείων με εξώθηση μαζών, που προκύπτουν με ανάμιξη τσιμέντου, ασβεστολιθικής παιπάλης και κοινών χημικών πρόσμικτων σκυροδέματος (υπερευστοποιητής, πλαστικοποιητής). Χρησιμοποιώντας τις μέγιστες κατά τον κατασκευαστή δοσολογίες υπερευστοποιητή και πλαστικοποιητή, έγινε δυνατή η παραγωγή

αναμιγμάτων πλαστικής μηχανικής συμπεριφοράς, τα οποία παρουσίαζαν ικανοποιητικές ιδιότητες σκληρυμένου προϊόντος για την παραγωγή διακοσμητικών, μη φερόντων αλλά και φερόντων δομικών στοιχείων, ανάλογα με την σύνθεση.

Ακολούθησε δοκιμή τεχνητής γήρανσης των πλέον υποσχόμενων συνθέσεων που παρασκευάστηκαν. Σχεδιάστηκε ειδικό προφίλ ψύξης/θέρμανσης το οποίο να ανταποκρίνεται στις κλιματικές αλλαγές της Κρήτης, βασισμένο στο πρότυπο EN12371 Μετά την συμπλήρωση των 25 κύκλων που αναφέρονται βιβλιογραφικά ως ο ελάχιστος προτεινόμενος αριθμός για έλεγχο, δεν παρατηρείται υποβιβασμός των κύριων φυσικομηχανικών ιδιοτήτων των δοκιμών που ελέγχηκαν.

Συντάχθηκε οικονομοτεχνική μελέτη για την αξιολόγηση των παραπάνω προτάσεων και την αξιοποίηση της παιπάλης. Αυτή έδειξε ότι μπορούν να παραχθούν εμπορικά προϊόντα όπως κυβόλιθοι, πλάκες δαπεδόστρωσης, τούβλα για εσωτερική τοιχοποιία και τούβλα διακοσμητικά για εξωτερική τοιχοποιία, τα οποία λόγω των εφάμιλλων, μηχανικών τους ιδιοτήτων αλλά και του ιδιαίτερα ανταγωνιστικού τους κόστους, σε σύγκριση με αντίστοιχα εμπορικά προϊόντα, θα μπορέσουν να διεκδικήσουν μια σημαντική θέση στην ελληνική αγορά δομικών υλικών.

Για την συνέχιση της παρούσας εργασίας προτείνεται η δοκιμή εφαρμογής των προτεινόμενων τεχνολογιών σε ημιβιομηχανική κλίμακα, διαδικασία που θα αναδείξει τις απαιτούμενες προσαρμογές για την πρακτική εφαρμογή τους.

Οι μελλοντικές κατευθύνσεις έρευνας θα μπορούσαν να περιλαμβάνουν την διερεύνηση:

1. της προσθήκης στις προτεινόμενες συνθέσεις της τεχνικής διαμόρφωσης υπό πίεση κι άλλων αδρανών υλικών για την παραγωγή δομικών στοιχείων ειδικών ιδιοτήτων όπως ανακυκλωμένο γυαλί για την παραγωγή αντιολισθηρών πλακών, υπερλεπτομερών πυριτικών (silica fume) για την παραγωγή φερόντων δομικών στοιχείων ιδιαίτερα υψηλής μηχανικής αντοχής (υπερισχυρά μικροσκυροδέματα), κ.λ.π.
2. της προσθήκης εμπορικά διαθέσιμων υπερλεπτομερών πολυμερών, στις προτεινόμενες συνθέσεις της ίδιας τεχνολογίας, για την μείωση του πορώδους και την επίτευξη χαμηλότερων τιμών υδατοαπορόφησης

3. της χρήσης κατάλληλου χημικού πρόσμικτου σκυροδέματος («στεγανωτικό μάζας») για την περαιτέρω μείωση της υδατοαπορρόφησης κατά την τεχνική παρασκευής εξωθήσιμων μιγμάτων
4. της εξώθησης των συνθέσεων που προτείνονται από βιομηχανική αντλία εξώθησης με εφαρμογή κενού
5. της προσθήκης ανακυκλωμένων μικροϊνών για την αύξηση των αντοχών των προτεινόμενων προς εξώθηση συνθέσεων.

Οι παραπάνω κατευθύνσεις έρευνας θα μπορούσαν να αναδείξουν καλύτερα τις δυνατότητες που παρέχει η χρήση λεπτομερούς ασβεστολιθικού λατομικού παραπροϊόντος για την παραγωγή μεγάλου εύρους δομικών προϊόντων, με ικανοποιητικές μηχανικές ιδιότητες ανάλογα την χρήση τους, και ανταγωνιστικό κόστος παραγωγής..

Βιβλιογραφία

- Able, R. J. (1995). Update on the aggregate industry investigation on the utilization of fines for remineralization. ICAR 3rd annual symposium, <http://www.engr.utexas.edu/icar/publications/index.cfm>
- Ahn, N. and Fowler, D. W. (1999). Past and current fines research. ICAR 7th annual symposium, <http://www.engr.utexas.edu/icar/publications/index.cfm>
- Ahn, N. and Fowler, D. W. (2001). An experimental study on the guidelines for using higher contents of aggregate microfines in Portland cement concrete. International Center for Aggregates Research, Research Report ICAR 102-1F, <http://www.engr.utexas.edu/icar/publications/index.cfm>
- Ahn, N. and Fowler, D. W. (2002). The Effects of High Fines on the Properties of Concrete. ICAR 10th Annual Symposium, <http://www.engr.utexas.edu/icar/publications/index.cfm>
- Ahn, N., Phelan, T., Fowler, D. W. and Hudson, B. P. (2001). The Effects of High-Fines Concrete on the Properties of Cement Mortar and Concrete. ICAR 9th Annual Symposium, <http://www.engr.utexas.edu/icar/publications/index.cfm>
- Aldea C., Marikunte S., Shah S.P., 1998, Extruded Fiber Reinforced Cement Pressure Pipe. Advanced Cement Based Materials, Elsevier
- Amaratunga, L.M. (1991). Experimental evaluation of a novel concept of utilisation and disposal of fine mill tailings as aggregates by agglomeration. *Mineral Engineering*, 4, pp 1081-1090.
- Anderson, D. A. (1996). Influence of fines on performance on asphalt concrete mixtures. ICAR 4th annual symposium, <http://www.engr.utexas.edu/icar/publications/index.cfm>
- Anderson, H. J. (2003). Utah Experience with Performance-Related Specifications. ICAR 11th Annual Symposium, <http://www.engr.utexas.edu/icar/publications/index.cfm>
- Arup (2003). Aggregates Levy Sustainability Fund for Wales. Improving the information base on secondary minerals/ C&D waste for use as aggregates in Wales.

Draft final report November 2003. 115 pp. Prepared by Ove Arup engineering consultants.

- ASTM C 187 – 98 Standard Test Method for Normal Consistency of Hydraulic Cement, American Association State Highway and Transportation Officials Standard AASHTO No.: T 129
- ASTM C109 / C109M - 08 Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens).
- ASTM C1195 - 03 Standard Test Method for Absorption of Architectural Cast Stone.
- ASTM C138 / C138M - 08 Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete.
- ASTM C348 - 08 Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars.
- AusIMM (2004). Basics of mineral processing: Product handbook: Chapter 3: Size reduction. www.ausimm.com.au/membersonly/chap2/sect1c.pdf
- Bakken, A.K., Gautneb, H. Sveistrup, T. and Myhr, K. (2000). Crushed rocks and mine tailings applied as K fertilizers on grassland. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 56, pp 53-67.
- Barker, A. V. (1998). Soil remineralization for sustainable agriculture. ICAR 6th annual symposium, <http://www.engr.utexas.edu/icar/publications/index.cfm>
- Bateman, A. (2003). Dufferin implements cost effective improvements, breaks with tradition. *Aggregates & Roadbuilding Magazine*, May/ June 2003, <http://rocktoroad.com/mj03dufferin.html>
- Bender W., Böger H.H., 2007, A Short History of the Extruder in Ceramics in Extrusion in Ceramics, Härdle F. (Ed.) Springer-Verlag Berlin Heidelberg, p.468.
- BS 6073, (1981). Part 1: Precast concrete masonry units, Part 1. Specification for precast concrete masonry units. British Standards Institution, 1981.
- BS 6717, (1993). Part 1: Precast concrete paving blocks, Part 1. Specification for paving blocks. British Standards Institution, 1993.

- Bolland, M.D.A. and Baker, M.J. (2000). Powdered granite is not an effective fertilizer for clover and wheat in sandy soils from Western Australia. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 56, pp 59-68.
- British Geological Survey (2003). Collation of the results of the 2001 Aggregate Minerals Survey for England and Wales. Commissioned report CR/03/53N.
- BSI (2002a). BS EN 12620:2002, Aggregates for concrete. British Standards Institution.
- BSI (2002b). BS EN 13043:2002, Aggregates for bituminous mixtures and surface treatments. British Standards Institution.
- Brown, D. (1996). Use of waste fines as backfill material. ICAR 4th annual symposium, <http://www.enr.utexas.edu/icar/publications/index.cfm>
- Catarino, L., Sousa, J., Martins, I.M., Vieira, M.T. and Oliveira, M.M. (2003). Ceramic products obtained from rock wastes. *Journal of Materials Processing Technology*, 143-144 pp 843-845. 087/MIST2/DACM/01 MIST project reference: MA/2/4/003 Mineral Solutions Ltd.,
<http://www.mineralsolutions.co.uk/mist/mist2.pdf>
- Çelik, T. and Marar, K. (1996). Effects of crushed stone dust on some properties of concrete. *Cement and Concrete Research*, 26, pp 1121-1130.
- Collins, R. (1999). Innovative uses of aggregate fines in hot-mix asphalts. ICAR 7th annual symposium, <http://www.enr.utexas.edu/icar/publications/index.cfm>.
- Crouch, F. (1993). Shipping practices. *Industrial Minerals*, 312, pp. 39-47.
- Crouch, L. K. and Gamble, R. (1997). Limestone screenings as aggregate for excavatable controlled low strength material (CLSM). ICAR 5th annual symposium, <http://www.enr.utexas.edu/icar/publications/index.cfm>
- Crouch, L. K., Dotson, V. J., Clouse, L. and Hall, S. M. (2003). Effect of Fine Aggregate Type on CLSM Properties. ICAR 11th Annual Symposium, <http://www.enr.utexas.edu/icar/publications/index.cfm>
- de Rezende, L.R. and de Carvalho, J.C. (2003). The use of quarry waste in pavement construction. *Resources, Conservation and Recycling*, pp. 1-15.
- DIN EN 1168:2009 Precast concrete products - Hollow core slabs.

- Dukatz, E. L. (1995). Effective use of aggregate fines. ICAR 3rd annual symposium, <http://www.enr.utexas.edu/icar/publications/index.cfm>
- Dumitru, I. I., Paraschiv, V., Glass, C. and Mandarakas, G. (2001). Alternative or Complementary Methods for Assessment of Fine Aggregates. ICAR 9th Annual Symposium, <http://www.enr.utexas.edu/icar/publications/index.cfm>
- Dumitru, I., Zdrilic, A. and Azzopardi, A. (1999). Soil remineralization with basaltic rock dust in Australia. ICAR 7th annual symposium, <http://www.enr.utexas.edu/icar/publications/index.cfm>
- Dumitru, I. I., Zdrilic, T. and Johnson, G. (2001). Further Investigation of Soil Remineralization Using Quarry Fines in Australia. ICAR 9th Annual Symposium, <http://www.enr.utexas.edu/icar/publications/index.cfm>
- DIN EN 12371:2002 Natural stone test methods - Determination of frost resistance.
- Felekoglu, B. and Baradan, B. (2003). Utilisation of limestone powder in self-levelling binders. In: Recycling and Reuse of Waste Materials. Eds Dhir, R.K., Newlands, M.D., Halliday, J.E. pp.475-484.
- Fletcher, T., Eyad A. and Masad, E. A. (2002). AIMS: Aggregate Imaging System for Characterizing Fine and Coarse Aggregate Shape Properties. ICAR 10th Annual Symposium, <http://www.enr.utexas.edu/icar/publications/index.cfm>
- Fowler, J. (1995). Construction uses of stone fines. ICAR 3rd annual symposium, <http://www.enr.utexas.edu/icar/publications/index.cfm>
- Fowler, J. C. (1997). Increasing amount of minus 200 fines in Portland cement concrete. ICAR 5th annual symposium, <http://www.enr.utexas.edu/icar/publications/index.cfm>
- Fowler, D. W. and Constantino, C. A. (1997). International research on fines in concrete. ICAR 5th annual symposium, <http://www.enr.utexas.edu/icar/publications/index.cfm>
- Fraser, J. and McBride, R.A. (2000). The utility of aggregate processing fines in the rehabilitation of dolomite quarries. *Land Degradation and Development*, 11, pp 1-17.

- Frye, J. A. (1994). Small particle size lightweight aggregate United States Patent 5,376,171. December 27 1994.
- Galetakis, M. and S. Raka, 2004a. Utilization of lime-stone dust for artificial stone production: an experimental approach. *Mineral Engineering*, 17, 355-357.
- Galetakis, M. and S. Raka, 2004b. Assessment of lime-stone quarry dust by using factorial design of experiments. Proc. of 1st Int. Symposium on Advances in Mineral Resources Management and Environmental Geotechnology (AMIREG), Hania, Greece, pp. 685-689.
- Galetakis M. and Leventakis K., 2009, Characterisation of quarry fines for construction recycling uses. Proc. of 3rd Int. Symposium on Advances in Mineral Resources Management and Environmental Geotechnology, Athens, Greece, pp 131-137.
- Garboczi, E. J., Martys, N. S., Saleh, H. and Livingston, R. (2001). Acquiring, Analyzing, and Using Complete Three-Dimensional Aggregate Shape Information. ICAR 9th Annual Symposium,
<http://www.enr.utexas.edu/icar/publications/index.cfm>
- Glover, A. S. (1998). Mineral and organic fertilizer. (Vulcan Materials Company) United States Patent 5,741,346. April 21 1998.
- Göhlert K., Uebel M., 2007, Test Methods for Plasticity and Extrusion Behaviour in Extrusion in Ceramics, Härdle F. (Ed.) Springer-Verlag Berlin Heidelberg, p.468.
- Graves, R. E. and Little, D. N. (1996). Importance of carbonate fines in improving structural contribution of unbound limestone. ICAR 4th annual symposium, <http://www.enr.utexas.edu/icar/publications/index.cfm>
- Hancock, W. A. and Scott, J. B. (1996). Leaving pond fines in manufactured sand for concrete. ICAR 4th annual symposium. *087/MIST2/DACM/01 MIST project reference: MA/2/4/003* Mineral Solutions Ltd.,
<http://www.mineralsolutions.co.uk/mist/mist2.pdf>
- Harley, A. D., Gilkes, R. J. (2000). Factors influencing the release of plant nutrient elements from silicate rock powders: a geochemical overview. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 56, pp 11-36.

- Harrison, D. J. (2003). From waste to wealth: developing saleable mineral products from quarry waste. In: Recycling and Reuse of Waste Materials. Eds Dhir, R.K., Newlands, M.D., Halliday, J.E. pp.281-286.
- Hercules Incorporated (NYSE:HPC), 1990, Technical Information bulletin, PL 22.011-E2 (supersedes 22.011-E1) Page 1 of 5.
- Highley, D. E., Mankelow, J. M., Sen, M. A., Coats, J. S., White, R., Hobbs, S. F. and Bartlett, E. L. (2003). Collation of the results of the 2001 Aggregate Minerals Survey for England and Wales. *British Geological Survey Commissioned Report CR/03/53N*, British Geological Survey, Keyworth, Nottingham, 103pp.
- Hill, A. R., Dawson, A. R. and Mundy, M. (2001). Utilisation of aggregate materials in road construction and bulk fill. *Resources, Conservation and Recycling*, 32, pp 305-320.
- Ho, D. W. S., Sheinn, A. M. M., Ng, C. C. and Tam, C. T. (2002). The use of quarry dust for SCC applications. *Cement and Concrete Research*, 32, pp. 505-511. <http://www.mda.state.mn.us/esap/greenbook2002/cs11rosen.pdf>
- Hudson B. P. (1999). Progress- ICAR project 102- Increasing fines in PCC. ICAR 7th annual symposium, <http://www.engr.utexas.edu/icar/publications/index.cfm>
- Hudson, B. P. (2001). Discovering the lost aggregate potential, Parts 1-8. <http://www.pitandquarry.com/pitandquarry/article/articleDetail.jsp?id=40697>
- Hudson, B. P. (2003). Blending Manufactured Sands for Concrete. ICAR 11th Annual Symposium, <http://www.engr.utexas.edu/icar/publications/index.cfm>
- Hudson, W. R, Little, D., Razmi, A. M., Anderson, V. and Weismann, A. (1997). An investigation of the status of by-product fines in the United States. International Center for Aggregates Research, Research Report ICAR 101-1, 110pp, <http://www.engr.utexas.edu/icar/publications/index.cfm>
- Huffman, M. (2001). Limestone Pond Fines Case Study: Subtitle D Landfill Soil Infiltration Layer and Other Applications. ICAR 9th Annual Symposium, <http://www.engr.utexas.edu/icar/publications/index.cfm>
- Independent (2004). Couple dismissed as 'cranks' win funding for rock-dust fertiliser trial'. *The Independent*, Tuesday 10 February 2004.

- Jackson, N. M. and Brown, R. H. (1996). Use of higher fines contents in Portland cement concrete. ICAR 4th annual symposium, <http://www.engr.utexas.edu/icar/publications/index.cfm>
- Kim, H., Haas, C. T., Rauch A. F. and Browne, C. (2001). A Prototype Laser Scanner for Characterizing Size and Shape Parameters in Aggregates. ICAR 9th Annual Symposium, <http://www.engr.utexas.edu/icar/publications/index.cfm>
- Kramer, D. A. (1996). Software for determining market areas for fines. ICAR 4th annual symposium, <http://www.engr.utexas.edu/icar/publications/index.cfm>
- Kuder K.G., Mu B., Cyr M.F. and Shah S.P., 2004, Extruded Fiber-Reinforced Composites for Building Enclosures, NSF Housing Research Agenda Development and Workshop.
- Lamb, M. J. (2003). Report on applications and market research, including proposals for laboratory tests. TRL Limited, D1 (May 2003): Prepared for Viridis.
- Lees, R. N. (2003). New uses for mine and quarry waste in agriculture. AIG News 71, pp.13-14. <http://www.aig.asn.au/aignews/AIGFeb03web.pdf>:
- Leventakis K, Galetakis M. & Alevizos G., 2009, Utilization of fine quarry by-products for production of building elements by extrusion – an experimental approach., Proc. of 3rd Int. Symposium on Advances in Mineral Resources Management and Environmental Geotechnology (AMIREG), Athens, Greece, pp 265-271.
- Μαυριγιαννάκης Στ.Π., (2004) «Μελέτη αντοχής τεχνητής πέτρας σε κλιματική καταπόνηση», Μεταπτυχιακή διατριβή, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, 145 σελ.
- Machemehl, C. A. (1997). Solving the fines problem. ICAR 5th annual symposium, <http://www.engr.utexas.edu/icar/publications/index.cfm>
- Machemehl, C. A. (1999). Synopsis of the National Stone Association fines seminar. ICAR 7th annual symposium, 1999, <http://www.engr.utexas.edu/icar/publications/index.cfm>.

- Madeley, P. C. (1999). Soil Remineralisation. BSc thesis, Manchester Metropolitan University;
<http://www.geocities.com/HotSprings/Sauna/1432/SoilRemineralisation1.htm>
- Manning D. (2004). Exploitation and Use of Quarry Fines. Mineral Industry Research Organization. *087/MIST2/DACM/01 MIST project reference: MA/2/4/003*,
<http://www.mineralsolutions.co.uk/mist/mist2.pdf>
- Marabini, A., Plescia, P., Maccari, D., Burragato, F. and Pelino, M. (1998). New materials from industrial and mining wastes: glass-ceramic and glass and rock wool fibre. *International Journal of Mineral Processing*, 53, pp 121-134.
- Marek, C. R. (1995). Importance of fine aggregate shape and grading on properties of concrete. ICAR 3rd annual symposium,
<http://www.enr.utexas.edu/icar/publications/index.cfm>
- Masad, E. (2001). Review of Imaging Techniques for Characterizing the Shape of Aggregates Used in Asphalt Mixes. ICAR 9th Annual Symposium,
<http://www.enr.utexas.edu/icar/publications/index.cfm>
- McIntosh Engineering (2003). Hard Rock Miners Handbook: Rules of Thumb.
www.mcintoshengineering.com
- Menegaki, M., 2008. Aggregate Quarries and Environmental Protection. Latomeio, 8, pp. 28-32 (in Greek).
- Mitchell, C. J., Steadman, E. J., Harrison, D. J. and Murphy, H. A. (2001). REFILL: Low cost fillers from quarry waste: Final Report. www.miro.co.uk
- Nataraja, M. C., Nagaraj T. S. and Reddy A. (2001). Proportioning concrete mixes with quarry wastes. *Cement Concrete and Aggregates*, 23, pp 81-87
- Nunes, M. C. M., Bridges, M. G. and Dawson, A. R. (1996). Assessment of secondary materials for pavement construction: technical and environmental aspects. *Waste Management*, 16, pp. 87-96.
- O'Brien, T. A., Barker, A. V. and Campe, J. (1999). Container production of tomato with food by-product composts and mineral fines. *Journal of Plant Nutrition*, 22, pp. 445-457.

- Oldfield, B. (1996). Rock Dust Puts Out More Than You Think. 6th International Permaculture Conference & Convergence, Australia, September 1996.
<http://www.rosneath.com.au/ipc6/ch02/oldfield/index.html>
- Parker, F. (1996). Crushed stone fines for mechanically stabilized earth walls. ICAR 4th annual symposium, <http://www.enr.utexas.edu/icar/publications/index.cfm>
- Persson, A.-L. (1998). Image analysis of shape and size of fine aggregates, *Engineering Geology*, 50, pp 177-186.
- Politecnico di Milano. www.polimi.it/ricerca/attivita_brevettuale/brevetto.php?codice=CH.06.037.A
- Quarry Products Association (2003). Aggregates EN-day is fast approaching. *QPA Aggregates Group Bulletin 1*, from www.qpa.org.
- Rockliff, D. (1996). Low-grade quarry products, reclaimed aggregates and inert wastes— their use in unbound mixtures for road pavements. *Waste Management*, 16, pp 83-85.
- Rosen, C. (2000). Agricultural use of rock fines as a sustainable soil amendment. Greenbook 2000: Marketing sustainable agriculture, pp. 61-63. Minnesota Department of Agriculture
- Saunders, C. H. (1995). Manufactured sand usage in North Carolina. ICAR 3rd annual symposium, <http://www.enr.utexas.edu/icar/publications/index.cfm>
- Sculthorpe, R. E. (1998). Insulating concrete forms: market opportunities for aggregate fines. ICAR 6th annual symposium, 1998,
<http://www.enr.utexas.edu/icar/publications/index.cfm>
- Seberras, D. (2000). “Little John” improves productivity, reduces fines. *Aggregates & Roadbuilding Magazine*, November 2000.
<http://rocktoroad.com/littlejohn.html>
- Singh, B. and Majumdar, A.J. (1981). Properties of grc containing inorganic fillers. *The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 3, pp. 93-102
- Smith, J. O. and Slaughter, P. (1996). Uses for by-product fines. ICAR 4th annual symposium, <http://www.enr.utexas.edu/icar/publications/index.cfm>

- South African Peak Quarry (Company). South African quarry turns waste into valuable product, The world of Svedala. *C&D Debris Recycling*; Mar/Apr 98, Vol. 5, Issue 2, p19.
- Stang H., Li V.C., 2007. Extrusion of ECC material in High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 3 (HPFRCC-3).. H. Reinhardt and A. Naaman (Eds). Chapman & Hull, p565.
- Topçu, B., and Urlu, A. (2003). Effect of the use of mineral filler on the properties of concrete, *Cement and concrete research*, 33, pp 1071-1075.
- Touahamia, M., Sivakumar, V. and McKelvey, D. (2002). Shear strength of reinforced-recycled material. *Construction and Building Materials*, 16, pp 331- 339. 087/MIST2/DACM/01 MIST project reference: MA/2/4/003 Mineral Solutions Ltd., <http://www.mineralsolutions.co.uk/mist/mist2.pdf>
- Τζεφέρης Π. (2009), <http://elladitsamas.blogspot.com>
- United States Patent Nr. 3880664. Method for extrusion, 29/4/1975.
- United States Patent 5047086. Cement composition for extrusion, 10/9/1991.
- United States Patent Nr. 7041168. Process for cement extrusion that makes use of crosslinked cellulose additives, 9/5/2006.
- Wainwright P. J., Cresswell D. J. F. and van der Sloot H. A. (2002). The production of synthetic aggregate from a quarry waste using an innovative style rotary kiln. *Waste Management & Research*, 20, pp. 279-289.
- Watson, D. (1999). Georgia's experience with increasing the use of fines in concrete. ICAR 7th annual symposium, <http://www.engr.utexas.edu/icar/publications/index.cfm>
- Weinecke, M. H. and Faulkner, B. P. (2002). Production of lightweight aggregate from waste materials. *Mining Engineering*, 54, pp. 39-43
- Weyland, T. E., Koshinski, C. J. and Baum, W. (2000). Method of making building blocks from coal combustion waste and related products. (Pittsburgh Mineral and Environmental Technology, Inc.) United States Patent 6,068,803. May 30 2000.

- Wilding, T. A. and Sayer, M. D. J. (2002). The physical and chemical performance of artificial reef blocks made using quarry by-products. *ICES Journal of Marine Science*, 59, pp. S250-S257.
- Wills, B. A. (1997). Mineral Processing Technology: An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery. Butterworth-Heinemann, 6th Edition, 486pp.
- Wood, S. A. (1995). Pond fines: Waste not, want not. Industry commitment to waste fines utilization. ICAR 3rd annual symposium
<http://www.engr.utexas.edu/icar/publications/index.cfm>
- Wood, S. A. and Marek, C. R. (1995). Recovery and utilization of quarry by-products for use in highway construction. ICAR 3rd annual symposium,
<http://www.engr.utexas.edu/icar/publications/index.cfm>